



Accuracy of satellite radar altimetry over rivers : development and application of a standardized method to characterize the quality of radar altimetry products for inland water hydrology

Nicolas Bercher

► To cite this version:

Nicolas Bercher. Accuracy of satellite radar altimetry over rivers : development and application of a standardized method to characterize the quality of radar altimetry products for inland water hydrology. Sciences of the Universe [physics]. AgroParisTech, 2008. English. NNT : 2008AGPT0085 . pastel-00005203

HAL Id: pastel-00005203

<https://pastel.hal.science/pastel-00005203>

Submitted on 22 Jul 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR D'AGROPARISTECH

Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

Spécialité : Télédétection

Présentée et soutenue publiquement le 9 décembre 2008 par

Nicolas BERCHER

**PRÉCISION DE L'ALTIMÉTRIE SATELLITAIRE
RADAR SUR LES COURS D'EAU :
DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE STANDARD DE QUANTIFICATION
DE LA QUALITÉ DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES ET
APPLICATIONS**

Membres du jury :

M. Pascal KOSUTH	Cemagref	Directeur de thèse
Mme Anny CAZENAVE	CNES	Rapporteur
M. Michel LANG	Cemagref	Rapporteur
M. Eric SERVAT	IRD	Examineur
M. Jérôme BENVENISTE	ESA	Examineur
M. Hervé CARFANTAN	CNRS	Examineur
M. Jean-Guy PLANES	Thales Alenia Space	Invité



THÈSE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR D'AGROPARISTECH

Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

Spécialité : Télédétection

Présentée et soutenue publiquement le 9 décembre 2008 par

Nicolas BERCHER

**PRÉCISION DE L'ALTIMÉTRIE SATELLITAIRE
RADAR SUR LES COURS D'EAU :
DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE STANDARD DE QUANTIFICATION
DE LA QUALITÉ DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES ET
APPLICATIONS**

Membres du jury :

M. Pascal KOSUTH	Cemagref	Directeur de thèse
Mme Anny CAZENAVE	CNES	Rapporteur
M. Michel LANG	Cemagref	Rapporteur
M. Eric SERVAT	IRD	Examineur
M. Jérôme BENVENISTE	ESA	Examineur
M. Hervé CARFANTAN	CNRS	Examineur
M. Jean-Guy PLANES	Thales Alenia Space	Invité

Dernière mise à jour : le 14 avril 2009.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Pascal Kosuth pour m'avoir accueilli en thèse au sein de la Maison de la Télédétection et pour m'avoir fait confiance en me confiant ce sujet de recherche. J'ai pu ainsi apprécier ses grandes qualités humaines et scientifiques.

Je souhaite également remercier les organismes cofinanceurs de ma thèse : le CNES, représenté par Hervé Jeanjean, et Thales Alenia Space (Alcatel Alenia Space en 2004, au début de ma thèse), représenté successivement par Jérôme Bruniquel, Yves Le-Roy et Marc Spigai. Je les remercie personnellement pour leurs contributions et les conseils qu'ils m'ont apporté lors de nos diverses rencontres.

Merci au Cemagref de m'avoir fourni les moyens techniques et financiers qui m'ont permis de mener à bien cette thèse.

Je remercie les membre du jury : Anny Cazenave (ingénieur CNES, LEGOS, Toulouse), Michel Lang (Cemagref), Éric Servat (IRD), Jérôme Benvéniste (ESA), Hervé Carfantan (CNRS, Université Paul Sabatier) et tout particulièrement les rapporteurs Anny Cazenave et Michel Lang.

Je tiens à remercier Franck Mercier (CLS, Toulouse/Ramonville) pour ses précieux conseils et la confiance qu'il nous a accordé à Pascal Kosuth et à moi-même en nous intégrant dans l'équipe du projet PISTACH. Merci à Jérôme Benvéniste (ESA) avec qui nous avons collaboré pour l'analyse des données du projet « River & Lake ».

Je remercie Gérard Cochonneau (IRD) de m'avoir fourni conseils et données (mesures in-situ sur le bassin amazonien) ; l'équipe AVISO pour la fourniture des données M-GDR (Topex/Poseidon), GDR (Jason-1) et Jason-2 à venir ; Franck Mercier (encore !) pour les données « CLS », l'équipe de Phillipa Berry du département E.A.P.R.S. (De Montfort University) pour la fourniture des données altimétriques « River & Lake Hydrology », merci au projet CASH.

Je tiens à remercier en poste à la Maison de la Télédétection : Guy Roussin pour ses innombrables aides et conseils en informatique et (surtout) sur les systèmes Linux, Jean-Stéphane Bailly pour les éclaircissements en statistiques.

Je salue au passage Andres Jacome, mon compagnon de route de ces quatre dernières années, les « gens de passage » à la Maison de la Télédétection durant ces quatre dernières années : Julien, Nicolas, Agathe, Cathy, Jérémy, Renaud et Carole ; et ceux qui y sont encore Denis, Bruno (pour la déconne !), Nicolas M., Isabelle, Vincent et ceux que j'ai oublié...

Je remercie tous les gens qui, à un moment ou à un autre, ont joué un rôle déterminant pour que j'en arrive à faire cette thèse : Viviane, ma marraine (pour m'avoir offert mon premier ordinateur à l'âge de sept ans) ; mon frère Sébastien qui m'a tout appris quand j'étais petit ; Olivier Schira (professeur au lycée des Catalins, Montélimar) qui m'a transmis sa passion pour les sciences de l'électronique ; mon arrière-grand-père Pierre Repessé qui sans le savoir (malheureusement) m'a permis de m'approprier l'outil informatique ; Christian Maléquot (professeur à l'IUT1 de Grenoble, Université Joseph Fourier) pour m'avoir éveillé au traitement du signal et trouvé l'un des stages qui m'a le plus marqué au sein

de l'ACROE ; Hervé Carfantan et son équipe pour ce stage de D.E.A qui s'est déroulé dans une ambiance très agréable et pour la découverte entre autres des systèmes Linux ; et, Gilles Rabatel (Cemagref, groupement de Montpellier) pour son soutien lors de ma candidature en thèse.

Un énorme merci à Muriel pour sa présence et son soutien au quotidien. Merci à ses parents Jean-Pierre et Renée pour leur accueil chaleureux alors que je rédigeais ce mémoire de thèse.

À mes parents pour tout ce qu'ils m'ont donné, pour leur soutien sans faille durant ces (trop ?) longues années d'études, à ma mère pour la relecture intégrale de ce manuscrit, MERCI !

Enfin, bienvenue dans la famille au petit Eliott Bercher : je voulais que ton nom soit écrit quelque part dans cette thèse.

Tout l'art de la télédétection consiste à « montrer que ça fonctionne à distance... »

- Parole d'un thésard qui n'a pas
visité le bassin amazonien !

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
I INTRODUCTION À L'ALTIMÉTRIE RADAR SUR LES EAUX CONTINENTALES	17
1 ÉTAT DE L'ART ET OBJECTIFS	19
1.1 L'altimétrie radar depuis 1978	20
1.1.1 Historique	20
1.1.2 Principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir	20
1.1.3 Un aperçu des missions d'altimétrie radar	24
1.1.4 L'altimétrie satellitaire radar pour l'étude des océans	29
1.1.5 Altimétrie radar et hydrologie continentale	32
1.2 Difficultés inhérentes à la mesure altimétrique radar sur les eaux continentales	35
1.2.1 Physique de la mesure et difficultés sur les eaux continentales	35
1.2.2 Corrections des mesures altimétriques	38
1.3 Caractérisation de la qualité des mesures altimétriques sur les eaux continentales	39
1.3.1 Méthodes d'évaluation de la précision des mesures altimétriques	39
1.3.2 Techniques de « retracking »	43
1.4 Objet et objectifs de la thèse	44
1.4.1 Contexte général de la thèse	44
1.4.2 Précision, incertitude, échantillonnage et applications des mesures altimétriques .	45
1.4.3 Objectifs de la thèse	46
1.4.4 Contexte de déroulement de la thèse	46
2 DÉFINITIONS ET DONNÉES UTILISÉES	47
2.1 Définitions et notations usuelles	48
2.1.1 Définitions liées aux données in-situ	48
2.1.2 Définitions liées à l'altimétrie radar	49
2.1.3 Définitions et notations des indicateurs de qualité	51
2.1.4 Deux approches de la qualité	53
2.1.5 Récapitulatif des notations	53
2.2 Sources de données terrestres	55
2.2.1 Données géographiques	55
2.2.2 Données géodésiques	59
2.2.3 Données hydrologiques	59
2.3 Sources de données altimétriques	61
2.3.1 Généralités concernant sur les produits altimétriques	63
2.3.2 Les produits altimétriques utilisés dans cette thèse	66
2.3.3 Dénomination des produits alti-hydrologiques, stations virtuelles et séries temporelles altimétriques	68

3	GÉNÉRATION DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES	71
3.1	Introduction à la génération des produits alti-hydrologiques	72
3.1.1	Principe	72
3.1.2	Intérêt pour la thèse	73
3.2	Application de critères de sélection des mesures altimétriques individuelles	73
3.3	Référencement des mesures altimétriques dans un système géodésique commun	73
3.4	Construction des mesures altimétriques individuelles à haute fréquence	75
3.5	Extraction géoréférencée des mesures altimétriques	77
3.6	Corrections du range et construction de la mesure altimétrique du niveau de l'eau	81
3.6.1	Corrections du range	81
3.6.2	Construction des mesures altimétriques individuelles	82
3.6.3	Calcul de l'altitude orthométrique à l'aide d'un modèle du géoïde terrestre	82
3.7	Sélection d'une mesure représentative par passage sur site du satellite	82
3.8	Méthodes de filtrage	84
3.8.1	Filtrage « global »	84
3.8.2	Filtrage « calendaire » par fenêtre glissante et superposition des hydrogrammes annuels	86
3.8.3	Filtrage « calendaire » : variante récursive	87
3.9	Annexe : Calcul de la dispersion des mesures	87
3.10	Conclusions	90
II	DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE STANDARD POUR LA QUANTIFICATION DE LA QUALITÉ DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES	93
4	BASES DE LA MÉTHODE PROPOSÉE	95
4.1	Introduction à la méthode proposée	96
4.1.1	Utilisation systématique de mesures in-situ reconstituées	96
4.1.2	Quantification de l'« erreur approximée » $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ et des indicateurs de précision approximatifs et de précision réelle	96
4.1.3	Analyse statistiquement significative sur la qualité des mesures altimétriques	96
4.2	Formalisation mathématique de l'erreur et des indicateurs de précision	97
4.2.1	Développement de l'erreur moyenne ($\mu_{\varepsilon_{Sat}}$)	98
4.2.2	Développement de la variance de l'erreur ($\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2$)	99
4.2.3	Développement de l'erreur moyenne quadratique ($RMS_{\varepsilon_{Sat}}^2$)	100
4.2.4	Synthèse	101
4.3	Elaboration d'une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques	101
4.3.1	Calcul des indicateurs de précision approximatifs $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ par quantification de l'erreur approximée $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$	102
4.3.2	Estimation des indicateurs de précision finaux $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ par prise en compte des indicateurs de précision des mesures in-situ et des mesures in-situ reconstituées	102
4.3.3	Schéma synthétique de la méthode	102
5	PREMIÈRE APPROXIMATION DES INDICATEURS DE QUALITÉ	107
5.1	Introduction	108
5.2	Etape 1 : Reconstitution d'une série temporelle in-situ à la station virtuelle	108
5.2.1	Technique de reconstitution des séries temporelles in-situ en des points des cours d'eau par interpolation polynomiale à minimum d'énergie entre les stations limnimétriques	109
5.2.2	Solution par interpolation polynomiale de degré trois ou quatre	111
5.3	Etape 2 : Construction d'une série temporelle de l'erreur approximée	114
5.3.1	Corrections horaires et appariement des mesures in-situ et altimétriques	116

5.3.2	Construction d'une série temporelle de l'erreur approximée des mesures altimétriques	118
5.4	Étape 3 : Calcul de la première approximation des indicateurs de qualité	118
5.4.1	Critères de représentativité hydrologique des séries temporelles in-situ reconstituées et conditions de recevabilité	120
5.4.2	Approximation de la « qualité globale » des mesures altimétriques	125
5.4.3	Approximation de la « qualité par périodes hydrologiques » des mesures altimétriques	125
5.5	Conclusion	128
6	ESTIMATION FINALE DES INDICATEURS DE QUALITÉ	129
6.1	Introduction	131
6.2	Étape 4 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$. . .	132
6.2.1	Estimation de l'erreur moyenne des mesures in-situ ($\mu_{\varepsilon_{Mis}}$)	132
6.2.2	Estimation de la variance de l'erreur des mesures in-situ ($\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$)	133
6.3	Étape 5 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ reconstituées $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	135
6.3.1	Quantification de l'erreur de reconstitution par comparaison des valeurs reconstituées aux mesures issues de stations limnimétriques	137
6.3.2	Déterminants géophysiques retenus pour expliquer et modéliser l'erreur de reconstitution	139
6.3.3	Analyse des résultats de quantification de l'erreur de reconstitution	141
6.3.4	Modèles d'estimation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution	145
6.3.5	Modélisation et estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	147
6.3.6	Synthèse sur la modélisation et l'estimation des indicateurs de précision	152
6.4	Étape 6 : Estimation des indicateurs de précision finaux des mesures altimétriques	159
6.4.1	Précision relative : Estimation et annulation du biais systématique de hautes eaux	159
6.4.2	Calcul des indicateurs finaux des mesures altimétriques	162
6.5	Conclusion	166
III	APPLICATIONS DE LA MÉTHODE STANDARD DE QUANTIFICATION DE LA QUALITÉ DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES	169
7	QUANTIFICATION DE LA QUALITÉ DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES	171
7.1	Introduction	172
7.2	Les différents produits alti-hydrologiques utilisés	172
7.2.1	Produits alti-hydrologiques « prêts à l'emploi »	172
7.2.2	Produits alti-hydrologiques dérivés des produits altimétriques	174
7.2.3	Liste des produits alti-hydrologiques utilisés	176
7.3	Approche statistique de la qualité des produits alti-hydrologiques	177
7.3.1	Les stations virtuelles définies sur le bassin amazonien	177
7.3.2	Critères de sélection des stations virtuelles et séries temporelles alti-hydrologiques	182
7.3.3	Représentations de la qualité d'un produit alti-hydrologique	183
7.4	Quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques	186
7.4.1	CASH (Topex/Poseidon)	188
7.4.2	River & Lake Hydrology/ENVISAT	190
7.4.3	River & Lake Hydrology/ERS-2	192
7.4.4	[~Birkett 2002] (Topex/Poseidon)	194
7.4.5	AVISO/M-GDR/Ocean (Topex/Poseidon)	196
7.4.6	CLS/ENVISAT-L2/Ice1 (Topex/Poseidon)	198
7.4.7	CLS/ENVISAT-L2/Ice2 (Topex/Poseidon)	200
7.4.8	CLS/ENVISAT-L2/Ocean (Topex/Poseidon)	202

7.4.9	CLS/ENVISAT-L2/SeaIce (Topex/Poseidon)	204
7.4.10	CLS/ENVISAT-L2/clsmix (Topex/Poseidon)	206
7.4.11	Table récapitulative des indicateurs de qualité moyens des 46 produits alti-hydrologiques traités	208
7.5	Comparaison des produits et des procédures de fenêtrage, de retracking et de filtrage automatique	210
7.5.1	Comparaison des performances des chaînes de filtrage automatique	210
7.5.2	Comparaison des performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique	212
7.5.3	Comparaison des performances de différentes méthodes de fenêtrage géographique	214
7.5.4	Comparaison de la qualité de 10 produits alti-hydrologiques	216
7.6	Conclusion générale sur la méthode standard de quantification de la qualité	224
8	DÉTERMINATION DE L'INCERTITUDE ASSOCIÉE AUX MESURES ALTIMÉTRIQUES	227
8.1	Introduction : de la précision à l'incertitude	228
8.2	Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité des produits alti-hydrologiques	229
8.2.1	Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité pour le produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR	229
8.2.2	Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT	234
8.3	Détermination de l'incertitude associée à une mesure altimétrique individuelle	238
8.3.1	Cas des stations virtuelles où l'on dispose d'une période historique conjointe mesures altimétriques/mesures in-situ reconstituées	238
8.3.2	Cas des stations virtuelles où l'on ne dispose pas d'une période historique de mesures in-situ reconstituées	238
8.4	Conclusion sur la modélisation de l'incertitude	241
9	DE LA QUALITÉ ALTIMÉTRIQUE À LA QUALITÉ HYDROLOGIQUE	245
9.1	Introduction	246
9.2	Méthodes de suréchantillonnage temporel	246
9.2.1	Suréchantillonnage par interpolation linéaire ou polynomiale	246
9.2.2	Prise en compte des caractéristiques spectrales des signaux hydrologiques	249
9.2.3	Méthodes de suréchantillonnage par approximation de signal à bande spectrale limitée	251
9.2.4	Conclusions	254
9.3	Quantification de la qualité hydrologique des produits alti-hydrologiques	255
9.3.1	« Qualité hydrologique » des séries temporelles limnimétriques reconstituées à partir de séries temporelles alti-hydrologiques	257
9.3.2	Application à l'hydrologie : détermination de l'incertitude associée à une série temporelle limnimétrique reconstituée à partir d'un produit alti-hydrologique	263
10	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	267
10.1	Conclusion	268
10.2	Perspectives	271
10.2.1	Améliorations de la méthode	271
10.2.2	Nouvelles questions de recherche	271
IV	Annexes	275
A	Descriptif des stations virtuelles définies sur le bassin amazonien	277

A.1	Reconstitution des séries temporelles de niveaux aux confluences entre les principaux cours d'eau du bassin amazonien	277
A.2	Stations virtuelles du projet CASH	278
A.3	Stations virtuelles du produit alti-hydrologique [~Birkett 2002]	278
A.4	Stations virtuelles définies pour les produits alti-hydrologiques RLH/ENVISAT et RLH/ERS-2	279
A.5	Stations virtuelles définies dans le cadre de la thèse	282
B	Tables et figures de tous les produits alti-hydrologiques	285
B.1	Produits alti-hydrologiques « prêts à l'emploi »	286
B.2	Produits alti-hydrologiques générés dans le cadre de la thèse	290
C	Environnement informatique et musical	333
C.1	Environnement logiciel	333
C.2	Environnement matériel	334
C.3	La musique qui a accompagné la rédaction de cette thèse	334
	LISTE DES FIGURES	342
	LISTE DES TABLES	346
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	353

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'altimétrie satellitaire radar a connu un très fort développement au cours des trois dernières décennies sur la base d'une finalité majeure de suivi dans le temps et dans l'espace du niveau des océans au service de différentes applications en océanographie.

D'abord exploratoires, les développements méthodologiques sont entrés en phase opérationnelle avec les satellites ERS-1/2 et Topex/Poseidon suivis d'ENVISAT, Jason-1 et Jason-2. Parallèlement, de nombreuses études ont prospecté l'utilisation de l'altimétrie satellitaire sur les eaux continentales pour l'évaluation des stocks d'eau dans les lacs, le nivellement des grands fleuves, le suivi des dynamiques hydrologiques à grande échelle sur les bassins fluviaux.

Sous l'impulsion des équipes de recherche de la sphère des techniques spatiales rejointes par quelques équipes de recherche du domaine de l'hydrologie, les produits des missions altimétriques ont progressivement été adaptés pour être potentiellement utilisables par les hydrologues. Des projets comme « River & Lake », CASH ou HydroWeb illustrent les efforts de ces communautés. L'altimétrie satellitaire appliquée aux eaux continentales se trouve maintenant à une croisée des chemins : elle doit à la fois fournir aux hydrologues des produits « qualifiés », c'est-à-dire accompagnés de leurs intervalles d'incertitude, et poursuivre l'effort de développement technologique et algorithmique qui permettra d'augmenter la précision des mesures de niveaux sur des plans d'eau de tailles de plus en plus réduites (altimétrie radar, interférométrie radar across-track, altimétrie LiDAR).

Développer une méthode standardisée de quantification de la qualité des produits altimétriques sur les eaux continentales est une étape clé du développement ultérieur de l'altimétrie radar, qui n'a jusqu'ici pas été abordée de manière systématique (les travaux de Charon Birkett [Birkett et al., 2002] étant les plus avancés dans cette direction).

Une telle méthode permettra en effet aux hydrologues de disposer de mesures altimétriques accompagnées de leurs incertitudes et aux spécialistes de l'altimétrie radar de quantifier de façon objective les gains de précision apportés par de nouvelles technologies ou de nouvelles algorithmiques de traitement des formes d'onde radar.

Le présent travail de thèse est entièrement consacré au développement d'une méthode, standardisée et statistiquement significative, de caractérisation de la qualité des produits altimétriques sur les cours d'eau (ce que nous appellerons « produits alti-hydrologiques »). Il est structuré en trois parties.

Les trois premiers chapitres sont consacrés à un état de l'art sur l'altimétrie radar en général et sur le traitement des problèmes de précision en particulier (chapitre 1), à la définition rigoureuse des concepts et variables utilisés dans le domaine (chapitre 2) et à une présentation des chaînes de traitement permettant de passer d'un produit altimétrique à un produit alti-hydrologique¹ (chapitre 3).

Le développement de la méthode fait l'objet des chapitres 4 à 6.

Son application à différents produits alti-hydrologiques, jusqu'à la quantification de l'incertitude associée aux mesures altimétriques individuelles et à ses implications dans le domaine de l'hydrologie fait l'objet des chapitres 7 à 9.

¹Ensemble de séries temporelles de niveaux d'eau, issues de l'altimétrie radar, en un point d'un cours d'eau sur la trace d'un satellite.

Première partie

INTRODUCTION À L'ALTIMÉTRIE RADAR SUR LES EAUX CONTINENTALES

**État de l'art, définitions, génération des produits
alti-hydrologiques**

Chapitre 1

ÉTAT DE L'ART ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

Sommaire

1.1	L'altimétrie radar depuis 1978	20
1.1.1	Historique	20
1.1.2	Principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir	20
1.1.3	Un aperçu des missions d'altimétrie radar	24
1.1.4	L'altimétrie satellitaire radar pour l'étude des océans	29
1.1.5	Altimétrie radar et hydrologie continentale	32
1.2	Difficultés inhérentes à la mesure altimétrique radar sur les eaux continentales	35
1.2.1	Physique de la mesure et difficultés sur les eaux continentales	35
1.2.2	Corrections des mesures altimétriques	38
1.3	Caractérisation de la qualité des mesures altimétriques sur les eaux continentales	39
1.3.1	Méthodes d'évaluation de la précision des mesures altimétriques	39
1.3.2	Techniques de « retracking »	43
1.4	Objet et objectifs de la thèse	44
1.4.1	Contexte général de la thèse	44
1.4.2	Précision, incertitude, échantillonnage et applications des mesures altimétriques	45
1.4.3	Objectifs de la thèse	46
1.4.4	Contexte de déroulement de la thèse	46

1.1 L'altimétrie radar depuis 1978

1.1.1 Historique

L'altimétrie satellitaire radar a vraiment connu ses débuts¹ le 28 juin 1978 avec le lancement du satellite Seasat (Seasat-A), développé par le JPL² (Jet Propulsion Laboratory, NASA). Le but de cette première mission était non seulement de démontrer la possibilité d'observer les océans -au travers notamment de la mesure de leur hauteur, température de surface et hauteur des vagues- depuis l'espace à une altitude de 800km, mais également de définir les besoins pour les futures missions opérationnelles de suivi des océans. La mission fut malheureusement très courte, puisque 105 jours après son lancement, un court circuit important à bord de Seasat mit fin à cette première expérience.

Depuis, de nombreuses missions - à composante altimétrique ou dédiées - ont vu le jour (cf. figure 1.1). Nous pouvons citer les missions ERS-1 et ERS-2, GeoSAT, GFO, Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2 et ENVISAT.

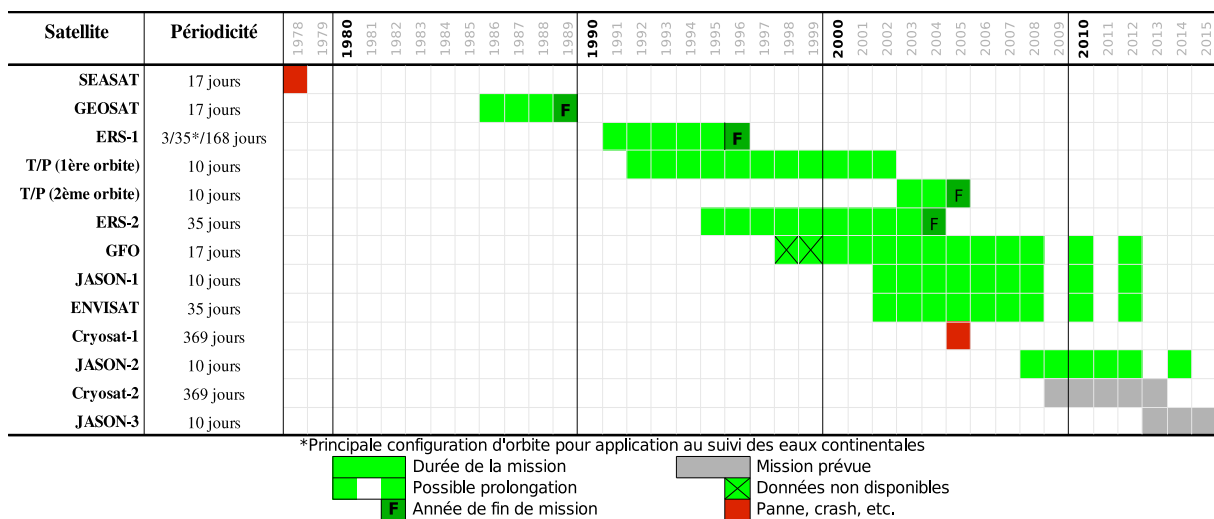


FIG. 1.1: Chronologie des principales missions altimétriques de 1978 à nos jours et à venir.

A cette liste s'ajoutent ICESat (altimétrie LiDAR) ainsi que les projets des missions , Siral et WATER/SWOT.

Les premières exploitations de l'altimétrie radar pour le suivi des eaux continentales ont été initiées entre la fin des années 80 et le début des années 90 avec notamment les travaux de [Rapley et al., 1987], [Guzkowska et al., 1990] et [Koblinsky et al., 1993]. A cette même époque de nombreux travaux sur la mesure de topographie des surface émergées ont vu le jour : mesures du relief, citons notamment [Rapley et al., 1987], [Frey et Brenner, 1990] et [Brenner et al., 1993] (données SeaSAT) ; et études des surfaces de glace avec [Zwally et al., 1989] et [Zwally, 1989]. Ces travaux peuvent être rapprochés des applications en hydrologie continentale en ce sens qu'ils ont permis de valoriser les données altimétriques sur les surfaces continentales.

1.1.2 Principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir

Nous allons, dans cette section, brièvement rappeler quelques points essentiels sur le principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir.

¹D'autres missions à composante altimétrique ont vu le jour avant la mission Seasat (dont GEOS-3), mais celle-ci se différencie de ses prédécesseurs par le fait que la plateforme de Seasat incorporait des capteurs micro-ondes actifs et passifs qui permettaient l'acquisition de mesures quelque soient les conditions météo.

²Voir la page du site web du JPL : <http://www.jpl.nasa.gov/missions/past/seasat.html>.

Orbitographie : caractéristiques orbitales et géolocalisation des satellites

Couverture géographique quasi-globale et répétitive La plupart des missions altimétriques passées et actuelles sont placées sur une orbite bien précise, optimisée pour observer au mieux les phénomènes naturels. Ces orbites, en forme de maillage, présentent un compromis entre la densité spatiale des traces (projection de l'orbite au sol, cf. section 2.1.2) et leur périodicité.

Parmi les caractéristiques orbitales, deux paramètres vont particulièrement nous intéresser pour le suivi des eaux continentales :

- la distance inter-traces à l'équateur, paramètre de la densité du maillage de la couverture spatiale des traces,
- la période de répétition de l'orbite, qui est directement égale à la période d'échantillonnage des mesures altimétriques sur un site donné.

La figure 1.2 illustre les traces des orbites d'une part des satellites Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2 et d'autre part des satellites ERS-1/2 et ENVISAT. On constate que le second maillage est beaucoup plus dense, ce qui se traduit par une période d'échantillonnage plus longue.

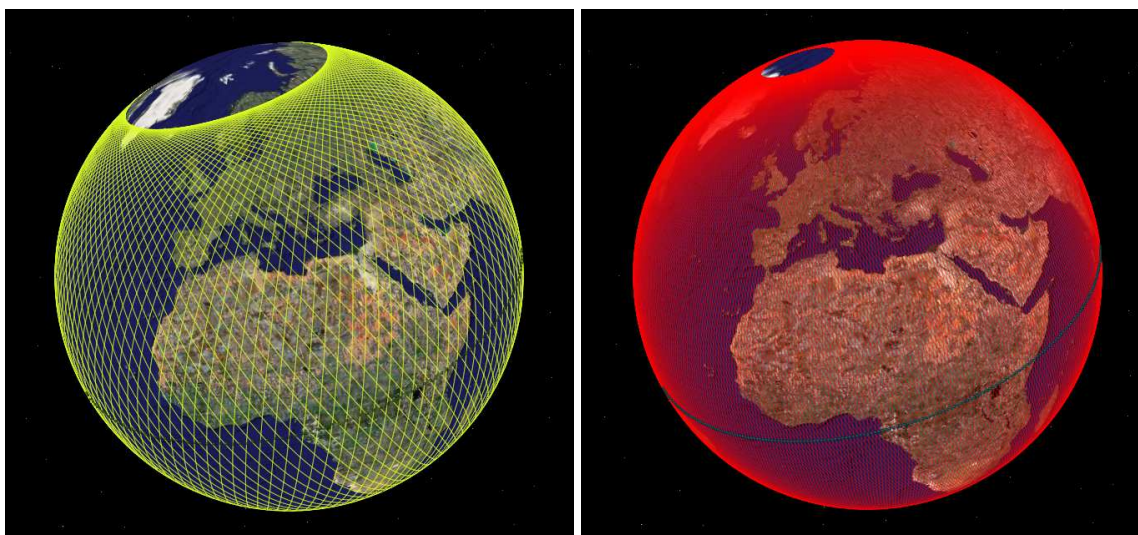


FIG. 1.2: Illustration de la couverture (à gauche) des missions altimétriques Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2, et (à droite) des missions altimétriques ERS-1/2 et ENVISAT.

L'orbite de Topex/Poseidon présente une distance intertrace à l'équateur de 315km (inclinaison de $66,039^\circ$) et une périodicité de 9,9156 jours. L'orbite de ERS-2 présente une distance intertrace à l'équateur de 79km (inclinaison de $98,55^\circ$) et une périodicité de 35 jours.

Dans certains cas, un même satellite a pu être placé successivement sur différentes orbites : c'est le cas par exemple de ERS-1 qui a été exploité sur trois orbites différentes (de périodicité de 3, 35 ou 168 jours) ou encore de Topex/Poseidon qui a été déplacé en 2002 sur une seconde orbite (de même périodicité) à l'intertrace de la première pour laisser place à son successeur Jason-1 (cf. figure 1.7).

Géolocalisation des satellites L'orbitographie est l'un des aspects les plus importants de l'exploitation des satellites en général. Pour l'altimétrie radar nadir, une connaissance précise de l'orbite des altimètres est indispensable. En effet, l'incertitude sur le positionnement vertical de l'altimètre va se reporter directement dans le bilan d'erreur des mesures altimétriques.

Les systèmes de positionnement des missions altimétriques actuelles sont d'une très grande précision (quelques centimètres), mais cela n'a pas toujours été le cas. La figure 1.3 donne un aperçu de l'évolution des gammes d'incertitude sur l'orbite pour les principales missions altimétriques des années passées et présentes.

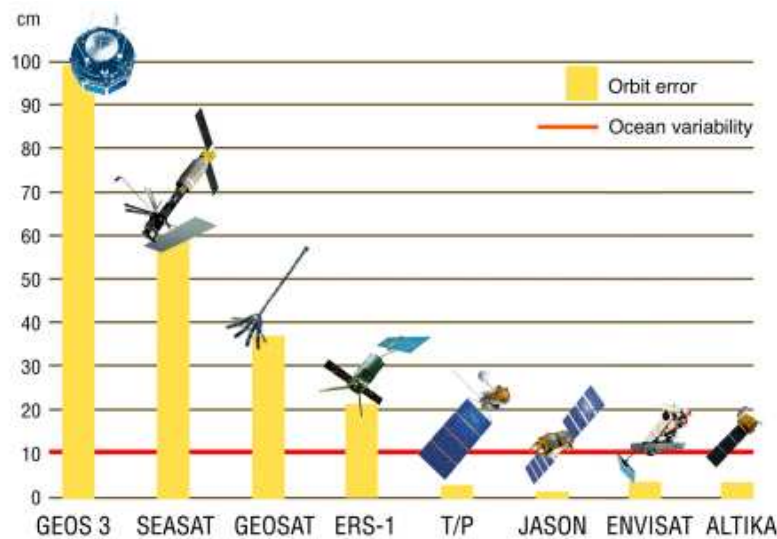


FIG. 1.3: Précision des orbites des principales missions satellitaires d'altimétrie radar nadir.

Mesure au nadir

La mesure de la distance au nadir entre l'antenne de l'altimètre et la surface terrestre s'effectue par la mesure du temps de propagation aller-retour d'une onde radar. Une partie de l'onde radar réfléchiée au niveau de la surface terrestre est reçue et enregistrée par l'altimètre. La forme de cette onde (enregistrée au cours du temps) est conditionnée par la topographie de la surface terrestre et ses caractéristiques de rétrodiffusion (absorption et réflexion).

La figure 1.4 illustre de manière détaillée le processus mis en œuvre pour la mesure du temps de propagation ΔT d'une onde radar de l'antenne de l'altimètre à la surface terrestre.

L'estimation du temps moyen de propagation aller-retour $2.\Delta T$ de l'onde radar est une opération qui peut s'avérer difficile. En effet, comme nous venons de le voir en figure 1.4, la forme de l'écho de l'onde radar enregistrée par l'altimètre est directement conditionnée par les caractéristiques de forme et de rétrodiffusion de la surface éclairée.

Tout l'enjeu de la mesure altimétrique va alors résider dans l'estimation du temps moyen de propagation aller-retour $2.\Delta T$, par analyse de la forme de l'écho radar. D'une manière très générale, on recherche dans cette forme d'onde l'instant t_{2R} correspondant à la mi-hauteur du front de montée de la puissance reçue par l'altimètre (soit d'après les explications données en figure 1.4 juste après t_3 et avant t_4).

La durée $t_{2R} - t_0$ correspondant au temps aller-retour de l'onde radar entre l'altimètre et la surface au nadir, le temps de propagation ΔT de l'onde radar s'écrit :

$$\Delta T = \frac{t_{2R} - t_0}{2}$$

La distance déduite de la durée ΔT est appelée le « range » (cf. § 2.1.2), et noté r :

$$r = \Delta T.c$$

avec : c la célérité de propagation de l'onde (m/s).

Calcul de l'altitude des surfaces d'eau

L'altitude moyenne du plan d'eau observé par un satellite altimètre est égale à la différence entre l'altitude du satellite³ et la valeur du range (déduite du temps moyen aller-retour de l'onde radar). Généralement, la valeur de range doit être corrigée des effets de ralentissement de la vitesse de propagation

³Ou plus précisément l'altitude de l'antenne de l'altimètre dans l'ellipsoïde de référence utilisé par le satellite

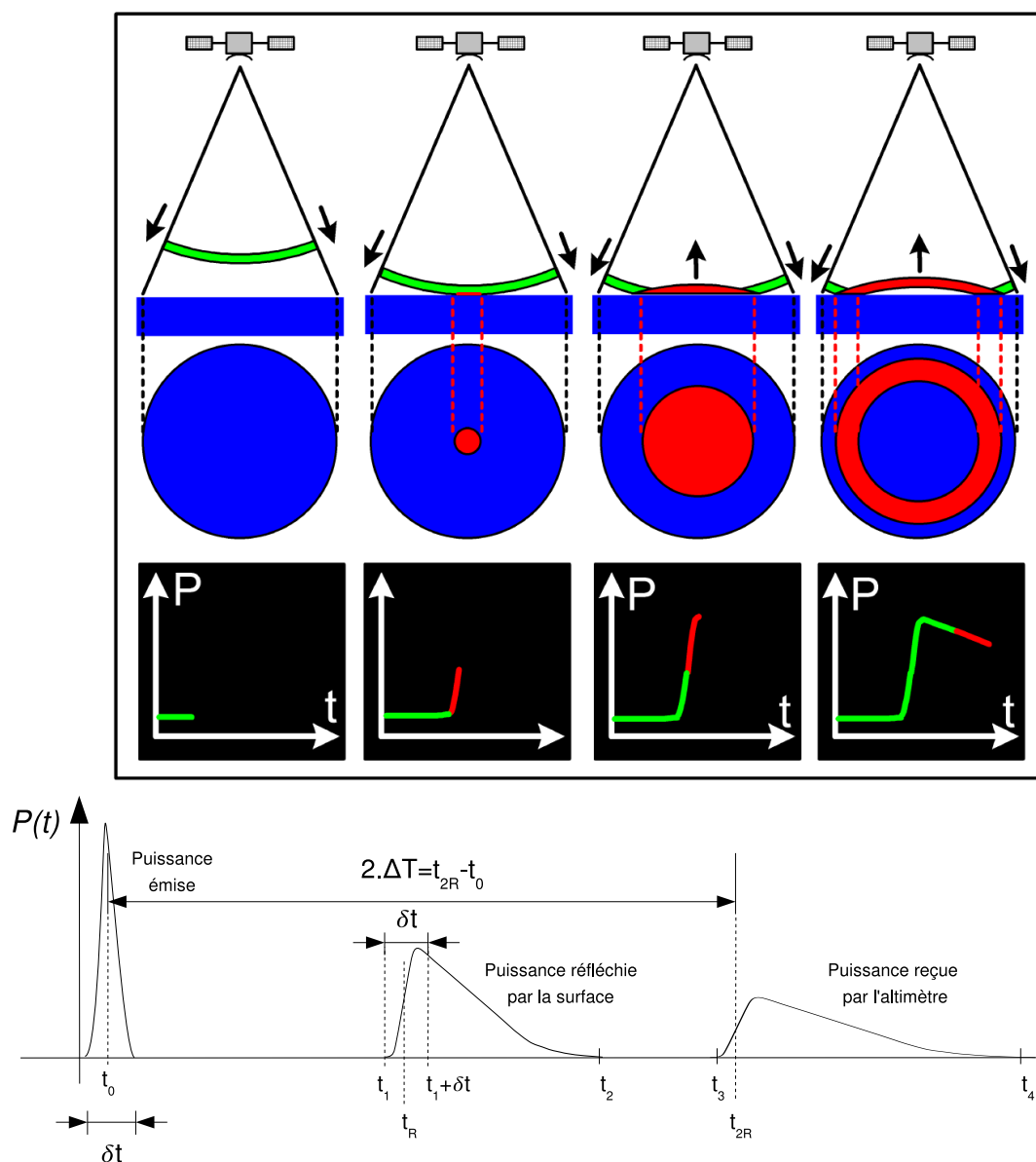


FIG. 1.4: Illustration de la formation au cours du temps de l'onde radar réfléchie par la surface au nadir (en haut, d'après un document CNES) et de l'onde radar reçue par l'altimètre (en bas).

- En haut, de gauche à droite : (1) A l'instant t_0 , l'onde radar est émise par l'altimètre sous la forme d'une impulsion de durée très courte (δt) en direction de la surface terrestre (au nadir). Elle est matérialisée par un faisceau divergent dont le front d'onde est une portion de sphère. (2) A l'instant t_1 , le front d'onde rencontre les premiers éléments de la surface terrestre et l'éclaire d'une tâche circulaire. La puissance P réfléchie vers l'altimètre commence à croître : l'écho de l'onde radar (ou « forme d'onde ») commence à se former. (3) La tâche circulaire croît pendant le laps de temps $[t_1 ; t_1 + \delta t]$, de même que la puissance réfléchie vers l'altimètre. (4) Après l'instant $t_1 + \delta t$, les parties extérieures du front d'onde éclairent la surface terrestre en prenant la forme d'un anneau dont le rayon va augmenter jusqu'à atteindre un diamètre nominal ; La puissance P réfléchie vers l'altimètre décroît jusqu'à l'instant t_2 .

- En bas : L'altimètre reçoit cette puissance réfléchie à partir de t_3 , après un laps de temps lié au trajet retour. La mesure se termine à t_4 (cf. chronogramme ci-dessous). La détermination de $\Delta T = \frac{t_{2R} - t_0}{2}$ permettra d'estimer la distance entre l'altimètre et la surface.

Cet exemple illustre le processus de la mesure altimétrique au nadir sur une surface terrestre plane. Dans le cas des océans ou des eaux continentales, la surface à mesurer présentera des structures non régulières (vagues, relief, etc.). Ceci aura pour effet de complexifier la forme de l'écho radar enregistrée par l'altimètre et donc de rendre plus difficile son interprétation *a posteriori* pour en déduire t_{2R} (avec $t_3 < t_{2R} < t_4$) et ΔT .

de l'onde radar dans les différentes couches de l'atmosphère [Escudier et al., 2001; Mercier et Zanife, 2006]. On obtient alors une mesure altimétrique de l'altitude du plan d'eau, exprimée dans le référentiel altimétrique de l'ellipsoïde de référence du satellite.

Pour ramener les mesures de niveau à un référentiel pertinent d'un point de vue hydrologique, il convient de translater les hauteurs ellipsoïdales en hauteurs orthométriques à l'aide d'un modèle du géoïde terrestre (cf. § 3.6.3).

La figure 1.5 illustre et résume de manière schématique les éléments nécessaires à la construction d'une mesure de l'altitude d'un plan d'eau : l'orbitographie, le positionnement du satellite, la mesure du range et l'expression des mesures altimétriques dans des référentiels ellipsoïdaux ou géodésiques⁴.

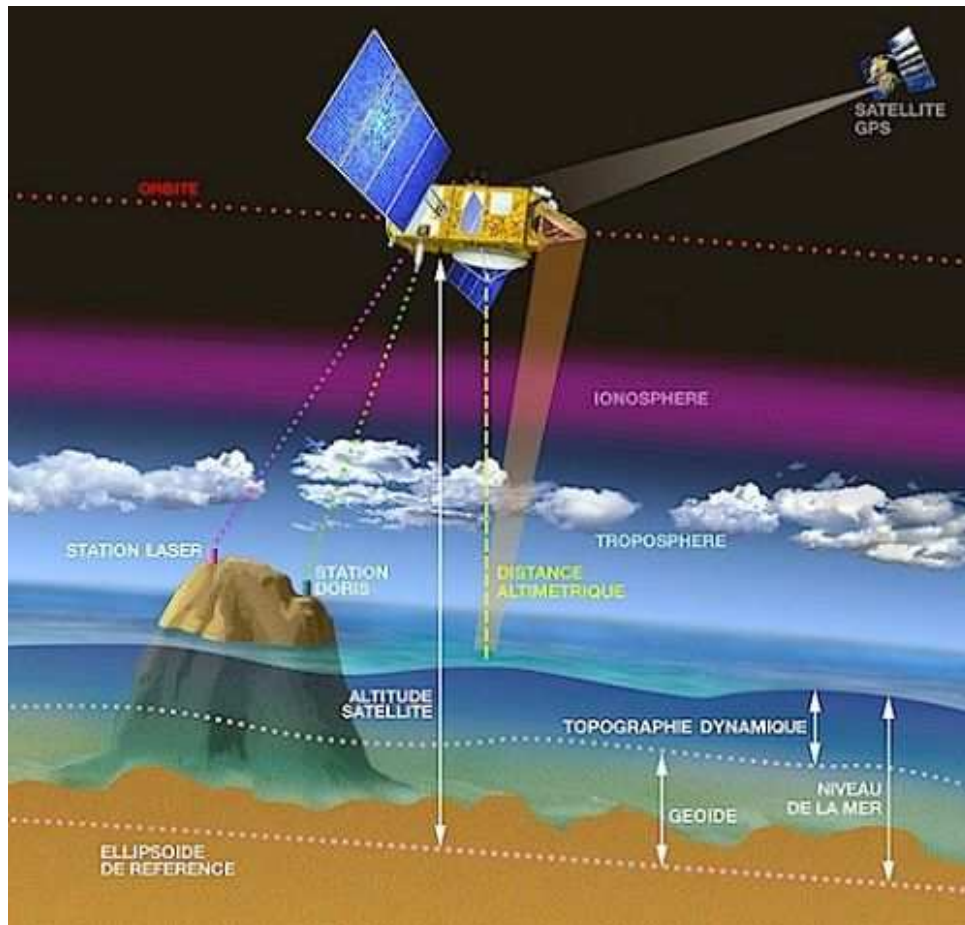


FIG. 1.5: Principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir. Le satellite est localisé dans l'espace avec une très grande précision à l'aide de systèmes de localisation très précis (GPS, DORIS, interférométrie laser). L'onde radar est envoyée au nadir du satellite, l'écho radar ainsi réfléchi à la surface de l'eau est analysé par l'algorithme embarqué dit de "tracking" pour en déduire la distance satellite-plan d'eau. On en déduit la distance du plan d'eau à l'ellipsoïde. Enfin, cette distance peut être traduite en hauteur dans un système géodésique de type géoïdal. (Document CNES)

1.1.3 Un aperçu des missions d'altimétrie radar

Topex/Poseidon (1992-2005)

Topex/Poseidon est né d'un partenariat entre le CNES et la NASA. De 1992 à 2005, il a permis de suivre de manière très précise le niveau moyen des océans, de mesurer la hauteur des vagues, de com-

⁴La construction effective d'une mesure altimétrique directement exploitable fait l'objet d'une présentation plus détaillée au chapitre 3, section 3.6 (page 81).

prendre le rôle des marées et les variations des courants océaniques, de suivre les phénomènes climatiques à l'échelle globale (El Niño/La Niña) ou encore de cartographier les fonds marins.

Lancé en août 1992, Topex/Poseidon embarque deux altimètres : TOPEX ou NRA (NASA Radar Altimeter, [Zieger et al., 1991]) et Poseidon (CNES) qui se partageront le temps de mesure à hauteur de 90% et 10% respectivement, Poseidon étant un altimètre expérimental [Phalippou et al., 2006]. De 1992 à 2002, Topex/Poseidon est placé sur une orbite d'une périodicité de 10 jours (un peu moins en réalité) optimisée pour éviter le sous-échantillonnage des signaux de la marée océanique. Durant les mois d'août et septembre 2002 (et suite au lancement de son successeur Jason-1), Topex/Poseidon est placé sur une orbite à l'intertrace de son orbite d'origine. Topex/Poseidon sera mis hors service et placé sur une orbite « cimetière » aux alentours de novembre 2005 après avoir servi plus de 13 années, soit 8 années de plus que ce qui était prévu lors de son lancement.



FIG. 1.6: Le satellite altimètre Topex/Poseidon. (Document CNES)

Les produits altimétriques issus de la mission Topex/Poseidon (principalement AVISO et PODDAC) ont fait l'objet de nombreuses utilisations dans le cadre de recherches pour le suivi des eaux continentales sur des mers intérieures, des lacs et des grands fleuves du globe (cf. section 1.3).

Enfin, la figure 1.7 illustre la couverture des traces des deux orbites de Topex/Poseidon sur l'Europe occidentale.

Jason-1 (2001 à nos jours)

Le 7 décembre 2001, le satellite Jason-1 est lancé et placé sur la même orbite que son prédécesseur Topex/Poseidon. La mission Jason-1 permet d'assurer la continuité des mesures pour le suivi des océans pour les cinq années à suivre. Il embarque à son bord l'altimètre Poseidon 2 (CNES, cf. figure 1.9), successeur de l'altimètre Poseidon de Topex/Poseidon.

Topex/Poseidon ayant été déplacé, courant 2002, sur une orbite complémentaire à celle de Jason-1, il a été possible pendant trois années d'obtenir des mesures sur les océans avec une densité deux fois plus importante. Cette couverture est illustrée à la figure 1.7.

Malheureusement, les spécificités de Poseidon 2 ne permettent pas d'exploiter ses mesures de manière satisfaisante sur les eaux continentales [Enjolras, 2007].

La figure 1.8 présente une image du satellite Jason-1 et la figure 1.9 présente une photo de l'altimètre Poseidon 2 monté sur la plateforme du satellite.

Jason-2 (2008 à nos jours)

Le 20 juin 2008, le satellite Jason-2 est lancé et placé sur la même orbite que Jason-1, à moins d'une minute à peine l'un de l'autre. Il embarque à son bord l'altimètre Poseidon 3 (CNES), successeur des alti-

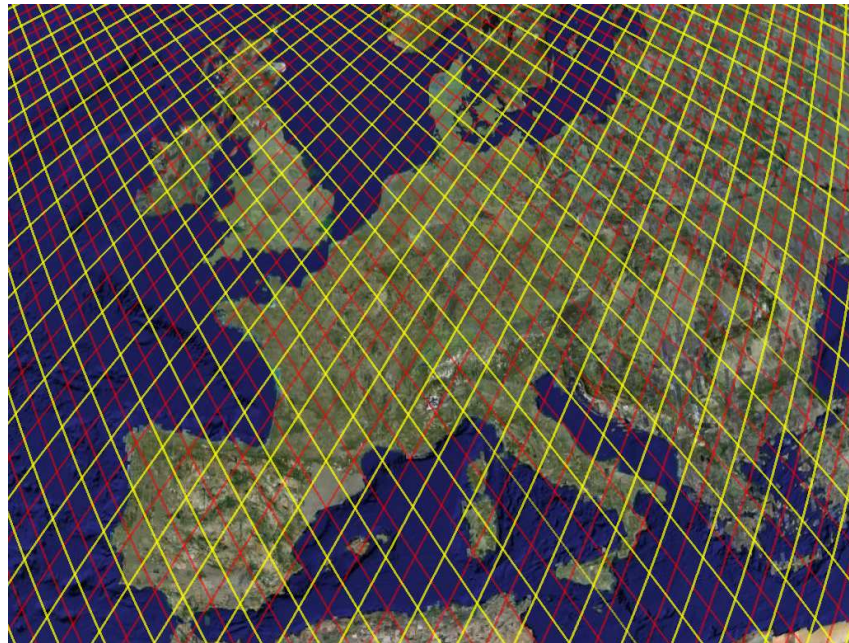


FIG. 1.7: Traces des deux orbites de Topex/Poseidon pour les périodes 1992-2002 (traits jaunes) et 2002-2005 (traits rouges). (Fond d'image GoogleEarth)



FIG. 1.8: Le satellite altimètre Jason-1. (Document CNES)



FIG. 1.9: L'altimètre Poseidon 2 qui équipe Jason-1. (Document CNES)

mètres Poseidon 2 de Jason-1 et Poseidon de Topex/Poseidon. Une fois de plus, Jason-2 permet d'assurer la continuité des mesures pour le suivi des océans pour cinq années supplémentaires.

La figure 1.10 présente une photo du satellite Jason-2 le jour de son lancement, quelques secondes après sa séparation de son lanceur Delta 2.



FIG. 1.10: Le satellite altimètre Jason-2, le 20 juin 2008, quelques secondes après avoir été séparé de son lanceur Delta 2. (Pour un aperçu du satellite Jason-2, voir la figure 1.8 qui illustre son aîné et presque jumeau Jason-1). (Document CNES/NASA)

ERS-1 (1991-1996) et ERS-2 (1995 à nos jours)

Les satellites ERS-1/2 (« European Remote Sensing »), projets de l'ESA (Agence spatiale Européenne), ont pour mission d'observer la Terre, en particulier l'atmosphère et les océans. ERS-1 a été lancé au mois de juillet 1991 et a été en service jusqu'en juin 1996. Il ne consiste pas seulement en une mission altimétrique, il embarque également un radar imageur de type SAR (Synthetic Radar Aperture).

Afin d'observer différents phénomènes, ERS-1 a été placé sur différentes orbites :

- une orbite répétitive à 3 jours pour l'observation des calottes polaires,
- une orbite répétitive à 35 jours (orbite principale d'ERS-1) pour plusieurs applications dont l'observation des océans,
- une orbite répétitive à 168 jours pour les applications géodésiques.

La figure 1.11 présente un schéma du satellite ERS-1 et de ses instruments.

Son successeur a été lancé le 21 avril 1995. Ainsi pendant une période d'une année environ, les deux satellites ERS-1 et ERS-2 ont travaillé en tandem. ERS-2 embarque en plus d'un altimètre et d'un radar SAR, un instrument pour l'étude de l'ozone dans l'atmosphère.

ERS-2 a connu plusieurs pannes importantes en 2000 et 2001 mais il est toujours en service. Son fonctionnement est restreint car il n'est plus en capacité de stocker les mesures qu'il acquiert : il est donc utilisable en « temps-réel », c'est à dire lorsqu'une station de réception terrestre permet de recevoir ses données en direct.

La figure 1.12 présente une illustration du satellite ERS-2.

ENVISAT (2002 à nos jours)

Le satellite ENVISAT (pour « Environmental Satellite »), est le successeur des missions ERS-1 et ERS-2. Il a été conçu pour l'observation de l'environnement et en particulier pour le suivi des chan-

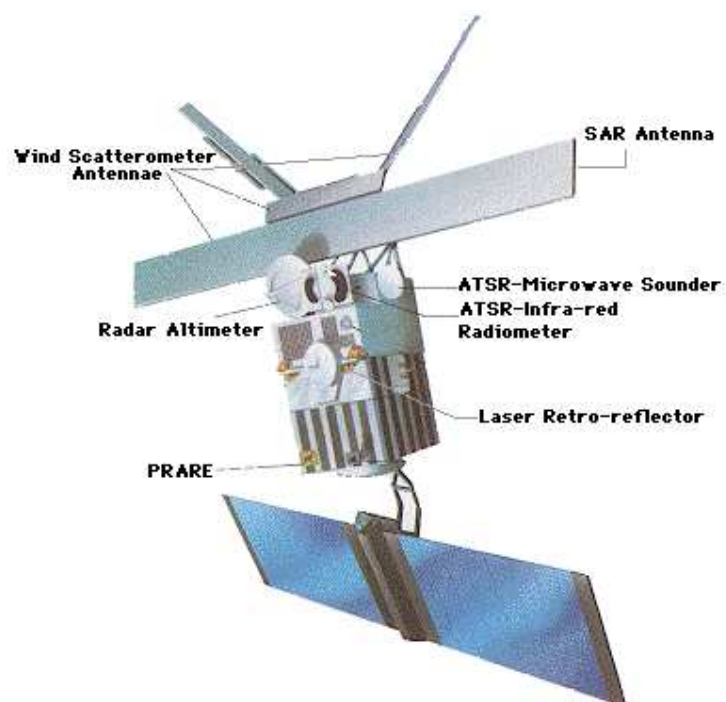


FIG. 1.11: Schéma d'ensemble du satellite ERS-1 et de ses instruments de mesures. (Document ESA)

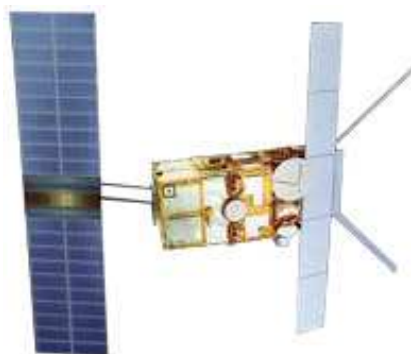


FIG. 1.12: Schéma d'ensemble du satellite ERS-2 et de ses instruments de mesures. (Document ESA)

gements climatiques. ENVISAT suit la même orbite que ERS-1 et ERS-2 avec une périodicité de 35 jours.

Parmi les 12 capteurs embarqués sur ENVISAT on compte un altimètre (RA-2), un imageur (MERIS) et une antenne SAR. La figure 1.13 présente un schéma d'ensemble satellite ENVISAT sur lequel sont indiqués les différents instruments.

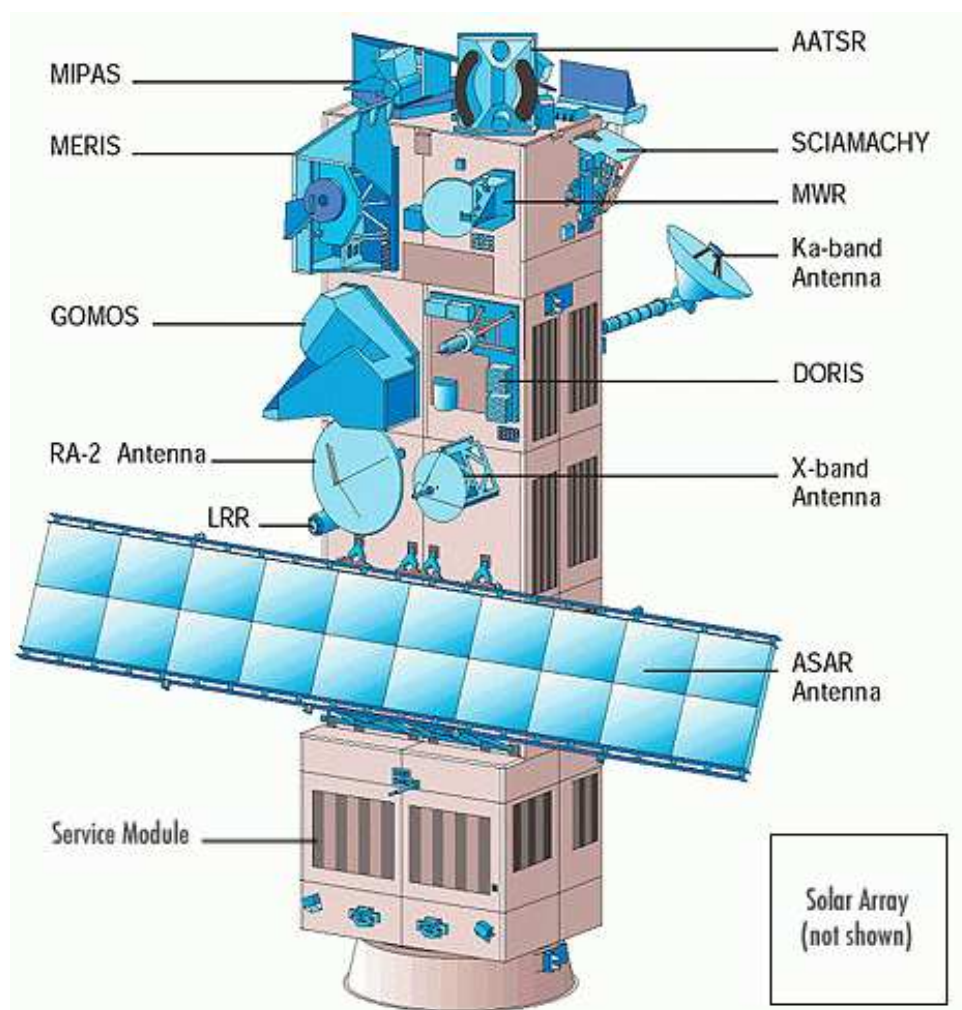


FIG. 1.13: Schéma d'ensemble du satellite ENVISAT et de ses instruments de mesures. (Document ESA)

1.1.4 L'altimétrie satellitaire radar pour l'étude des océans

Depuis plus de quinze ans, les rapides progrès des techniques de l'altimétrie satellitaire radar ont permis de mener des travaux scientifiques d'une grande variété et d'un intérêt capital pour le suivi du cycle de l'eau et la compréhension de phénomènes climatiques à l'échelle globale.

Jusqu'ici, les acquis majeurs de l'altimétrie radar concernent les surfaces océaniques. Cette technologie a permis de quantifier la distribution spatiale du niveau des océans [Marsh et al., 1986; Mercier et al., 2002] ainsi que son évolution temporelle [Cabanes et al., 2001].

Nous présentons dans cette section quelques applications de l'altimétrie satellitaire radar à l'observation et l'étude des océans⁵.

⁵Nous ne visons pas ici un paysage exhaustif des travaux réalisés mais une illustration de quelques avancées représentatives dans le domaine.

Anomalies topographiques

Le satellite Topex/Poseidon a largement contribué à l'étude des océans grâce au nombre colossal de données qu'il a pu fournir (plus de 4.10^9 mesures acquises en treize années de service). Topex/Poseidon a notamment permis d'observer les phénomènes El Niño et La Niña (1997-1998) considérés comme les plus importantes anomalies jamais observées sur les océans [Cazenave et Nerem, 2002; Cox et Chao, 2002]. Les cartes d'anomalies de la hauteur des océans présentées en figure 1.14 illustrent clairement ces phénomènes.

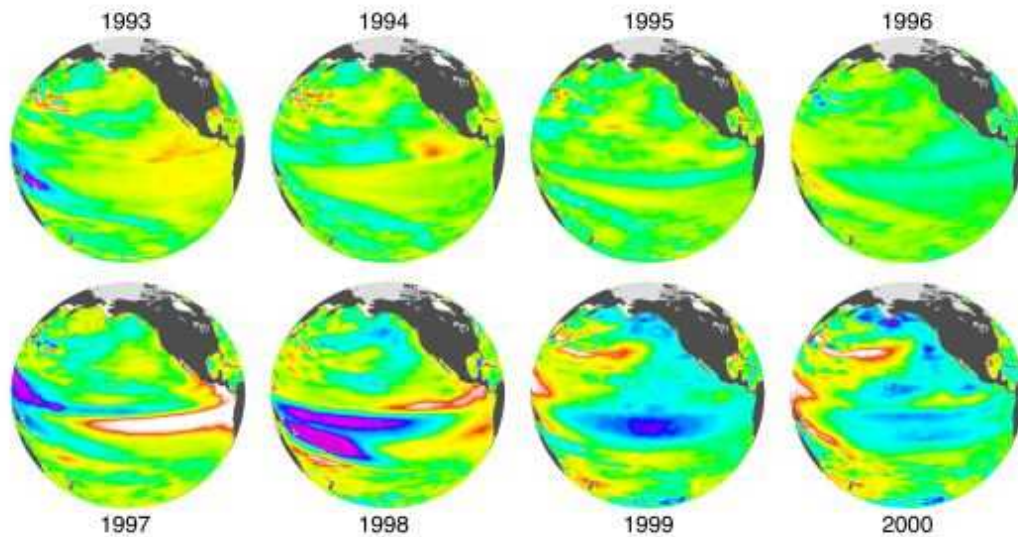


FIG. 1.14: Moyennes annuelles de la topographie de l'océan Pacifique, dérivée des mesures de Topex/Poseidon (période 1993-2000), représentées en anomalie par rapport à la moyenne inter-annuelle. Les hauts niveaux liés à l'expansion océanique (en blanc) générés par l'épisode El Niño de 1997 dans la partie orientale du Pacifique équatorial sont remplacés en 1998-1999 par les anomalies négatives (en bleu) liées à La Niña. (Crédit JPL/NASA)

Niveau moyen des océans

La montée du niveau global des océans est une des conséquences importantes du changement climatique. Ce phénomène a pu être observé et étudié de manière continue grâce aux données fournies par les missions Topex/Poseidon (1992-2005) et Jason-1 (2001 à nos jours). Le bilan de ces études [Cazenave et al., 1998; Cazenave, 1999; Fu et Cazenave, 2001; Lombard et al., 2005; Nerem et al., 2006] indique une montée moyenne du niveau des océans de l'ordre de 3mm/an. La figure 1.15 présente la carte des variations du niveau moyen annuel du niveau des océans du globe en 15 ans, entre octobre 1992 et avril 2007. On peut y observer majoritairement un phénomène de montée des eaux, mais aussi quelques zones de diminution du niveau moyen.

Les derniers travaux publiés [Cazenave et al., 2008] confirment l'accélération de la montée des eaux observée dans le début des années 1990. Pour la période 1993-2003, la montée des eaux serait due à part égales (1) à la dilatation des océans (par réchauffement) et (2) à la fonte des glaces et l'écoulement des eaux de surface. Pour la période 2003-2008, le niveau des océans a continué de monter alors que la dilatation par réchauffement a significativement diminué. C'est donc l'augmentation de la contribution des glaces et eaux de surfaces qui explique la continuité de cette expansion.

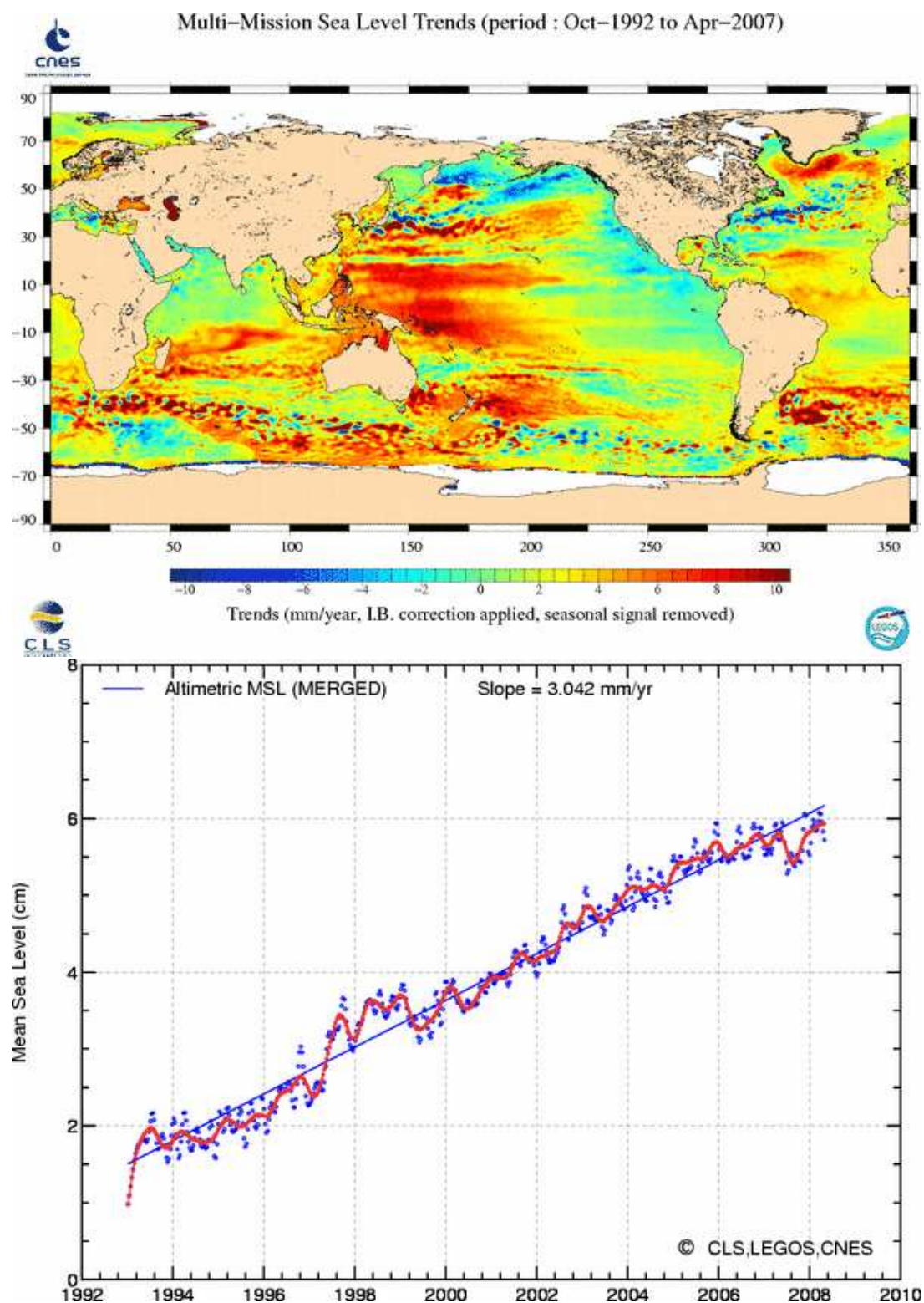


FIG. 1.15: Niveau moyen global des océans observé depuis octobre 1992 d'après les données fusionnées issues de plusieurs satellites altimètres. (Crédits CLS/LEGOS)

Topographie dynamique

Le couplage des données mesurées par Topex/Poseidon, par le satellite CHAMP⁶ et des mesures issues de bouées hydrologiques a permis d'observer les variations topographiques des océans (topographie dynamique) et d'en dériver des cartes de vitesse des courants marins de surface dont l'interaction avec le climat global est importante du fait de leur rôle de convecteur de l'énergie thermique [LeGrand et al., 1998, 2003; Rio et Hernandez, 2004] (voir figure 1.16).

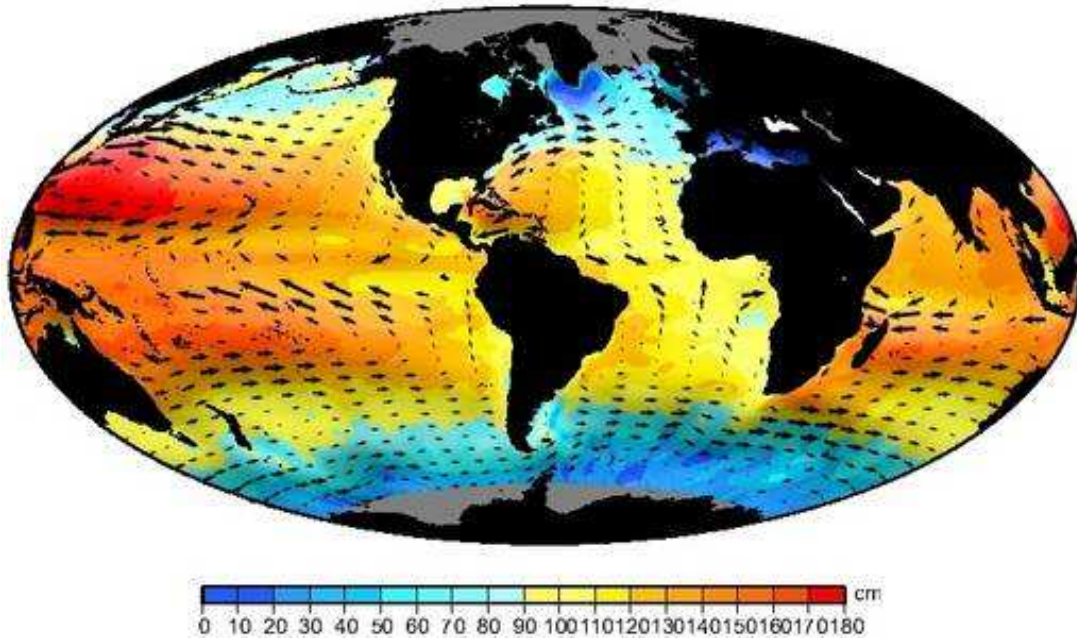


FIG. 1.16: Carte de la topographie dynamique des océans (fond coloré) et des courants marins de surface (flèches noires). (Crédit CLS)

1.1.5 Altimétrie radar et hydrologie continentale

Les différentes missions d'altimétrie radar, initialement destinées (pour la plupart) à l'observation des océans, ont vite montré un potentiel prometteur pour l'observation des eaux continentales. Ce potentiel s'est notamment révélé en raison des caractéristiques de couverture spatiale (quasi-globale) et de périodicité temporelle⁷ proposées par les différentes missions altimétriques, qui s'avèrent adaptées à l'observation des terres émergées. Du fait de sa couverture et de son haut taux de disponibilité, l'altimétrie radar constitue une importante source de données pour le suivi des eaux continentales, susceptible d'apporter une connaissance inédite (ou jusqu'alors difficilement accessible), et complémentaire des données in-situ, sur un grand nombre de cibles hydrologiques⁸.

Les applications de cette technique se sont déclinées, au fil des recherches, à différentes échelles géographiques et ont permis l'étude de mers intérieures [Aladin et al., 2005], de lacs [Birkett, 2000; Crétaux et Birkett, 2006] puis de grands fleuves du globe [Mercier, 2001; De Oliveira Campos et al., 2001; Maheu et Cazenave, 2003; Kosuth et al., 2006].

Parmi les domaines d'application les plus importants, nous pouvons citer le suivi à grande échelle du cycle continental de l'eau, le suivi temporel des régimes hydrologiques sur les bassins fluviaux, l'analyse

⁶Le satellite gravimétrique CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload), fruit d'une collaboration entre le DLR (Centre Aérospatial Allemand), le CNES et le JPL et développé par Astrium, est une mission géo-scientifique qui a pour objectif l'étude des champs gravitationnel et magnétique terrestres. Il a été lancé en mai 2000.

⁷Selon l'orbite adoptée, la couverture spatiale est plus ou moins dense avec une distance inter-trace à l'équateur de 79 à 315km, et une périodicité temporelle, inversement proportionnelle, de 35 à 10 jours.

⁸Cibles pour lesquelles l'acquisition de mesures par voie terrestre peut s'avérer difficile (inaccessibilité, manque d'équipement de mesure, conflit civil, etc.).

de phénomènes hydrauliques (pentes, propagation de crues, etc.), l'estimation du débit des cours d'eau (cf. rétrospective [Calmant et Seyler, 2006]) et l'appui à la modélisation hydrodynamique.

Nous présentons dans cette section les principaux travaux en la matière avant d'aborder de façon plus détaillée dans la section suivante les aspects liés à la caractérisation de la qualité des mesures altimétriques sur les eaux continentales.

Pour de plus amples détails sur l'altimétrie satellitaire en général et ses applications en hydrologie, le lecteur pourra en particulier se reporter à la thèse de Franck Mercier [Mercier, 2001] qui constitue une excellente synthèse en la matière.

Les mers intérieures et les grands lacs

Les conditions d'acquisition des mesures altimétriques sur les lacs et les mers intérieures sont similaires aux conditions océaniques, pour peu que la section survolée du plan d'eau soit de longueur suffisante⁹.

Les premiers travaux exploitant les mesures altimétriques sur des lacs ont porté sur les grands lacs du nord américain particulièrement bien équipés en stations de mesures limnimétriques et où la comparaison entre mesures altimétriques et mesures in-situ est possible. Plusieurs missions altimétriques ont fait l'objet de publications sur ces lacs avec les données des satellites SeaSAT [Brooks2002, 1982], GeoSAT [Morris et Gill, 1994b] et Topex/Poseidon [Morris et Gill, 1994a]. Ces premiers travaux ont eu une vocation démonstrative du potentiel de l'altimétrie radar sur les continents.

Au fil des investigations, les données altimétriques ont été utilisées de manière plus applicative et ont permis de repérer [Birkett et Mason, 1995] puis de suivre les variations des niveaux de nombreux lacs [Birkett, 1995]. Notons que certaines études signalent la possibilité d'imprécisions notoires dans les modèles de géoïde utilisés pour restituer les mesures altimétriques en hauteurs orthométriques [Cheng et al., 2008].

Enfin, un certain nombre d'études à finalité hydrologique se sont penchées sur les lacs et les mers intérieures dont les ressources en eaux s'affaiblissent de manière inquiétante. C'est par exemple le cas du lac Tchad [Birkett, 2000; Crétaux et al., 2005; Aladin et al., 2005] et de la mer d'Aral [Crétaux et Birkett, 2006] dont l'assèchement accéléré semble être lié aux pressions exercées par les activités humaines et/ou aux effets du changement climatique.

Les grands cours d'eau

L'exploitation des données issues de l'altimétrie radar sur les lacs a montré que les altimètres avaient les capacités, sous certaines conditions, d'acquérir de la mesure sur les eaux continentales. Les investigations menées sur les grands cours d'eau du globe présentent un double intérêt :

- elles permettent de caractériser le potentiel de l'altimétrie radar sous différentes conditions hydrologiques et morphologiques (largeur de fleuve, dénivelé par rapport au relief environnant),
- elles apportent une connaissance originale sur ces grands fleuves.

Dans ce cadre général, le bassin amazonien, ses fleuves et ses zones d'inondation, ont été l'objet d'une attention toute particulière, ceci pour au moins trois raisons : (1) le bassin amazonien constitue la plus importante réserve en eau douce du globe et sa biomasse est d'un intérêt capital pour l'équilibre de l'éco-système de la planète ; (2) les fleuves du bassin amazonien sont de dimensions (largeurs) propices à la validation des mesures altimétriques sur une grande diversité de cibles ; (3) le bassin amazonien est équipé d'un réseau de stations limnimétriques suffisamment dense pour permettre la comparaison directe, sur un nombre plus ou moins important (dépendant de la couverture satellitaire) de sites, entre les

⁹Une largeur permettant l'acquisition de quelques mesures consécutives, sans élément perturbateur dans l'empreinte terrestre des échos radar, semble suffisante. Il est parfois fait référence dans la littérature à une largeur supérieure à 500m [Crétaux et Birkett, 2006], mais cette largeur nous apparaît très notablement insuffisante : [Birkett et al., 2002] préconise 1s, soit 5, 8km par exemple pour Topex/Poseidon. Le chapitre 8 de cette thèse aborde l'évaluation de l'impact de la largeur des cours d'eau du bassin amazonien sur la qualité moyenne des mesures altimétriques.

mesures altimétriques et in-situ, les données produites par l'ANA (Agência Nacional de Águas, Brésil, <http://www.ana.gov.br>) sont en accès libre.

De nombreuses études ont mis à contribution les apports des mesures altimétriques pour le suivi du niveau des cours d'eau sur le bassin amazonien : [Koblinsky et al., 1993] avec GeoSAT et [Birkett, 1998; De Oliveira Campos et al., 2001; Birkett et al., 2002] avec Topex/Poseidon ont ainsi exploré de manière approfondie la pertinence des mesures altimétriques sur quelques grands fleuves en prenant en compte, en plus de la précision des mesures altimétriques, (1) les résultats de l'échantillonnage temporel du signal hydrologique et (2) la précision des mesures in-situ auxquelles on attribue la « vérité de terrain ». Ces travaux abordent également le problème des formes d'ondes de caractéristiques très variables selon les sites d'acquisition considérés (ou même les dates) et les difficultés inhérentes à leur traitement.

Les travaux de [Kosuth et al., 2006] ont permis, à partir des mesures de Topex/Poseidon, de combler un certain nombre de lacunes de nivellement topographique des stations limnimétriques du bassin amazonien (voir aussi la section 6.2.1.3, page 133). Ces valeurs de nivellement permettent de placer dans un même référentiel géoïdal les stations limnimétriques et d'utiliser de concert les mesures in-situ acquises en divers endroits du bassin, permettant par exemple de déterminer les pentes de l'Amazonie et de ces principaux affluents. Ce travail fait l'objet d'un article à paraître [Kosuth et al., 2008], mettant à profit certains aspects de la méthode de quantification de la qualité des mesures altimétriques développée dans le cadre de cette thèse.

Dans le cadre du suivi de bassins versants peu équipés en appareillage de mesure (hauteurs, débit) et non nivelés, les travaux de [Leon et al., 2006b] appliqués au bassin du fleuve Caqueta (Colombie), font la démonstration de l'utilité des mesures altimétriques (Topex/Poseidon et ENVISAT). Dans cet exemple, les mesures altimétriques sont couplées à des modèles d'écoulement et des mesures in-situ afin d'estimer des variables hydrauliques telles que les débits, les pentes d'écoulement et les niveaux des eaux en période d'étiage. Des travaux similaires ont été menés sur le Rio Negro [Leon et al., 2006a; Seyler et Calmant, 2006].

D'autres études ont été consacrées à l'exploitation des mesures altimétriques sur les fleuves, avec comme objectif central :

- la calibration de modèles d'estimation des débits sur quelques grands fleuves (Negro, Solimoes et Amazone) [Coe et al., 2002] et leur utilisation pour l'estimation ultérieure des débits à partir des « nouvelles » mesures altimétriques [Zakharova et al., 2006],
- l'étude des échanges de sédiments entre l'Amazonie et les plaines d'inondation [Bourgoin et al., 2007], exploitant le nivellement altimétrique de stations limnimétriques du bassin amazonien à partir des données des satellites Topex/Poseidon, ENVISAT et ICESat [Bonnet et al., 2008],
- l'estimation du volume d'eau stocké dans les plaines d'inondation du bassin du fleuve Negro [Frappart et al., 2005],
- l'exploitation de multiples missions altimétriques (missions ERS-1/2 et ENVISAT) et de techniques de retracking pour le suivi du niveau de lacs et de fleuves [Berry et al., 2005].

De nombreux autres travaux ont abordé des sujets similaires dans le cas d'autres bassins fluviaux. C'est le cas par exemple de [Coe et Birkett, 2005] sur le bassin du lac Tchad, de [Kouraev et al., 2004] sur le fleuve Ob (Russie) ou encore de [Dominh et al., 2004] sur le bassin du Mékong.

Les bases de données existantes (ou « produits alti-hydrologiques »)

Ces dernières années, plusieurs groupes ont travaillé à l'élaboration de bases de données de produits issus de l'altimétrie radar (ou « produits alti-hydrologiques¹⁰ ») dédiés au suivi de lacs et de cours d'eau.

¹⁰Nous nommons dans cette thèse « produit alti-hydrologique » un produit dérivé de données altimétriques et constitué de séries temporelles de mesures de niveau des eaux d'entités hydrologiques (cours d'eau, lacs, zones d'inondations). Voir les définitions détaillées au § 2.1.2 (page 49 et le chapitre 3 consacré à la génération des séries temporelles alti-hydrologiques).

Parmi les projets existants, nous pouvons citer les projets CASH (Contribution de l'Altimétrie Spatiale à l'Hydrologie, [Seyler et al., 2006]), « River & Lake » [Garlick et al., 2005] [RLH, 2006], HydroWeb [Morrow et al., 2006; Cauhopé et al., 2006] et « Global Reservoir and Lake Monitor » [Birkett et Mason, 1995] qui proposent des produits alti-hydrologiques issus des missions Topex/Poseidon, ERS-2 et ENVISAT principalement¹¹. La plupart de ces bases de données sont accessibles gratuitement via internet, par abonnement ou dans le cadre de collaborations. Elles illustrent la mobilisation des communautés scientifiques du domaine du spatial et du domaine de l'hydrologie pour valoriser au mieux le potentiel de l'altimétrie radar.

D'une manière générale, ces produits consistent en un ensemble de séries temporelles de niveaux (ou « séries temporelles alti-hydrologiques ») sur des sites hydrologiques prédéfinis (cours d'eau, lacs ou zones d'inondations) construites à partir de mesures altimétriques. Pour ce faire, diverses optimisations et/ou simplifications sont apportées aux séries temporelles de niveaux :

- (1) les mesures altimétriques sont sélectionnées et/ou moyennées sur des fenêtres géographiques pour fournir une mesure « équivalente » par passage du satellite, sur la surface en eau,
- (2) certains groupes se sont intéressés au retraitement (retracking) des formes d'onde radar, disponibles dans des produits altimétriques « officiels » de bas niveau, et ont mis en œuvre des algorithmiques (nouvelles ou existantes) dans le but d'améliorer la précision des séries temporelles de niveau et/ou leur période d'échantillonnage effective. Cela est par exemple le cas des projets CASH (formes d'ondes de Topex/Poseidon retraitées avec la chaîne de traitement de l'altimètre d'ENVISAT) [Mercier et Zanife, 2006] et River & Lake (formes d'ondes de ERS-1/2 et ENVISAT retraitées à l'aide d'un système expert) [Berry et al., 2005].

1.2 Difficultés inhérentes à la mesure altimétrique radar sur les eaux continentales

Les difficultés inhérentes à la mesure altimétrique radar sur les eaux continentales sont nombreuses. Ceci est fortement lié à la nature des instruments altimètres, développés spécifiquement pour le suivi des océans.

1.2.1 Physique de la mesure et difficultés sur les eaux continentales

Suivi de la surface (tracking)

Un système de « tracking » permet à l'altimètre d'estimer, à partir des valeurs de range précédemment mesurées, dans quelle gamme de distances (ou de manière équivalente d'instant) devrait se trouver la mesure de range à venir. Plus précisément, ce système permet de positionner une fenêtre d'observation temporelle sur la forme d'onde attendue. La forme d'onde ainsi mesurée est échantillonnée dans le temps à une cadence très élevée (période d'échantillonnage de l'ordre de la nanoseconde) sur un certain nombre d'échantillons (ou « portes distance »).

Dans le cas de variations inattendues du relief observé, ce système peut se retrouver temporairement incapable d'estimer la gamme de distances dans laquelle devraient se trouver les mesures de range à venir. Ce phénomène est appelé le « décrochage ».

Selon les missions altimétriques, ce système est plus ou moins sophistiqué. Par exemple, pour la mission Topex/Poseidon, il consiste à positionner le front de montée des formes d'ondes sur la 32ème porte distance (ou échantillon) de la fenêtre d'observation. En cas de décrochage, le système est réinitialisé et la procédure peut prendre entre 1 et 3 secondes [Chelton et al., 2001] : ceci revient à perdre entre 10 et 30 mesures à 10Hz sur une distance de 5 à 15km environ le long de la trace.

¹¹ **Nota :** Nous pouvons également noter l'existence du projet « ALTICORE » dédié à la production de produits altimétriques optimisés pour les zones côtières [Lebedev et al., 2008].

Le système de tracking de la mission ENVISAT est adaptatif et permet, en cas de décrochage, de dégrader temporairement et de manière adaptative le pas temporel d'échantillonnage de la forme d'onde mesurée (ce qui revient à un élargissement la fenêtre temporelle). Ainsi le système est capable de retrouver plus facilement la trace de la surface à mesurer et donc de converger plus rapidement vers l'état d'accroche. Les coefficients d'élargissement de la fenêtre d'observation est de 4 pour les missions ERS-1/2, et de 4 ou 16 pour ENVISAT.

Il existe d'autres sources d'erreur liées au système de tracking comme par exemple le moyennage opéré par le tracker de Topex/Poseidon sur les formes d'onde à haute-fréquence, qui résulte, lorsque le relief est très varié, en une forme d'onde moyenne « floue ».

Surface en eau vs surfaces émergées

Les conditions de mesure sur les surfaces continentales sont très différentes des conditions de mesures océaniques. La taux de surface en eau dans la cible observée par l'altimètre joue un rôle important et va conditionner la qualité des mesures.

Il a été montré que la technique de mesure altimétrique sur les lacs donne de très bon résultats [Crétaux et Birkett, 2006] ; les conditions y sont proches de celles de l'océan : surface en eau uniquement et pour une distance (longitudinale à la trace) suffisante pour s'affranchir des effets du relief sur le système de tracking (« décrochage »). Dans le cas des cours d'eau, ces conditions se dégradent : la surface en eau n'y représente généralement qu'une partie de la surface éclairée par les échos radar. Ceci peut mener l'altimètre à effectuer des mesures erronées par l'introduction de bruit dans les formes d'onde lié à la présence de terres émergées.

La figure 1.17 illustre ces propos en représentant sur une station virtuelle (TP-178A-Madeira, à l'intersection entre la trace 178 de Topex/Poseidon et le fleuve Madeira), les contours des surfaces illuminées par l'onde radar. On peut y apprécier le taux de surface en eau dans l'empreinte des échos radars successifs.

Analyse des formes d'onde radar (retracking)

La présence de terres émergées dans les surfaces éclairées par les pulses radars vont perturber le signal retour enregistré par l'altimètre. Ces éléments de surface présentent des caractéristiques morphologiques et de rétrodiffusion bien différentes de celles des surfaces océaniques. Il en résulte des formes d'onde de morphologies très variables et difficilement interprétables car la complexité des configurations rencontrées fait qu'aucun modèle de retracking n'est *a priori* adapté à ce type de surfaces.

La figure 1.18, qui reprend la figure 1.4 (cf. page 23), donne une illustration de la formation d'une forme d'onde pour les surfaces continentales.

Divers travaux récents ou à venir envisagent la classification préalable des formes d'ondes mesurées sur les continents de manière à les analyser à l'aide du modèle de forme d'onde le plus adapté possible. Pour exemple, l'équipe E.A.P.R.S. de De Montfort University met en œuvre un système expert (de classification) permettant de déterminer parmi 11 modèles, le modèle le plus adapté à une forme d'onde donnée [Berry et al., 1997].

D'autres travaux, menés par Vivien Enjolras et Ernesto Rodriguez [Enjolras et Rodriguez, 2006], se sont intéressés à la modélisation des formes d'onde sur les surfaces continentales, à partir de données externes de télédétection (masque terre/eau issus d'images satellite, MNT SRTM, etc.) et des caractéristiques instrumentales des altimètres, à l'aide de modèles physiques (par opposition aux modèles paramétriques empiriques).

Ces modèles physiques permettent l'estimation de multiples formes d'onde sur une scène simulée pour différentes valeurs de paramètres des cours d'eau tels que la largeur et le niveau du plan d'eau. Les formes d'ondes simulées sont ensuite rapprochées des formes d'ondes mesurées par un satellite altimètre pour en déduire la configuration observée la plus réaliste.

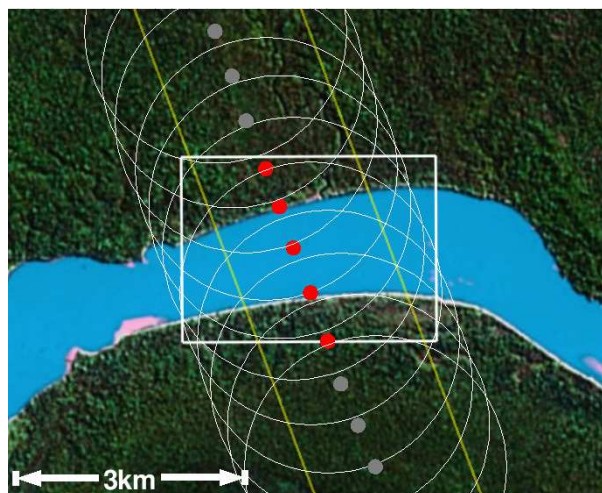


FIG. 1.17: Illustration, à la station virtuelle « TP-178A-Madeira » (à l'intersection entre la trace 178 de Topex/Poseidon et le fleuve Madeira), des surfaces éclairées par les pulses radar successifs (cercles blancs), ainsi que leurs centres respectifs (points gris hors de la station virtuelle, et point rouges sur la station virtuelle). Les traits jaunes déterminent les limites Est et Ouest de la trace de Topex/Poseidon.

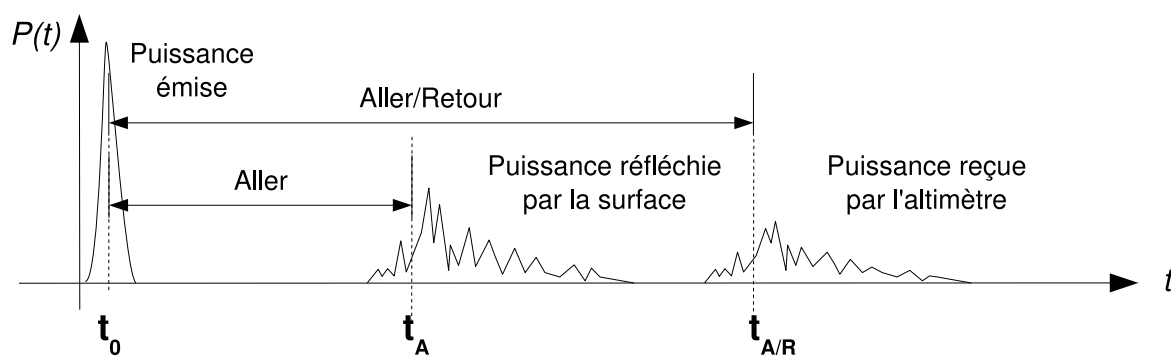


FIG. 1.18: Illustration de la formation au cours du temps de l'onde radar réfléchi par une surface continentale. La présence de surfaces émergées dans l'empreinte radar va perturber la forme de l'onde réfléchi, puis enregistrée par l'altimètre. Ces éléments de surfaces émergées, généralement plus haut que le plan d'eau que l'on cherche à observer, vont marquer l'onde retour par la présence de nombreux pics parasites. Ils reflètent les différentes gammes de hauteurs et de rétrodiffusions présentes dans la scène : végétation haute, basse, banc de sable, cultures, constructions, etc.

Ces travaux permettent d'obtenir de très bons résultats mais nécessitent un nombre important de données auxiliaires qui ne sont pas disponibles de manière systématique sur l'ensemble des terres émergées du globe.

1.2.2 Corrections des mesures altimétriques

Diverses sources d'erreur entrent en jeu lors de l'évaluation du range. Pour corriger ces erreurs, un ensemble de corrections sont proposées dans les produits altimétriques.

Corrections instrumentales

Les corrections instrumentales sont principalement destinées à corriger des imperfections intrinsèques aux instruments. Dans la plupart des produits altimétriques, ces corrections sont déjà appliquées aux valeurs de range mais elles sont cependant fournies.

Corrections atmosphériques

Les corrections atmosphériques sont un ensemble de corrections permettant de corriger les effets de ralentissement des ondes radar dans les différentes couches de l'atmosphère.

Correction liée à la ionosphère : Le ralentissement des ondes radar dans la ionosphère est provoquée par la présence d'électrons libres dans l'atmosphère libérés par ionisation d'atomes sous l'effet du rayonnement solaire, il dépend également de la fréquence de l'onde radar utilisée.

L'erreur introduite sur la mesure du range est de 20cm au maximum, elle peut être mesurée par un altimètre bi-fréquence (c'est le cas de TOPEX) ou à l'aide du système DORIS.

Corrections liées à la troposphère sèche : La présence de gaz tels que le diazote ou le dioxygène dans les basses couches de l'atmosphère a pour effet la modification de l'indice de réfraction atmosphérique. Cette correction ne peut pas être mesurée par les instruments embarqués par les satellites, elle est estimée à partir des modèles météo tels que le modèle de l'ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecast) employé pour les missions Topex/Poseidon, ERS-1/2 et ENVISAT.

Cette correction présente une composante systématique de 2,3m à laquelle s'ajoute une composante variable d'une amplitude relativement faible de 2 à 5cm.

Corrections liées à la troposphère humide : Dans le cas des satellites d'océanographie, un radiomètre embarqué permet de mesurer en permanence la teneur en vapeur d'eau et en eau liquide de l'atmosphère afin d'en déduire la correction liée à la troposphère humide. Cependant, ces radiomètres sont généralement mis en échec sur les continents [Mercier et Zanife, 2006] et les corrections ne peuvent pas être calculées. De manière générale, il en résulte dans les produits altimétriques un très faible taux de disponibilité de cette correction pour les mesures altimétriques sur les eaux continentales. Pour remédier à ce problème, des travaux ont été menés pour estimer cette correction à partir de modèles météo [Mercier et Zanife, 2006].

Cette correction est composée d'une composante systématique d'environ 0,5m et d'une composante variable de 0,2m d'amplitude.

Pour plus de détails sur ces corrections, voir la thèse de Franck Mercier ([Mercier, 2001], p. 51-55) et [Chelton et al., 2001].

1.3 Caractérisation de la qualité des mesures altimétriques sur les eaux continentales

La section § 1.1.5 a introduit de manière synthétique les grands champs d'application de l'altimétrie radar en hydrologie continentale, et a dressé une liste (non-exhaustive) des bases de données existantes qui délivrent des produits optimisés, les produits alti-hydrologiques, pour les applications hydrologiques.

Ces efforts constituent une première étape vers la généralisation de l'utilisation des produits alti-hydrologiques dans les études en hydrologie. Cependant, ces produits alti-hydrologiques souffrent des lacunes suivantes :

- (1) Les produits alti-hydrologiques ne sont pas accompagnés d'une information sur l'incertitude des mesures altimétriques qu'ils contiennent¹².
- (2) Les produits alti-hydrologiques ne sont pas accompagnés d'une information sur la période d'échantillonnage effective des mesures altimétriques qu'ils contiennent.
- (3) Les méthodes de génération de ces produits alti-hydrologiques ne sont pas ou peu décrites dans les publications et on ne connaît que très imparfaitement leur mode de génération (par exemple filtrage automatisée, semi-automatisée ou manuel).

Deux remarques peuvent être ajoutées :

1. les mesures altimétriques du projet CASH sont fournies avec un champ « qualité » mais la nature de cette information n'est pas précisée,
2. le site internet¹³ du projet « Global Reservoir and Lake Monitor » annonce des précisions centimétriques (5 ~ 10cm) sur les grands lacs du nord américain (cf. figure 1.19), ces valeurs semblent issues de travaux de Charon Birkett [Birkett et Mason, 1995; Birkett, 1998].

L'absence d'indicateurs sur l'incertitude des mesures et sur la période d'échantillonnage effective des séries temporelles alti-hydrologiques fournies dans ces produits constitue un frein à leur utilisation : il n'est pas envisageable pour nombre d'hydrologues d'utiliser des mesures dont on ne connaît pas les caractéristiques.

La connaissance de la qualité des produits alti-hydrologiques est une condition indispensable pour l'exploitation effective de l'altimétrie satellitaire radar dans le cadre de l'étude des eaux de surface en général et d'applications hydrologiques en particulier.

La présente section présente un paysage des travaux menés sur la précision¹⁴ des mesures de niveaux des eaux issues de l'altimétrie satellitaire radar. Nous donnerons tout d'abord un aperçu des différentes techniques de quantification de la précision absolue des mesures altimétriques sur les eaux continentales (§ 1.3.1) puis dans un second temps, nous aborderons les aspects liés à la technique des algorithmes de retracking (§ 1.3.2).

1.3.1 Méthodes d'évaluation de la précision des mesures altimétriques

Budget d'erreur des mesures altimétriques

Les altimètres qui équipent les satellites font l'objet avant leur mise en service (1) d'une estimation du bilan d'erreur des mesures et (2) de divers tests de bon fonctionnement et d'estimation du bilan d'erreur

¹²Certains produits alti-hydrologiques (HydroWeb et CASH) intègrent des valeurs de dispersion des mesures altimétriques, collectées lors de chaque passage du satellite au dessus du plan d'eau. Ces valeurs de dispersion n'informent pas sur l'incertitude des mesures altimétriques.

¹³Visiter : <http://bigquill.gsfc.nasa.gov/validation.html>

¹⁴Cf. § 2.1.3, page 51, pour plus de détails sur la notion de précision.

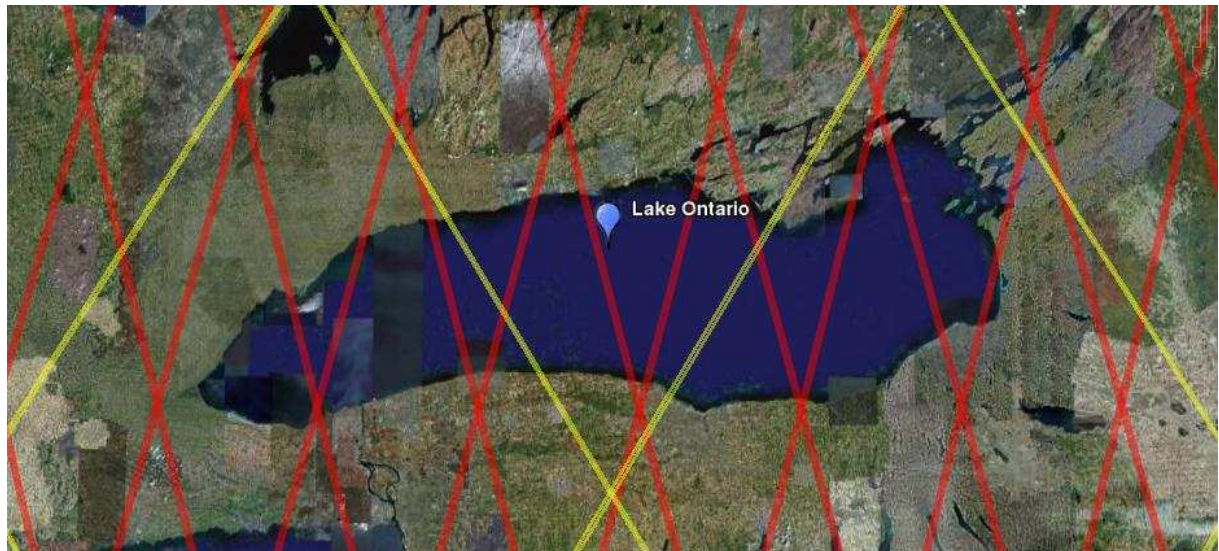


FIG. 1.19: Photo satellite du lac Ontario et des traces des satellites Topex/Poseidon (traits jaunes) et ENVISAT (traits rouges). (Image GoogleEarth)

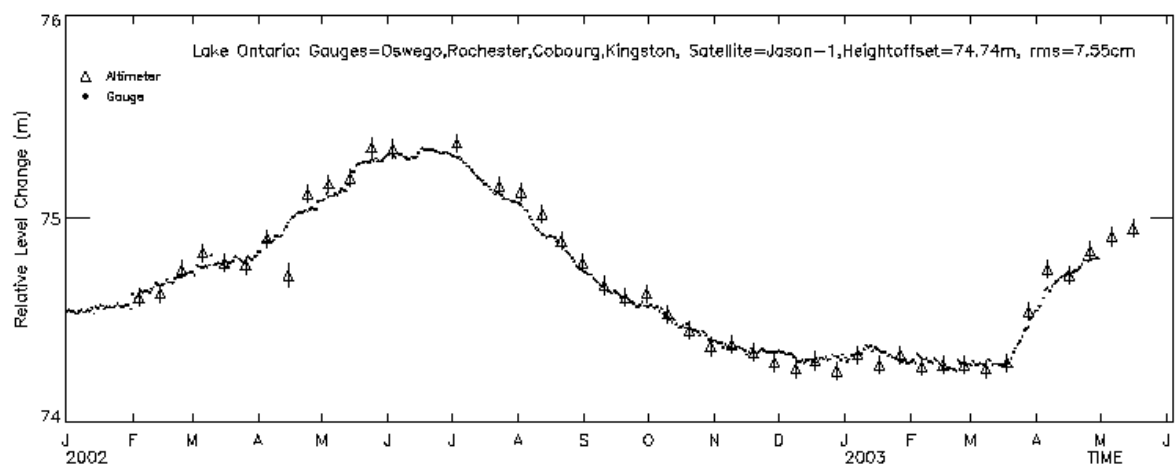


FIG. 1.20: Série temporelle alti-hydrologique du satellite Topex/Poseidon sur la lac Ontario fournie par le projet « Global Reservoir and Lake Monitor ». La précision RMS des mesures altimétriques du niveau des eaux est de 7,5cm sur ce lac d'une surface de $\sim 100\text{km}^2$ [Birkett et Mason, 1995] [Birkett, 1998].

réelle. On trouve par exemple dans la littérature [Fu et al., 1994], l'estimation du budget théorique de l'erreur de mesure sur des surfaces de type océanique pour les altimètres NASA/TOPEX (parfois appelé « ALT » ou NRA pour « NASA Radar Altimeter ») et CNES/Poseidon, qui équipent le satellite Topex/Poseidon.

Ce budget d'erreur théorique est de 13,7cm et comprend une part de 12,8cm imputable à la détermination de la composante verticale de l'orbite. Cependant, les analyses menées sur les données de la première année de fonctionnement de Topex/Poseidon font état de précisions réelles bien meilleures du fait d'importantes améliorations apportées dans la détermination de la composante verticale de l'orbite. Les budgets d'erreur réels sont alors ramenés respectivement à 4,7cm pour TOPEX et à 5,2cm pour Poseidon sur les océans [Tapley et al., 1994; Nerem et al., 1994; Fu et al., 1994].

Ces valeurs publiées en 1994, sont à considérer comme des valeurs hautes et peuvent être aujourd'hui revues à la baisse. En effet, de nombreuses améliorations ont été apportées par les équipes de recherche, notamment dans les processus de détermination des orbites et dans les modèles d'estimation des corrections atmosphériques (notamment des corrections de troposphère sèche et humide) employées pour corriger les effets de ralentissement des ondes radar dans les différentes couches de l'atmosphère.

Grands lacs et mers intérieures

L'étude de la précision sur les grands lacs a permis de quantifier de manière très précise la précision absolue des mesures altimétriques, les grands lacs présentant des caractéristiques similaires aux océans, ne subissant pas les effets de marées et disposant, pour certains, de réseaux hydrométriques et géodésiques de haute précision.

Dans leurs travaux, Morris et Gill [Morris et Gill, 1994a] ont quantifié la précision des mesures altimétriques effectuées à l'aide de Topex/Poseidon par comparaison avec les mesures in-situ des grands lacs du nord américain. Les travaux portent indépendamment sur l'altimètre de la NASA (ALT/NRA) et sur celui du CNES (SSALT/Poseidon). L'analyse de la précision des mesures altimétriques donne une précision RMS inférieure à 4,5cm pour 15 des 17 des sites étudiés et s'étendent de manière globale jusqu'à 9,59cm, pour une précision moyenne tous sites confondus de 4,12cm.

Les très bonnes précisions obtenues sur ces lacs ont également permis à Morris et Gill de mettre en évidence un biais systématique entre les orbites calculées respectivement par le CNES et la NASA et montrent que l'orbite CNES est légèrement plus précise que celle de la NASA.

Des travaux similaires [Morris et Gill, 1994a] ont été menés à partir des mesures altimétriques du satellite GeoSAT, et affichent une précision RMS moyenne de 11,1cm.

D'autres travaux ont permis, à partir d'analyse de la précision des mesures altimétriques sur les grands lacs américains, de mettre en évidence des erreurs dans les modèles de géoïde. Ainsi, Jekeli et Dumrongchai [Jekeli et Dumrongchai, 2003] ont décelé une erreur locale de 33cm dans le modèle G99SS et montrent que la qualité de celui-ci n'est pas suffisante pour une analyse fine de la précision des mesures altimétriques sur ces lacs.

Confrontation mesures in-situ / altimétrie sur le bassin amazonien

En 1993, Koblinsky et al. publient les résultats de travaux très complets sur la mesure du niveau de l'Amazone effectuée par le satellite GeoSAT [Koblinsky et al., 1993]. Dans leur article, Koblinsky et al. abordent diverses facettes liées à la précision des mesures altimétriques sur les cours d'eau et à leur qualité en général : les dimensions des cibles hydrologiques à observer, la précision et la période d'échantillonnage effective des mesures altimétriques, la spécificité des formes d'onde sur les surfaces continentales (retracking) et même la précision des mesures in-situ qui doivent servir de référence pour l'analyse de la précision (voir aussi la section 6.2.2).

Ainsi, ces travaux examinent de près le potentiel d'utilisation des missions d'altimétrie radar pour un suivi opérationnel des larges fleuves. Une des conclusions importantes de cet article est que le principal

poste d'erreur des mesures altimétriques provient des erreurs de retracking et des corrections du range (bien que l'incertitude sur la composante verticale de l'orbite de GeoSAT soit de 0,5m environ).

Il est intéressant de noter que Koblinsky et al. ont mené une analyse de la précision à partir d'une technique de filtrage manuelle et d'une autre automatique. Les comparaisons entre les séries temporelles altimétriques résultantes et les séries temporelles in-situ, sur 4 sites de l'Amazonie, présentent des précision RMS de 0,7m pour le filtrage manuel et 1,2m pour le filtrage automatique.

Charon Birkett [Birkett, 1998] a comparé les mesures altimétriques de Topex/Poseidon aux mesures in-situ relevées sur de larges fleuves (i.e. de largeur > 1km) et des zones humides du bassin amazonien. La méthode employée met en œuvre des techniques de filtrage automatique, assistées d'une édition manuelle des mesures lorsque celle-ci « sont grossièrement en dehors de la série temporelle ».

Les résultats obtenus montrent, dans le meilleur des cas (Pantanal), une précision RMS oscillant entre 11cm et 14cm selon la saison. D'autres résultats montrent des précision RMS moyenne de 25cm sur des zones d'inondation proches de l'Amazonie et 60cm sur le fleuve lui-même. Un détail intéressant abordé par Birkett est le temps de 1s environ nécessaire au « réaccrochage » de Topex/Poseidon (NRA) lorsque celui-ci a perdu sa cible de vue ou « décroché » (i.e. n'arrive plus à suivre les variations du relief).

En 2002, Charon Birkett propose une analyse plus poussée de la précision des mesures altimétriques [Birkett et al., 2002]¹⁵. L'étude porte sur une quarantaine de sites (zones d'inondations, fleuves, ou mélanges des deux) parmi lesquels 14 se situent exclusivement sur des cours d'eau.

La méthode de comparaison des mesures altimétriques et mesures in-situ est décrite de manière relativement complète. En raison de l'importante distance entre station limnimétrique in-situ et trace du satellite sur le fleuve (station virtuelle), il est procédé à deux réajustements des données : (1) un ajustement vertical des mesures altimétriques, en périodes de hautes eaux, sur les mesures in-situ ; (2) un ajustement temporel des mesures in-situ (pour quelques cas) lorsqu'un déphasage entre les séries temporelles altimétrique et in-situ est constaté, ce décalage est appliqué de manière à minimiser l'erreur RMS. L'erreur RMS moyenne résultante sur les 14 sites est de 1,01m.

Les travaux de l'équipe E.A.P.R.S. de De Montfort University [Berry et al., 2005] ont comparé les mesures de Topex/Poseidon, ERS-2 et ENVISAT aux mesures in-situ de la station limnimétrique de Careiro (code ANA 15040000) située sur l'Amazonie, tout près de Manaus. Les résultats sont présentés sous la forme de coefficients de corrélation de De Pearson (r^2 , cf. § 2.1.3 page 52) entre les mesures d'un satellite et les mesures in-situ (0,91 pour Topex/Poseidon, 0,93 pour ERS-2 et 0,98 ENVISAT). Cependant, l'analyse de la corrélation entre deux séries temporelles n'indique pas l'ordre de grandeur de la précision des mesures car le coefficient de De Pearson est insensible à l'amplitude de variation des variables qu'il lie.

Il convient d'ajouter que l'on trouve dans certaines publications et présentations des valeurs de précision optimistes qui ne se réfèrent souvent qu'à un petit nombre de stations favorables, et n'indiquent pas la nature du filtrage, parfois manuel (ou assisté par la connaissance de l'erreur), des mesures altimétriques. Ainsi une valeur de précision de 0,25m, ou plus généralement de quelques dizaines de centimètres, est parfois évoquée :

[Koblinsky et al., 1993] : « *The overall level of comparison is 0.7 m rms when the technique is applied manually, and 1.2 m rms when an automated version of the method is applied. At one location the average difference is 0.2 m rms.* » ,

[Birkett et al., 2002] : « *First-order validation exercises with the deduced 1992-1999 time series of stage fluctuations reveal accuracies ranging from tens of centimeters to several meters (mean ~ 1.1 m rms).* » ,

[Calmant et Seyler, 2006] : « *[...] the overall uncertainty of altimetric measurements over continental waters is now in the order of a couple of decimetres.* » ,

¹⁵ Les travaux de [Birkett et al., 2002] font l'objet d'une analyse particulière au chapitre 7 de la thèse.

[Frappart et al., 2006] : « *Radar altimetry from T/P has demonstrated the capability to monitor water level variations of lakes, rivers, wetlands, and floodplains with a precision of several tens of centimeters.* »,

Nous verrons qu'elle est exceptionnelle et ne correspond pas à une réalité statistiquement fiable.

1.3.2 Techniques de « retracking »

Comme nous venons de le voir dans la section précédente, et selon [Koblinsky et al., 1993], une des principales sources d'erreur des mesures altimétriques sur les cours d'eau provient des erreurs d'estimation du range par les algorithmes embarqués (trackers) ou appliqués *a posteriori* sur les formes d'onde radar (retrackers).

Ces erreurs d'estimation du range sont globalement imputables à la complexité et à la diversité des surfaces continentales rencontrées par les altimètres et à l'incapacité des algorithmes actuels, optimisés pour le suivi des surfaces océaniques, de traiter cette variété de formes d'ondes correctement [Smith, 1997].

Le problème du (re)tracking a mobilisé de nombreuses équipes de recherche, et de nombreux travaux ont été publiés. Deux ensembles de recherches se dégagent nettement : (1) les travaux portant sur la comparaison de retrackers existants, mettant en lumière les performances, qualités et défauts des algorithmiques et (2) les travaux portant sur le développement de nouvelles algorithmiques et leur évaluation. Cette section propose de parcourir brièvement les travaux réalisés dans le cadre de ces deux approches.

Comparaison de (re)trackers

Durant ses travaux de thèse, Frédéric Frappart a mené une étude comparative des quatre retrackers du segment sol de la mission ENVISAT [Frappart et al., 2006]. L'analyse porte sur onze sites de mesure sur des fleuves et sur trois lacs du bassin amazonien. L'étude comparative des performances de ces quatre algorithmes de retracking met en évidence que l'algorithme Ice1 présente les plus faibles erreurs (de 0, 1m en hautes eaux à 0, 2m en basses eaux, selon l'estimateur MAD¹⁶).

Cet article propose également une méthode, dite de « migration » des mesures, permettant la correction des effets « d'accroche » de l'altimètre sur une cible (i.e. lorsque celui-ci garde comme cible une surface venant d'être survolée par le satellite et qui n'est plus au nadir).

Les travaux de [Mercier et Zanife, 2006] ont permis de retraiter les formes d'onde de Topex/Poseidon à l'aide des algorithmes de retracking du segment sol de la mission ENVISAT¹⁷ et de combler les lacunes importantes des corrections de troposphère sèche et humide dans les produits standard de la mission (produits altimétriques PODDAC ou AVISO). Ce travail original s'inscrit dans le cadre du projet CASH (cf. § 2.3.2), et le produit altimétrique qui en est issu est à l'origine du produit alti-hydrologique construit dans le cadre de ce projet. La mise en œuvre de ces retrackers sur les formes d'onde de Topex/Poseidon a permis un gain très important au niveau du nombre de mesures altimétriques interprétées (non rejetées) par l'algorithme (trois fois plus que dans le produit standard AVISO/M-GDR), tout en préservant une précision correcte (voir les résultats de cette analyse aux sections 7.4.6 à 7.4.9). Notons que ce travail n'aborde pas l'analyse de la précision de ces nouvelles mesures altimétriques exploitant ces nouvelles corrections.

Développement de retrackers

Pour faire face à la diversité des formes d'ondes rencontrées sur les terres émergées, l'équipe E.A.P.R.S. de De Montfort University a mis au point, pour le projet « River & Lake » de l'ESA, un système expert

¹⁶MAD pour « Median Absolute Deviation » : $MAD(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |x_i - x_{med}|$, avec x_{med} la médiane des N valeurs x_i .

¹⁷Les données produites dans le cadre de ces travaux font l'objet d'un nombre important d'analyses dans cette thèse. Le produit altimétrique correspondant, appelé CLS/TP/« ENVISAT-L2 », fait l'objet d'une caractérisation approfondie au chapitre 7.

basé sur 11 retrackers spécialisés. Chaque algorithme est alors responsable de l'interprétation d'une famille prédéterminée de formes d'ondes [Garlick et al., 2005; Berry, 2006; Berry et al., 2006; Harrison et al., 2006], après qu'un premier module expert ait classifié ces formes d'onde pour les associer à une des familles.

Un partenariat entre le Cemagref, l'ESA et De Montfort University nous a permis de quantifier la qualité des produits alti-hydrologiques issus de ces développements.

L'analyse de la qualité de ces produits alti-hydrologiques montre des performances très prometteuses (voir les résultats au chapitre 7, sections 7.4.2 et 7.4.3).

Vivien Enjolras a mis au point une approche basée sur la modélisation, trace par trace, des formes d'ondes radar à partir de données physiques (SRTM, LANDSAT) [Enjolras et Rodriguez, 2006]. Cette approche s'éloigne donc des modèles paramétriques globaux classiques qui sont habituellement utilisés [Brown, 1977].

Enfin, d'autres recherches ont amené à développer de nouvelles algorithmiques, citons notamment les travaux de [Rodriguez et Martin, 1994; Quartly, 2000] (Topex/Poseidon) et [Deng et Featherstone, 2006] (ERS-2).

Conclusion

Comme on peut le constater au vu de cette synthèse des travaux menés sur les eaux continentales, ce sujet a été abordé au cas par cas, sans une approche méthodologique robuste et statistiquement significative. Les travaux de [Birkett et al., 2002] sont les plus avancés en ce sens bien qu'ils n'aient été mis en œuvre que pour un nombre limité de stations et pour un seul produit alti-hydrologique.

La communauté scientifique semble aujourd'hui véhiculer deux messages :

- (1) la précision des mesures altimétriques sur les cours d'eau est de quelques décimètres,
 - (2) cette précision est liée à la largeur des cours d'eau,
- dont nous verrons dans cette thèse qu'ils sont en grande partie erronés.

1.4 Objet et objectifs de la thèse

1.4.1 Contexte général de la thèse

Les développements technologiques rapides de l'Altimétrie Satellitaire Radar et les enjeux de son application au suivi des eaux continentales obligent à renforcer la rigueur des méthodes de caractérisation de la qualité des mesures satellitaires sur les eaux continentales. Ceci est indispensable pour trois raisons majeures :

- (1) Fournir aux utilisateurs de ces données (hydrologues, gestionnaires des ressources en eau) une information sur l'incertitude des mesures altimétriques. Ces mesures pourront alors être intégrées dans les modèles et systèmes d'information des utilisateurs, et mobilisés en pleine connaissance de leurs limites.
- (2) Pouvoir objectivement analyser la précision de la mesure en fonction des caractéristiques physiques du système observé (morphologie des cours d'eau, relief environnant, végétation).
- (3) Pouvoir quantifier l'amélioration de précision apportée par les développements algorithmiques et technologiques, et définir une stratégie de recherche et développement cohérente.

Comme la synthèse de l'état de l'art présentée en section 1.3 l'a montré, il n'existe pas actuellement de **méthode de référence pour la caractérisation de la qualité des mesures d'altimétrie satellitaire radar sur les eaux continentales**. Cette absence a pénalisé les travaux de recherche des dix dernières années et rend difficile la définition d'une stratégie de recherche cohérente pour les dix prochaines années. Le sujet de thèse a pour ambition de contribuer à combler cette lacune.

1.4.2 Précision, incertitude, échantillonnage et applications des mesures altimétriques

De nombreuses publications font état du fort potentiel des techniques d'altimétrie radar pour le suivi des eaux continentales en général. Elles l'illustrent généralement sur quelques cas particuliers (lacs, stations sur des cours d'eau, etc.) et abordent le problème de la qualité des mesures altimétriques sous des facettes particulières.

Nous proposons de traiter le problème de la qualité des mesures altimétriques de façon large, c'est à dire sous deux angles complémentaires : celui de la **Qualité altimétrique** caractérisée par la précision et le taux de pertes de mesures ; celui de la **Qualité hydrologique** caractérisée par l'incertitude sur les mesures, la période d'échantillonnage effective et la qualité de reconstitution du signal limnimétrique.

Qualité altimétrique :

Précision : La précision des mesures altimétriques est une caractérisation statistique de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ, réalisée par rapport valeurs in-situ. Ainsi, pour une valeur in-situ donnée, elle signifie que la mesure altimétrique est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{is} \pm \text{précision}]$. La précision est associée à la valeur in-situ.

taux de pertes de mesures : Les mesures altimétriques présentent une période d'échantillonnage théorique liée à la période de retour du satellite sur la même trace. Dans la pratique, le produit alti-hydrologique sur un plan d'eau particulier ne fournit pas toujours des mesures à chaque passage. Le taux de pertes exprime sous forme de pourcentage le rapport entre le nombre de passages sans mesure et le nombre total de passages.

Qualité hydrologique :

Incertainitude : L'incertitude des mesures altimétriques est une caractérisation statistique de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ, réalisée par rapport aux mesures altimétriques. Ainsi, pour une mesure altimétrique donnée, elle signifie que la valeur in-situ est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{Sat} \pm \text{incertitude}]$. L'incertitude est associée à la mesure alti-hydrologique.

Période d'échantillonnage effective : La période d'échantillonnage effective résulte du taux de pertes de mesures, elle est égale à la période d'échantillonnage théorique divisée par $(1 - \text{taux de pertes de mesures})$. Par exemple, une période d'échantillonnage théorique de 10 jours (Topex/Poseidon) et un taux de pertes de mesures de 50% se traduit par une période d'échantillonnage effective de 20 jours.

Qualité de reconstitution du signal limnimétrique : l'enjeu des mesures de niveau pour les hydrologues est de pouvoir reconstituer le signal limnimétrique (variations du niveau au cours du temps) en un point donné d'un fleuve. L'altimétrie radar offre une possibilité d'échantillonnage à une période d'échantillonnage effective donnée et avec une incertitude donnée. Le signal limnimétrique continu que l'hydrologue pourra reconstituer à partir de cet échantillonnage et d'une méthode de suréchantillonnage donnée (interpolation temporelle) sera donc biaisé par rapport au signal naturel. Cette erreur entre signal limnimétrique naturel et signal limnimétrique reconstitué à partir de l'altimétrie radar conditionne la qualité de reconstitution du signal limnimétrique. Cette qualité est liée d'une part au signal naturel (à ses caractéristiques spectrales) et d'autre part à la qualité altimétrique du produit et à la méthode de suréchantillonnage.

La Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques devra permettre pour un produit alti-hydrologique donné de rendre compte de l'ensemble de ces critères de qualité. De plus, cette quantification des critères devra se faire sur un grand nombre de sites sur les cours d'eau (stations virtuelles) pour obtenir une caractérisation statistiquement représentative de la qualité.

1.4.3 Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est de définir une méthode de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques sous l'angle altimétrique (précision et taux de pertes de mesures) comme sous l'angle hydrologique (incertitude, période d'échantillonnage effective et qualité de reconstitution du signal limnimétrique).

Nous appliquerons cette méthode à différents produits alti-hydrologiques de façon à fournir une caractérisation « objective » (statistiquement représentative) de l'état actuel de la précision de l'altimétrie radar sur les cours d'eau.

Nous l'utiliserons également pour comparer les performances de différentes chaînes de filtrage automatique, de fenêtrage géographique et de (re)tracking des formes d'onde.

Nous l'appliquerons enfin au calcul de l'incertitude associée à chaque mesure alti-hydrologique, de façon à fournir aux hydrologues des produits mobilisables en connaissance de cause.

1.4.4 Contexte de déroulement de la thèse

Cette thèse AgroParisTech-ENGREF s'est déroulée dans le cadre de l'école doctorale SIBAGHE (initialement Terre Eau Espace).

Elle a été cofinancée par le CNES et Thales Alenia Space (Alcatel Alenia Space en 2004) pour les trois premières années (11/2004 à 11/2007) et par le Cemagref la quatrième année (11/2007 à 11/2008).

La thèse s'est déroulée avec les moyens techniques et administratifs de la Maison de la Télédétection (UMR TETIS, Montpellier) et du Cemagref (groupement de Montpellier) et l'appui de différents organismes (IRD, ANA, CLS, IFR ILEE).

Chapitre 2

DÉFINITIONS ET DONNÉES UTILISÉES

Sommaire

2.1	Définitions et notations usuelles	48
2.1.1	Définitions liées aux données in-situ	48
2.1.2	Définitions liées à l'altimétrie radar	49
2.1.3	Définitions et notations des indicateurs de qualité	51
2.1.4	Deux approches de la qualité	53
2.1.5	Récapitulatif des notations	53
2.2	Sources de données terrestres	55
2.2.1	Données géographiques	55
2.2.2	Données géodésiques	59
2.2.3	Données hydrologiques	59
2.3	Sources de données altimétriques	61
2.3.1	Généralités concernant sur les produits altimétriques	63
2.3.2	Les produits altimétriques utilisés dans cette thèse	66
2.3.3	Dénomination des produits alti-hydrologiques, stations virtuelles et séries temporelles altimétriques	68

2.1 Définitions et notations usuelles pour l'altimétrie radar appliquée au suivi des eaux continentales

La présente section introduit les définitions terminologiques utilisées dans ce mémoire, ainsi que certaines notations mathématiques nécessaires à l'explication des méthodes développées dans le cadre de cette thèse.

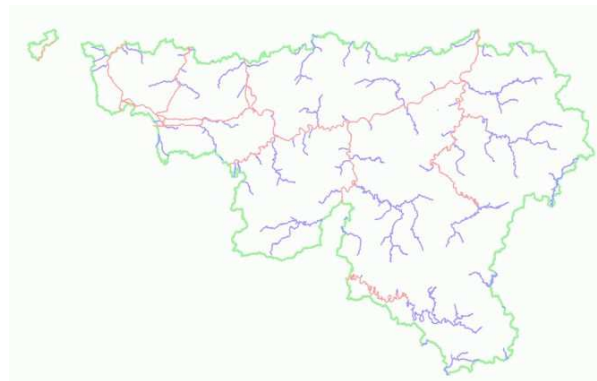
2.1.1 Définitions liées aux données in-situ

Définitions générales

- **Station limnimétrique** : station de mesure du niveau d'un cours d'eau. Généralement, les mesures sont échantillonnées à un pas de temps fixé. Les mesures sont relevées par un système automatisé ou par un opérateur.
- **Station hydrométrique** : station de mesure du débit et/ou du niveau d'un cours d'eau.
- **Bassin versant (ou bassin hydrographique)** : portion de territoire délimitée par des lignes de crête, dont les eaux s'écoulent par un exutoire commun.
- **Réseau hydrométrique** : ensemble de stations limnimétriques et/ou de stations hydrométriques disposées le long des cours d'eau pour une région donnée.
- **Réseau hydrographique** : Représentation graphique des cours d'eau constituant un réseau d'écoulement des eaux d'une région donnée, généralement à l'échelle d'un pays ou d'un bassin versant.



(a) Illustration du réseau hydrométrique de la région Midi-Pyrénées, chaque point correspond à une station hydrométrique



(b) Réseau hydrographique de la Wallonie

FIG. 2.1: Illustration d'un réseau hydrométrique (a) et d'un réseau hydrographique (b).

Définitions des données

La liste des définitions liées mesures in-situ du niveau des cours d'eau est présentée par ordre croissant de granularité des données, de la mesure individuelle à la base de données hydrologique :

- **Mesure in-situ** : mesure de terrain représentant le niveau d'un cours d'eau en un point donné, et pour un instant donné.
Une mesure in-situ trouve son origine au zéro de l'échelle limnimétrique qui a servi à sa mesure. Notons que les échelles limnimétriques ne sont pas nécessairement nivelées par rapport au niveau moyen des océans.

- **Série temporelle mesurée in-situ** : ensemble de mesures acquises par une station de mesure limnimétrique in-situ. La période d'échantillonnage temporelle des séries temporelles mesurées in-situ pour les grands cours d'eau est de l'ordre du jour ou de quelques heures.
- **Base de données hydrologique** : ensemble de séries temporelles mesurées in-situ regroupées sous forme d'une base de données. Les séries temporelles mesurées in-situ stockées dans la base de données hydrologique sont identifiées par un identifiant unique (la clé primaire) qui dans cette thèse est le code associée à la station de mesure limnimétrique qui a produit la série temporelle mesurée in-situ. Le « code station » est attribué par l'organisme qui gère le(s) réseau(x) de stations limnimétriques. Une base de données hydrologique ne correspond pas nécessairement à un seul bassin hydrologique.

2.1.2 Définitions liées à l'altimétrie radar

Définitions générales

- **Le « range »** : le range est la distance mesurée par l'altimètre entre le satellite et la surface d'eau (ou autre) visée au nadir. Cette distance est calculée à partir de la mesure du temps de trajet aller-retour de l'onde radar : la forme de l'onde radar retournée à l'altimètre est analysée pour estimer au mieux l'instant de fin du trajet aller-retour. La célérité de l'onde est fixée à $c = 3.10^8 \text{ m/s}$, cependant un certain nombre de corrections sont calculées afin de prendre en compte les variations de la célérité lors du trajet aller-retour de l'onde dans les différentes couches de l'atmosphère (principalement liées à la ionosphère, la troposphère humide et sèche).
- **Trace** : projection au sol d'une demi-orbite numérotée, ascendante ou descendante. Le terme Trace peut également être employé pour désigner son empreinte au sol : sa largeur et/ou ses limites Est et Ouest.
- **Cycle** : période définie par un ensemble de traces uniques au terme duquel le satellite reprend la même trajectoire.
- **Largeur de trace** : largeur de la projection au sol des endroits où des mesures sont acquises par l'altimètre, selon un axe perpendiculaire à la direction de la trace. Du fait des variations de l'orbite du satellite (de l'ordre de quelques km autour de la trace moyenne), la projection au sol des lieux d'acquisition des mesures permettent de définir la largeur de la trace. Les limites Est et Ouest des traces sont déduites des données, après repérage de cycles dont les mesures se sont le plus écartées de la trace moyenne (cf. fig. 2.2b).
- **Station limnimétrique virtuelle (ou « station virtuelle »)** : site d'acquisition de mesures du niveau d'un cours d'eau obtenues à l'aide des techniques d'altimétrie satellitaire radar nadir. Une station virtuelle est définie - entre autres - par des limites géographiques à l'intersection entre un cours d'eau et une (ou parfois plusieurs) trace(s) de satellite (cf. fig. 2.2c).

Les différents niveaux de données altimétriques

La liste des définitions liées mesures altimétriques est présentée par ordre croissant de granularité des données, de la mesures altimétriques individuelles au produit altimétrique :

- **Mesure altimétrique individuelle** : mesure altimétrique disponible au pas de temps le plus fin dans un produit altimétrique.
- **Mesure altimétrique d'enregistrement** : mesure altimétrique disponible au même pas de temps que l'enregistrement altimétrique qui la contient : la plupart du temps, les mesures altimétriques



(a) Trace 146 du satellite Topex/Poseidon sur l'étang de Vic (Languedoc-Roussillon) (b) Largeur de la trace 187 de Topex/Poseidon sur le Rhône, au sud d'Arles (entre les limites Est et Ouest) (c) Stations virtuelles à l'intersection entre le fleuve Madeira (bassin amazonien) et la trace 63 de Topex/Poseidon

FIG. 2.2: Illustration des traces de Topex/Poseidon (a et b) et de quelques stations virtuelles sur le fleuve Madeira (c).

d'enregistrement sont construites à partir de N mesures altimétriques individuelles. Une mesure altimétrique d'enregistrement est toujours accompagnée (dans son enregistrement altimétrique) d'autres informations comme sa date et ses coordonnées d'acquisition, mais aussi d'un certain nombre de mesures géophysiques.

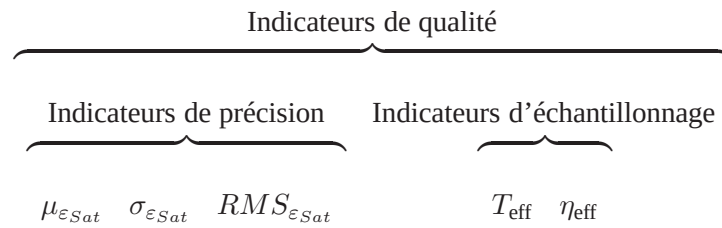
- **Enregistrement altimétrique** : ensemble de variables conditionnées afin de représenter l'état de l'altimètre ainsi que les grandeurs physiques mesurées à un instant donné. En général, les enregistrements altimétriques contiennent chacun un ensemble de variables échantillonnées à 1Hz (voir l'illustration en page 76, fig. 3.2).
- **Série temporelle altimétrique** : ensemble de mesures altimétriques dérivées des mesures acquises au cours du temps en une station virtuelle.
- **Produit altimétrique** : ensemble d'enregistrements altimétriques issus d'une mission d'altimétrie satellitaire radar nadir. Un produit altimétrique est traité, corrigé et conditionné à l'aide de chaînes de traitements complexes. Il contient en général des données à l'échelle mondiale (dans les limites de la couverture définie par l'orbite du satellite) et pour toute la durée de la mission altimétrique. Les produits altimétriques sont fournis par des organismes spécialisés (CNES, NASA, laboratoires, opérateurs, etc.) dans le traitement des données altimétriques. Voir le § 2.3 pour une description technique des produits altimétriques.
- **Série temporelle alti-hydrologique** : série temporelle extraite depuis un produit altimétrique à l'aide d'une station virtuelle (par fenêtrage), puis traitée à l'aide d'une chaîne logicielle de traitements et de transformations (changement de système géodésique, applications de corrections, sélection des mesures altimétriques représentatives, filtrages, etc.).
Les séries temporelles alti-hydrologiques permettent de simplifier l'utilisation de la donnée altimétrique (de par leur forme standardisée et simplifiée) ainsi que son interprétation (information synthétisée). Elles ont en outre la particularité de ne proposer qu'une seule mesure altimétrique par passage du satellite sur la station virtuelle, ce qui permet de préserver au mieux la cohérence hydrologique intrinsèque à la série temporelle.
- **Produit alti-hydrologique** : produit hydrologique issu de l'altimétrie radar.
Un produit alti-hydrologique est constitué d'un ensemble de séries temporelles altimétriques optimisées pour une utilisation en hydrologie. Enfin, plusieurs produits alti-hydrologiques peuvent être générés à partir d'un seul et même produit altimétrique, en lui appliquant différentes chaînes de

traitements et de transformations.

2.1.3 Définitions et notations des indicateurs de qualité

Avant d'aborder en détail la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques (cf. chapitre 5), il est nécessaire de définir les « indicateurs de qualité » qui nous permettront de rendre compte des performances des séries temporelles altimétriques.

Nous utilisons deux types d'indicateurs de qualité : (1) des indicateurs de précision des mesures altimétriques du niveau des cours d'eau, et (2) des indicateurs d'échantillonnage des mesures altimétriques. Ces derniers permettent de quantifier la capacité effective de l'altimètre à estimer au moins une mesure altimétrique du niveau de l'eau par passage sur la station virtuelle.



Nous allons voir ci-après à quoi correspondent les cinq termes $\mu_{\varepsilon_{Sat}}$, $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$, $RMS_{\varepsilon_{Sat}}$, T_{eff} et η_{eff} .

Précisions sur le mot « précision »

Le mot « précision », premier mot du titre de la thèse, a été employé depuis les tous premiers développements de la thèse au sens commun « qualité globale d'une mesure » (cf. dictionnaire Larrousse). Cependant, la notion même de précision est souvent source de confusion. Nous détaillons ici la définition que nous apportons au mot « précision ».

Ces travaux de thèse visent à développer une méthode complète permettant notamment l'analyse des indicateurs de précision, en se basant sur la quantification des écarts (ou erreurs de mesure) entre les mesures altimétriques et les valeurs de référence, les mesures in-situ.

D'après le VIM (Vocabulaire International des termes fondamentaux et généraux de Métrologie), norme française NF X07-001 [AFNOR, 1994] diffusée par l'AFNOR (Association française de normalisation) et transposée depuis une norme ISO (International Organization for Standardization) de 1993, c'est le terme « exactitude » qu'il conviendrait d'utiliser¹. On y découvre ainsi que le mot « précision » ne fait l'objet d'aucune définition. Mieux, une note dans la définition du mot « exactitude » stipule : « Le terme précision ne doit pas être utilisé pour exactitude ».

Pourtant, aucun des termes proposés dans le VIM ne nous permet de véritablement appréhender ce que nous entendons par « précision des mesures altimétriques » (i.e. la caractérisation de l'exactitude d'un grand nombre de mesures altimétriques). Dans la suite de cette section, nous proposons donc notre propre définition de la « précision des mesures altimétriques », elle est accompagnée d'une définition de « l'incertitude des mesures altimétriques » qui est compatible avec la définition proposée par le VIM².

Définitions employées dans mémoire de thèse

- **Erreur des mesures altimétriques** : l'erreur d'une mesure altimétrique du niveau d'un cours d'eau est l'écart entre cette mesure et la valeur réelle du niveau de l'eau. On appelle « série temporelle de l'erreur » la série temporelle des erreurs des mesures altimétriques.

¹Exactitude : « Étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande ».

²Incertainitude de mesure : « paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande ».

Pour une série temporelle altimétrique de N échantillons (Z_{Sat}), et N valeurs réelles du niveau des eaux (Z) aux mêmes endroits et aux mêmes instants, l'erreur associée à la $n^{\text{ième}}$ mesure s'écrit :

$$\varepsilon(n) = Z_{Sat}(n) - Z(n) \quad (2.1)$$

- **Précision des mesures altimétriques** : La précision est une caractérisation statistique de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ (mesurées ou reconstituées, cf. § 5.2). Elle signifie que la mesure alti-hydrologique est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{is} + \mu_\varepsilon \pm \sigma_\varepsilon]$, avec :

$$\mu_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \varepsilon(n) ; \quad \sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^N [\varepsilon(n) - \mu_\varepsilon]^2 ; \quad RMS_\varepsilon = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \varepsilon^2(n) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

La précision peut aussi être caractérisée par la valeur RMS (« Root Mean Square », RMS_ε).

- **Incertitude des mesures altimétriques** : L'incertitude est une caractérisation statistique de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ. Elle signifie que la valeur in-situ est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{Sat} - \mu_\varepsilon \pm \sigma_\varepsilon]$.
- **Période d'échantillonnage effective** : période d'échantillonnage moyenne d'une série temporelle altimétrique. La période d'échantillonnage effective se calcule à partir du rapport entre la durée de l'horizon de mesure et le nombre de mesures de la série temporelle altimétrique (N_{eff}). Elle est liée à la durée du cycle T_{Sat} et au nombre de cycles N_{Sat} par la relation :

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{Sat} \cdot N_{Sat}}{N_{\text{eff}}} \quad (2.3)$$

où $T_{Sat} \cdot N_{Sat}$ est la durée de l'horizon de mesure.

- **Taux de pertes de mesures** : pourcentage de perte de mesures constaté dans une série temporelle altimétrique, calculé par rapport au nombre de mesures théorique (nombre de passages du satellite). Ce taux s'exprime comme suit :

$$\eta_{\text{eff}} = 1 - \frac{N_{\text{eff}}}{N_{Sat}} = 1 - \frac{T_{Sat}}{T_{\text{eff}}} \quad (2.4)$$

Nous verrons plus tard dans ce chapitre que tous ces indicateurs de qualité peuvent être calculés pour différentes périodes du cycle hydrologique observé. Nous avons en effet défini trois périodes hydrologiques : les périodes de « basses eaux », « moyennes eaux » et de « hautes eaux ». Ce type de découpage nous permettra d'analyser de manière plus fine la structure de l'erreur portée par les mesures altimétriques.

Autres grandeurs utilisées

- **Le coefficient de corrélation (ou coefficient de De Pearson)** : Le coefficient de corrélation, ou coefficient de De Pearson, $r^2(X, Y)$ quantifie la part de variance de la variable Y que l'on peut expliquer à l'aide de la variable X . Il est défini par l'équation suivante :

$$r^2(X, Y) = \frac{[\sum (X - \bar{X}) \cdot (Y - \bar{Y})]^2}{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2} \quad (2.5)$$

Avec $\bar{X}$ et $\bar{Y}$ les valeurs moyennes de X et Y .

- **Erreur résiduelle d'un modèle $\epsilon_{\mathcal{M}}$ (ou résidu)** : L'erreur résiduelle d'un modèle d'estimation $\mathcal{M}_Y$, modèle de la variable Y à partir d'une ou plusieurs variables X , est calculée en comparant la sortie du modèle $\hat{Y} = \mathcal{M}_Y(X)$ avec les vraies valeurs Y . Plus l'erreur résiduelle est faible, meilleur est le modèle :

$$\epsilon_{\mathcal{M}} = \hat{Y} - Y = \mathcal{M}_Y(X) - Y \quad (2.6)$$

2.1.4 Deux approches de la qualité

A partir des indicateurs définis ci-dessus, les performances des séries temporelles altimétriques peuvent être analysées selon deux points de vue différents :

1. l'altimètre, les chaînes de traitements de génération d'un produit altimétrique, puis d'un produit alti-hydrologique fournissent des séries temporelles altimétriques : « *quelle est la capacité d'un altimètre et de ces chaînes de traitements à fournir de la mesure, et avec quelle précision ?* »
2. un cours d'eau présente un certain signal hydrologique en un point donné (série temporelle in-situ), « *quelle est la capacité de la série temporelle altimétrique à restituer le contenu informatif du signal hydrologique ?* »

Ces deux points de vues nous amènent à définir deux notions différentes de « qualité » :

- **Qualité des séries temporelles (altimétriques) au sens altimétrique** : conjonction de la précision et du taux de pertes des séries temporelles altimétriques, caractérise l'aptitude du dispositif de mesure à mesurer sa cible. Pour simplifier, nous nommerons cette notion de qualité la « qualité altimétrique ».
- **Qualité des séries temporelles (altimétriques) au sens hydrologique** : conjonction entre la qualité altimétrique et les caractéristiques propres au signal observé, caractérise l'aptitude d'un produit alti-métrique à représenter le signal hydrologique observé. Pour simplifier, nous nommerons cette notion de qualité la « qualité hydrologique ».

2.1.5 Récapitulatif des notations

Voici la liste des principales notations utilisées dans ce mémoire de thèse :

Séries temporelles continues

- x abscisse curviligne le long d'un cours d'eau. L'abscisse curviligne trouve son origine à l'océan et croît à mesure que l'on s'en éloigne.
- $Z(t)$ série temporelle continue du niveau réel d'un cours d'eau en fonction du temps t (en un endroit donné).
- $Z(x)$ niveau continu d'un cours d'eau en fonction de l'abscisse curviligne x (pour un instant t fixé).
- $Z(x, t)$ représentation bidimensionnelle du niveau d'un cours d'eau continu, en fonction du temps t et de l'abscisse curviligne x . Permet de représenter le niveau du cours d'eau en tout point x , et pour tout instant t .

Séries temporelles discrétisées (échantillonnées)

Note : $X(n)$ désigne la $n^{\text{ème}}$ mesure de la série temporelle X .

- Z_{Mis} série temporelle mesurée in-situ composée d'un nombre fini de mesures in-situ (échantillons).
- Z_{Ris} série temporelle in-situ reconstituée (à l'aide d'une technique d'estimation du niveau du cours d'eau) composée d'un nombre fini de mesures in-situ.
- Z_{Sat} série temporelle altimétrique composée d'un nombre fini de mesures altimétriques individuelles.
- ϵ_{Sat} série temporelle de l'erreur des mesures altimétriques composée de N valeurs d'erreur de mesure.

$\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ série temporelle de l'erreur approximée des mesures altimétriques composée de N valeurs d'erreur de mesure, constituée par comparaison à des mesures in-situ reconstituées.

ε_{satRis} = $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$, autre notation de l'erreur approximée des mesures altimétriques.

ε_{Rec} série temporelle de l'erreur des mesures in-situ reconstituées composée de N valeurs d'erreur de mesure, constituée par comparaison à des mesures in-situ.

ε_{Mis} série temporelle de l'erreur des mesures in-situ composée de N valeurs d'erreur de mesure, par comparaison au niveau réel du cours d'eau Z .

Indicateurs de précision

$\mu_{\varepsilon_{Sat}}$ valeur moyenne de l'erreur réelle des mesures d'une série temporelle altimétrique.

$\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur réelle des mesures d'une série temporelle altimétrique.

$RMS_{\varepsilon_{Sat}}$ valeur RMS de l'erreur réelle des mesures d'une série temporelle altimétrique.

$\mu_{\varepsilon_{satMis}}$ valeur moyenne de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$\sigma_{\varepsilon_{satMis}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$RMS_{\varepsilon_{satMis}}$ valeur RMS de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ valeur moyenne de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ reconstituées.

$\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ reconstituées.

$RMS_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ valeur RMS de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ reconstituées.

$\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ valeur moyenne de l'erreur des mesures in-situ (par rapport au niveau réel Z).

$\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur des mesures in-situ (par rapport au niveau réel Z).

$RMS_{\varepsilon_{Mis}}$ valeur RMS de l'erreur des mesures in-situ (par rapport au niveau réel Z).

$\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ valeur moyenne de l'erreur des mesures in-situ reconstituées résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur des mesures in-situ reconstituées résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$RMS_{\varepsilon_{Rec}}$ valeur RMS de l'erreur des mesures in-situ reconstituées résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

Indicateurs d'échantillonnage

T_{is} période d'échantillonnage d'une série temporelle mesurée in-situ.

T_{Sat} périodicité de l'orbite du satellite, elle est égale à la période d'échantillonnage théorique d'une série temporelle altimétrique (dans le cas où une seule trace est exploitée sur une station virtuelle).

T_{eff} période d'échantillonnage effective d'une série temporelle altimétrique.

η_{eff} taux de pertes de mesures constaté dans une série temporelle altimétrique, par comparaison à la période d'échantillonnage effective théorique T_{Sat} .

Paramètres de caractérisation des séries temporelles in-situ reconstituées et d'appariement des mesures altimétriques

η_d : taux de disponibilité des mesures d'une série temporelle mesurée in-situ ou série temporelle in-situ reconstituée sur l'horizon d'une série temporelle altimétrique.

N_{CA} : nombre de cycles hydrologiques continus (périodes de 12 mois consécutifs) effectivement disponibles pour l'analyse de l'erreur.

$\mathcal{I}_H$: indice d'homogénéité de la répartition des mesures in-situ reconstituées dans l'année calendaire.

$\tilde{N}_{CA}$: nombre équivalent de cycles hydrologiques annuels disponibles pour l'analyse de l'erreur.

M_a : nombre de mesures altimétriques appariées.

η_a : taux d'appariement des mesures altimétriques.

Autres grandeurs

δ_t : décalage horaire à appliquer aux dates des mesures in-situ pour travailler en heures UTC.

2.2 Sources de données terrestres utilisées dans cette thèse

De nombreuses sources de données sont nécessaires pour mener à bien le processus de quantification de la qualité des mesures altimétriques dans le cas du suivi du niveau des cours d'eau. En effet, les mesures altimétriques doivent être comparées à une réalité de terrain, celle-ci nous est fournie à l'aide des mesures in-situ collectées par des stations limnimétriques.

Avant de pouvoir comparer les mesures altimétriques aux mesures in-situ, plusieurs étapes de localisation géographique, de traitement et de transformation des données (in-situ et altimétriques) sont nécessaires. En effet, la comparaison entre mesures implique une correspondance entre les mesures altimétriques et in-situ à la fois dans le temps (dates des mesures différentes) et dans l'espace (lieux de mesures différents), nous parlons d'appariement des mesures.

La plupart de ces opérations nécessitent la connaissance de certains paramètres géographiques, géophysiques et temporels.

Dans cette section, nous faisons le point sur les données que nous avons utilisées.

2.2.1 Données géographiques

Représenter et délimiter les eaux continentales

Plusieurs outils de représentations cartographiques couplés à des bases de données peuvent être utilisés pour localiser et délimiter les zones d'eaux continentales qui nous intéressent.

Les données SWBD Les données SWBD (pour « SRTM³ Water Body Dataset ») fournissent les contours d'une très grande partie⁴ (entre les latitudes 56° S et 60° N) des îles, lacs, et cours d'eau du monde. Ces données sont distribuées gratuitement par la NASA⁵, par dalles de 1° de côté (fichiers ZIP) dans un format propriétaire mais décrit (Shapefile de ESRI) qui le rend exploitable sur un grand nombre de plateformes informatiques. Enfin les délimitations géographiques des données SWBD sont

³SRTM pour « Shuttle Radar Topography Mission »

⁴Selon Wikipedia.org : « Illes : les îles d'une surface inférieure à 14400 m² sont représentées si au moins 10% de leur relief dépasse une hauteur de 15 m par rapport au niveau de l'eau les entourant. Les lacs : les lacs (le niveau de l'eau est identique sur toute leur étendue) ayant une longueur supérieure ou égale à 600 m et une largeur supérieure ou égale à 183 m, les bras sont représentés jusqu'à une largeur de 90 m. Les cours d'eau (représentation par double tracé figurant leur largeur) : Les cours d'eau ayant une largeur supérieure à 183 m sur une longueur d'au moins 600 m. Représentés jusqu'à ce que leur largeur soit inférieure ou égale à 90 m, si celle-ci ne dépasse pas à nouveau cette valeur dans le kilomètre suivant leur cours. »

⁵ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SWBD/

référencées dans le système WGS84/EGM96 que nous avons privilégié dans nos travaux. Notons que ce type de données s'exploite généralement dans un logiciel de type SIG (Système d'Information Géographique) mais peut également être exploité dans de nombreux logiciels intégrant un module de lecture de fichiers au format Shapefile.

GoogleEarth Le logiciel GoogleEarth, est distribué gratuitement par la société Google. Il permet de visualiser le globe terrestre dans son ensemble, en trois dimensions, sous la forme d'un assemblage d'images aériennes et satellites de résolutions variables (quelques centimètres à quelques dizaines de mètres).

Les avantages -dans notre cas- de GoogleEarth par rapport à un logiciel SIG sont dans l'ergonomie qu'il propose puisqu'il permet à la fois de travailler sur un « fond cartographique » global et précis tout en proposant une interface souple, rapide et ne nécessitant pas de connaissances expertes. Il est possible d'ajouter, dans l'espace tridimensionnel du globe terrestre, un certain nombre de primitives géoréférencées comme des points, lignes, assemblages de lignes, polygones, mais aussi des images et objets tridimensionnels. L'import de ses objets géographiques se fait via le format de fichiers KML, décrit⁶ et dérivé du format XML.

GoogleEarth est disponible pour les systèmes d'exploitations les plus répandus : Windows, MacOS et Linux. Ces deux derniers points font de GoogleEarth un logiciel interopérable et adapté à nos besoins, notamment pour le fenêtrage des données altimétriques sur les cours d'eau (définition des stations virtuelles).

Le logiciel GoogleEarth s'est montré le plus pratique pour notre utilisation et a été utilisé pour de nombreuses tâches liées à cette thèse.

Remarque sur la cohérence entre les données SWBD et les images GoogleEarth : Si l'on importe les données SWBD (nécessite une conversion du format ShapeFile vers le format KML) dans GoogleEarth, il est alors possible de comparer les contours des cours d'eau qui sont proposés par ces deux jeux de données. Une constatation remarquable est la très bonne correspondance entre leurs contours respectifs, constatée sur plusieurs grands fleuves du bassin amazonien (Negro, Solimoes, Amazone). Ces deux jeux de données ne devraient pas, a priori, si bien se correspondre puisque :

- les données SWBD sont issues de la mission SRTM (d'une précision relative) et d'un algorithme de détection des zones d'eau (écoulement des eaux dans un bassin versant, suivi des thalwegs, lits des cours d'eau, repérage de lacs),
- les images GoogleEarth sont des prises de vues aériennes ou satellites acquises à des dates arbitraires.

Le fait que ces données se correspondent si bien laisse présager que les images présentes dans GoogleEarth ont été choisies pour représenter au mieux les cours d'eau, dans leur configuration sinon « moyenne », hors périodes d'inondations.

Représentation géographique des sites des mesures altimétriques

Une des tâches nécessaires à la quantification de la qualité des séries temporelles altimétriques est la définition du fenêtrage des stations virtuelles qui leur donnent naissance. Ce travail doit s'effectuer sur un fond de carte relativement précis, permettant de représenter les contours des cours d'eau (utilisation de GoogleEarth dans notre cas) ainsi que les sites où sont acquises les mesures altimétriques. Bien entendu, les mesures altimétriques sont acquises sous la trace du satellite, mais la notion de trace reste floue car bien que les orbites puissent être très précisément connues, il n'en reste pas moins que la trace résultante

⁶Le format KML est en permanente évolution, se référer à la page web <http://code.google.com/apis/kml/documentation/docIndex.html> pour en savoir plus.

au sol est caractérisée par une certaine dispersion autour de la trace moyenne⁷.

Extraction des trajectoires à partir des données altimétriques Le moyen le plus fiable pour projeter les orbites des satellites au sol est l'extraction des coordonnées exactes des mesures directement depuis les produits altimétriques.

Cette tâche peut s'avérer fastidieuse voire irréalisable pour les utilisateurs non-avertis. En effet, la lecture des formats des produits altimétriques nécessite en général un lourd développement logiciel, ce qui est en soit une première barrière d'accès à ces informations. Néanmoins, puisque des outils de lecture ont été implémentés pendant cette thèse, ils ont été utilisés pour extraire les coordonnées des mesures pour des cycles entiers⁸.

L'extraction de mesures altimétriques dans une large fenêtre au niveau de l'équateur permet de se rendre compte de la dispersion de la trace et de repérer les mesures des cycles dont les traces s'écartent le plus de la trace moyenne. Un bref passage en revue permet de désigner des cycles dont les traces se sont le plus écartées vers l'Est et vers l'Ouest de la trace moyenne.

Sachant que les cycles de mesures sont systématiquement incomplets (mesures manquées, périodes de maintenance et pannes des satellites, etc.), un assemblage de plusieurs cycles permet de constituer l'équivalent de deux cycles entiers : l'un contenant les traces des limites Est et l'autre les traces des limites Ouest. La projection de ces deux cycles sur un fond cartographique peut alors être utilisée afin de délimiter de manière très précise les limites de traces réelles d'un satellite, permettant ainsi de définir les fenêtres d'extraction des stations virtuelles, aux intersections avec des cours d'eau.

La figure 2.3 illustre l'extraction des traces limites Est et Ouest pour la trace 63 de Topex/Poseidon. La figure 2.4 illustre la couverture des traces ainsi extraites pour le satellite Topex/Poseidon sur sa première orbite (1992-2002).



FIG. 2.3: Les mesures altimétriques à 10Hz (points jaunes) collectées par Topex/Poseidon sur la période 1992-2002 permettent de désigner les cycles dont les mesures sont les plus éloignées de la trace moyenne. L'assemblage de ces cycles (incomplets) permet d'obtenir deux cycles complets représentant les limites Est et Ouest des trace de Topex/Poseidon. L'exemple illustre ici les limites de la trace 63. (Image GoogleEarth).

Fichiers TLE Les fichiers texte au format TLE (de l'anglais : « Two Line Elements ») décrivent, à l'aide de six variables (disposées sur deux lignes et trois colonnes, d'où le nom « TLE ») les paramètres nécessaires à la définition des orbites des satellites qui nous intéressent. Les fichiers TLE sont régulièrement mis à jour et délivrés sur des sites web spécialisés, notamment par des communautés d'amateurs en observations astrophysiques. Des logiciels permettent alors de représenter les orbites en deux ou trois dimensions. L'utilisation de ce moyen de représentation pose cependant plusieurs problèmes : un fichier TLE est mis à jour de manière à représenter au mieux l'orbite d'un satellite pour une période donnée et peut donc être peu précis pour nos applications. De plus, aucun logiciel permettent la représentation cartographique des fichiers au format TLE et permettant l'import d'autres sources d'informations géographiques se sont montrés efficaces pour le travail de définition des fenêtres d'extractions des stations virtuelles.

⁷Les orbites peuvent être perturbées par différents phénomènes (tels que les frottements en haute atmosphère, etc.), mais restent déterminées avec une bonne précision, surtout pour les missions altimétriques récentes.

⁸Un cycle entier peut contenir jusqu'à 8,5 et 54,4 millions de mesures respectivement pour Topex/Poseidon et ENVISAT.

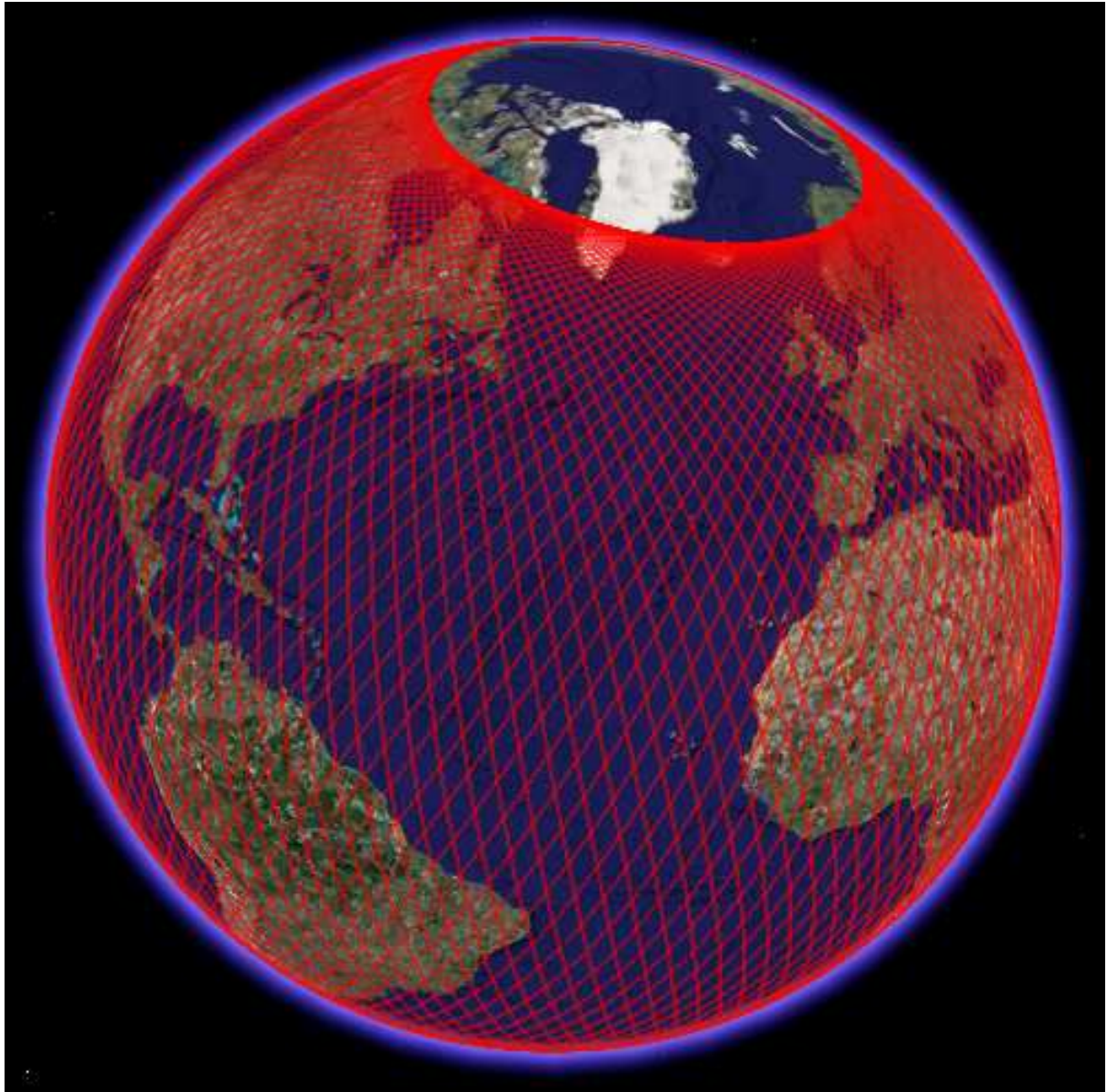


FIG. 2.4: Illustration de l'extraction depuis le produit altimétrique AVISO/M-GDR des coordonnées d'un cycle complet (ses 254 traces différentes) pour le satellite Topex/Poseidon. Les traces ascendantes sont numérotées par des numéros impairs, trouvent leur origine dans l'hémisphère sud et se terminent dans l'hémisphère nord ; les traces descendantes sont numérotées par des numéros pairs, trouvent leur origine dans l'hémisphère nord et se terminent dans l'hémisphère sud. (Image GoogleEarth).

2.2.2 Données géodésiques

De manière à pouvoir travailler de concert avec des données provenant de sources diverses (position des stations limnimétriques, traces satellitaires, mesures altimétriques, fenêtrage géoréférencé, etc.), il a été nécessaire de choisir un système géodésique de référence permettant de ramener ces données à un même référentiel géographique dans lequel nous allons positionner toutes les données géographiques à utiliser ; et un système géoïdal permettant de mesurer les altitudes dans un même référentiel de potentiel de gravité et notamment de s'assurer de la cohérence hydraulique par l'estimation du sens des pentes d'écoulement des eaux. Nous avons donc choisi d'une part le système géodésique WGS84 comme système de coordonnées [*latitude; longitude*], et d'autre part le modèle de géoïde EGM96 pour le nivellement des altitudes en Z .

WGS84 Le système géodésique mondial WGS84 (World Geodetic System, révision de 1984) est fréquemment utilisé comme référence, notamment par les systèmes GPS et le logiciel GoogleEarth que nous avons utilisé. Les paramètres de l'ellipsoïde de WGS84 sont :

$$\begin{cases} \text{Demi axe majeur} = 6378137,0\text{m (ou } 6378,137\text{km)} \\ \text{Applatissement} = 1/298.257223563 \end{cases} \quad (2.7)$$

Modèles géodésiques des missions altimétriques La plupart des missions satellitaires altimétriques définissent leur propre système géodésique. L'utilisation des données altimétriques va donc nécessiter un changement de référentiel géodésique avant de pouvoir être utilisées dans un référentiel commun.

EGM96 EGM96 est un modèle d'équipotentialité gravimétrique de la Terre qui s'ajuste au mieux (au sens des moindres carrés) au niveau moyen des océans. Il est modélisé par une série de coefficients d'harmoniques sphériques jusqu'à l'ordre 360.

Nous utilisons le modèle EGM96 à partir d'un fichier de type « grille » d'une résolution de 15 arcsecondes contenant les élévations du géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence WGS84. Nous pouvons ainsi calculer par interpolation, à partir de cette grille et pour chaque coordonnée (*latitude, longitude*), la hauteur du géoïde associée. La méthode d'interpolation retenue est de type bicubique comme cela est préconisé par [Kidner et al., 1999].

Notons qu'un calculateur de la hauteur du géoïde EGM96 est disponible en ligne⁹, il a permis de valider la méthode d'interpolation que nous avons implémentée.

2.2.3 Données hydrologiques

Afin de pouvoir quantifier la qualité des mesures altimétriques, une comparaison systématique entre les mesures des séries temporelles altimétriques et les mesures des séries temporelles in-situ est mise en œuvre. Nous considérons donc ces mesures in-situ comme notre réalité de terrain. Les séries temporelles mesurées in-situ sont obtenues grâce aux mesures relevées par des stations de mesures limnimétriques, implantées au sein d'un réseau hydrométrique, le long des cours d'eau.

Modes d'acquisition des mesures in-situ

Les modes d'acquisition des mesures de terrain sont de plusieurs natures. Il existe des appareils limnimètres automatisés qui relèvent et stockent les mesures à un pas de temps régulier et/ou programmé.

D'autres stations de mesures sont confiées à des opérateurs qui ont la tâche de relever une ou plusieurs fois par jour le niveau de l'eau par lecture de l'échelle limnimétrique, et de reporter ces mesures sur un cahier de relevés. Les cahiers de relevés sont ensuite collectés et assemblés pour constituer une base de données du niveau des cours d'eau.

⁹Le calculateur de la hauteur du géoïde EGM96 est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>

Imperfections des mesures in-situ

Les mesures du niveau des cours d'eau acquises aux stations limnimétriques présentent un certain nombre d'imperfections que nous énumérons ici de manière non exhaustive :

- **Précision** : La précision des mesures in-situ est de l'ordre de quelques centimètres et peut varier selon les techniques utilisées (opérateur lisant une valeur sur une échelle ou système de mesure à filtrage de l'effet des petites vagues).
- **Collecte des mesures et délais** : Sur certains bassins, le temps d'acheminement et d'intégration de nouvelles mesures au sein d'une base de données peut prendre plusieurs mois. Dans le cas du bassin amazonien par exemple, une bonne partie des stations limnimétriques sont isolées des principales infrastructures de transport (certaines voies d'eau naturelles connaissent des périodes d'étiage qui les rendent impraticables), les déplacements pouvant donc être longs, difficiles, voire dangereux.
- **Lacunes de mesures** : Du fait de ces possibles difficultés d'acheminement, il arrive que des cahiers de relevés soient perdus, les séries temporelles concernées sont alors incomplètes (trouées). Dans d'autres cas, les mesures peuvent parfois tout simplement être impossibles à relever (inondation importante, étiages pour lesquels le niveau d'eau passe en dessous du zéro de la dernière échelle graduée, etc.). Enfin, on peut constater ici et là que certaines lacunes dans les séries temporelles mesurées in-situ sont compensés par interpolation « manuelle », ce qui semble révéler l'indisponibilité temporaire de l'opérateur.
- **Nivellement altimétrique non systématique** : Un problème que l'on rencontre sur des réseaux hydrométriques très étendus est l'absence de nivellement topographique des limnimètres. Généralement ceci se produit lorsque le réseau de nivellement du ou des pays est incomplet, voire erroné. Les données des stations limnimétriques non nivelées ne permettent donc a priori qu'une comparaison relative avec les mesures altimétriques. C'est le cas de la quasi totalité des stations de mesures du bassin amazonien. Nous verrons un peu plus tard comment le nivellement d'une centaine de stations limnimétriques du bassin amazonien a été établi (cf. § 2.2.3).
- **Echantillonnage temporel approximatif** : Dans le cas d'un relevé effectué par un opérateur, il paraît légitime de se demander quelle peut être la qualité de l'échantillonnage : l'opérateur est-il ponctuel ? Une ou deux mesures par jour suffisent-elles à échantillonner correctement le signal hydrologique ?

Les mesures in-situ utilisées dans cette thèse

Bassin amazonien Les données collectées par les stations limnimétriques in-situ du bassin amazonien, gérées par l'ANA, ont joué un rôle prépondérant dans le développement de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques. Le bassin amazonien de par ses dimensions, sa variété de configurations hydrologiques, les dimensions de ses fleuves et la disponibilité de ses données in-situ est un terrain très favorable au développement des techniques d'altimétrie radar pour le suivi des eaux continentales.

- **Fournisseur de mesures du niveau des cours d'eau** : ANA¹⁰ (Agência Nacional de Águas). Projet Hybam¹¹.
- **Echantillonnage** : Journalier (2 mesures par jour à 7h00 et 17h00 moyennées pour construire une mesure à 12h00).
- **Couverture spatiale** : 302 stations limnimétriques (dont 206 sur lesquelles sont également réalisées des mesures de débit) réparties sur le bassin amazonien, mais seulement 72 de ces stations sont nivelées par rapport au niveau des moyen océans ([Kosuth et al., 2006], [Kosuth et al., 2008]). Cependant, si l'on s'intéresse au taux de données disponibles pour une période donnée, ces chiffres

¹⁰<http://www.ana.gov.br/>

¹¹<http://www.mpl.ird.fr/hybam/>

diminuent. Ainsi par exemple, pour la première orbite de Topex/Poseidon (septembre 1993 à août 2002), seulement 183 stations non nivelées et 60 stations nivelées fournissent des mesures pour au moins 75% de la durée de la mission (voir la carte des stations limnimétriques du bassin, fig. 2.6).

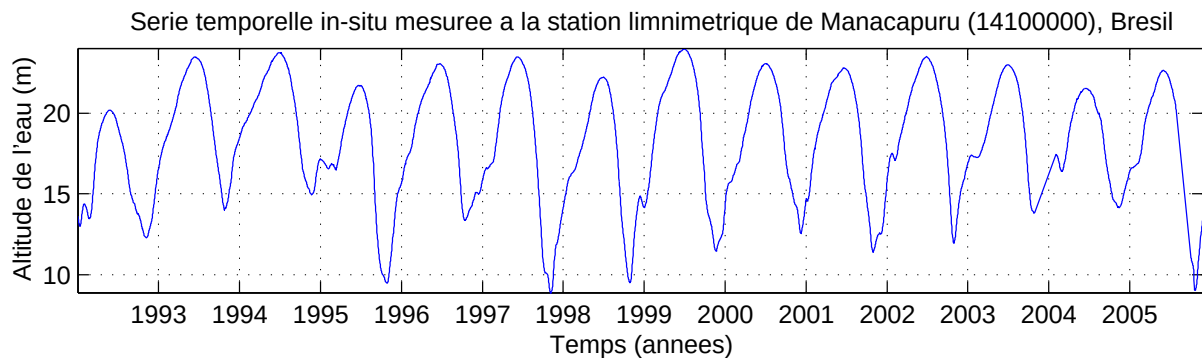


FIG. 2.5: Exemple de série temporelle mesurée in-situ (échantillonnage journalier) obtenue à la station limnimétrique de « Manacapuru (14100000) », au Brésil, sur le réseau de mesure de l'ANA.

Nivellement altimétrique des stations limnimétriques du bassin amazonien Le nivellement de 98 stations limnimétriques a été établi par Kosuth et al. ([Kosuth et al., 2006], [Kosuth et al., 2008]) sur la base des mesures altimétriques fournies par Topex/Poseidon (produit AVISO/M-GDR + correction de troposphère humide recalculée, cf. § 1.2.2) et de campagnes de mesures GPS. Les mesures altimétriques de Topex/Poseidon ont été utilisées pendant leur période de hautes eaux où elles sont en très bonne adéquation, à un biais près que l'on recherche, avec les mesures in-situ.

Ce travail de nivellement s'appuie sur la quantification des maxima locaux annuels du niveau des eaux mesurés par altimétrie radar aux stations virtuelles. Pour chaque année, la connaissance des maxima annuels en divers points d'un cours d'eau (abscisse curviligne) permet de reconstruire, par une technique d'interpolation, le profil de l'enveloppe supérieure annuelle de la ligne d'eau. Il est alors possible de connaître le niveau annuel atteint en tout point du cours d'eau et notamment aux stations limnimétriques in-situ. En comparant, pour une station limnimétrique et une année donnée, la hauteur de l'enveloppe supérieure annuelle avec la valeur maximale annuelle mesurée à cette station, on obtient une valeur de nivellement altimétrique du zéro de l'échelle. En répétant cette opération pour toutes les années de données disponibles à la station, on obtient une estimation plus précise du nivellement altimétrique.

Notons que la méthode d'interpolation entre stations mise en œuvre utilise une interpolation polynômiale avec une contrainte de minimisation de l'énergie du profil¹².

Enfin, le lecteur pourrait être surpris de constater que des données altimétriques ait été utilisées pour corriger des données in-situ que nous avons par ailleurs comparé à des données altimétriques ! Effectivement, cela peut paraître absurde, mais le nivellement des stations limnimétriques, même dans un référentiel altimétrique relatif (celui de Topex/Poseidon dans notre cas) permet de représenter des profils de ligne d'eau à un instant donné. Le nivellement des stations limnimétriques dans un référentiel altimétrique quelconque mais commun est une nécessité pour la mise en œuvre de la Méthode de Reconstitution des Séries Temporelles In-Situ présentée au § 5.2 du chapitre 5.

2.3 Sources de données altimétriques utilisées dans cette thèse

Il existe une très grande gamme de produits issus de l'altimétrie radar : chaque mission altimétrique, mise en place pour des besoins et objectifs sensiblement différents, a embarqué différents types de cap-

¹²Revient à minimiser le carré de la dérivée seconde de $Z(x, t_N)$, le niveau du cours d'eau Z à l'instant $t = t_N$ fixé (instant du maximum annuel), selon le profil curviligne x . Cette technique d'interpolation est décrite au § 5.2.

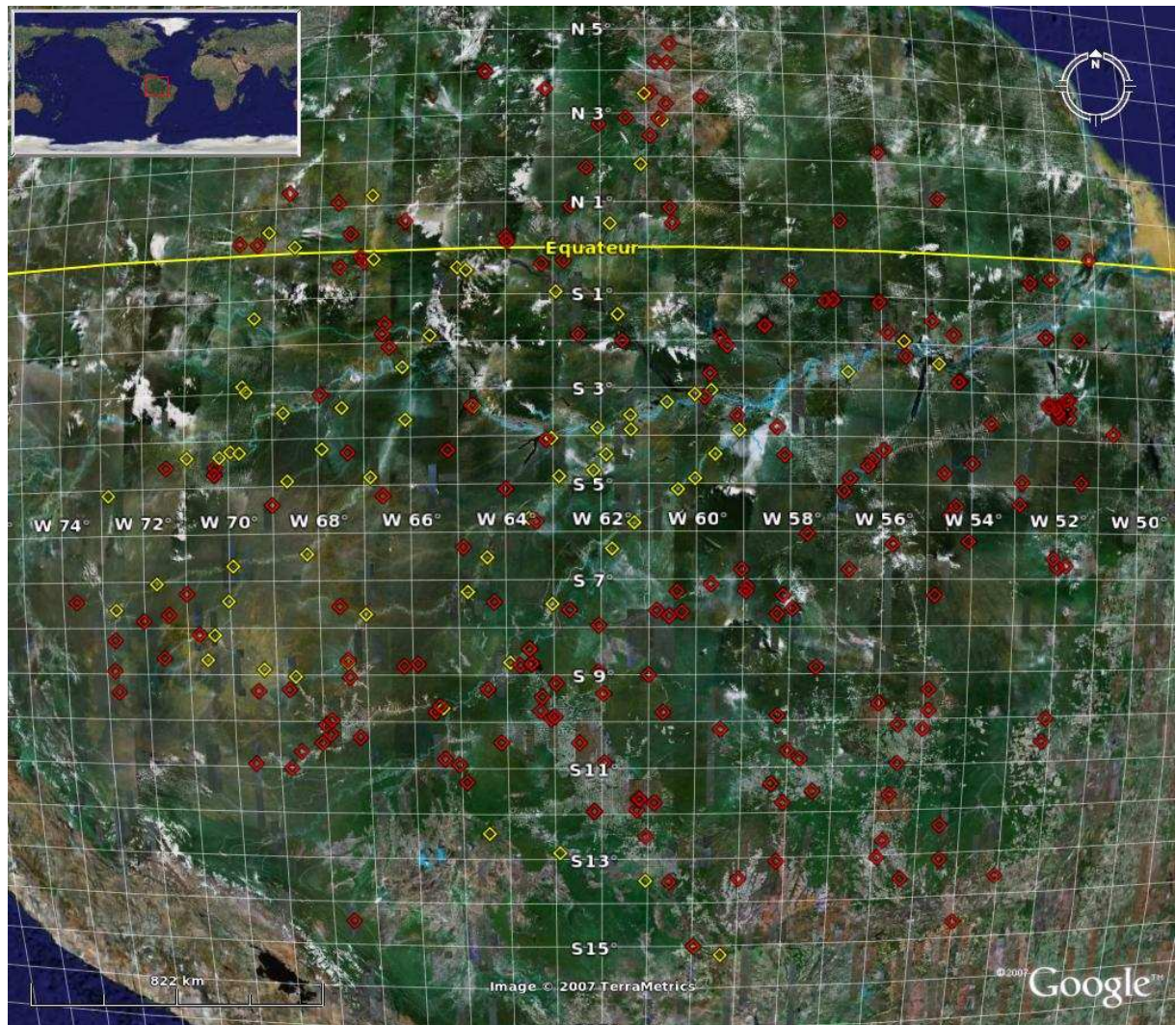


FIG. 2.6: Carte des 302 stations limnimétriques du bassin amazonien (Brésil) fournissant des mesures de niveaux des cours d'eau (losanges rouges). Seuls les losanges jaunes représentent des stations limnimétriques dont l'altitude du zéro de l'échelle est nivelé par rapport au niveau des moyen océans (98 en tout, voir [Kosuth et al., 2006]).

teurs spécialisés pour telle ou telle mesure : hauteur des eaux et des vagues, vitesse du vent, temps de propagation des ondes dans l'atmosphère (bandes C , K_u , etc.), etc.

2.3.1 Généralités concernant sur les produits altimétriques

Les produits altimétriques (défini au § 2.1.2) sont fournis pour différents niveaux d'interprétation des mesures acquises par les différents capteurs. Les produits dits de « niveau 1 », communément appelés SGDR (de l'anglais : « Sensor Geophysical Data Records ») sont, comme leur nom l'indique, très proches du capteur et de la technique de mesure. Ils sont donc principalement destinés à des utilisateurs experts. Des produits de niveau 1-intermédiaires permettent d'accéder notamment aux formes d'ondes radar tout en proposant d'autres grandeurs d'un niveau d'interprétation plus élaboré.

Enfin, les produits de niveau 2 sont pleinement utilisables dans le cadre de ces travaux de thèse (sous seule contrainte de lecture des formats spécifiques) : ils ne contiennent plus les formes d'ondes radar, mais l'estimation du range associé. Ces produits contiennent également un certain nombre de grandeurs physiques dont de multiples corrections instrumentales, atmosphériques et géophysiques qui sont indispensables pour atteindre le niveau de précision requis par l'altimétrie radar appliquée au suivi des cours d'eau.

D'une manière générale, ces produits proposent un compromis entre le temps de traitement nécessaire à leur génération et leur niveau d'interprétation et de précision, notamment en ce qui concerne le calcul des orbites. Les produits de niveaux 1-intermédiaires permettent une utilisation en quasi temps-réel (délais de quelques heures à quelques jours), alors que les produits de niveau 2 sont disponibles après plusieurs semaines de traitements. Ils bénéficient parfois de révisions et d'amélioration grâce à l'amélioration des chaînes de traitements et des modèles employés (modèles météo, calcul de corrections, etc.).

Le présent travail de thèse est consacré à la caractérisation de la qualité des produits altimétriques et à ce titre nous n'avons pas généré de nouveau produit¹³, ni amélioré de produit existant. Nous avons essentiellement utilisé des produits altimétriques de « niveau 2 » (fournis par de grands organismes comme le CNES), ainsi que des produits alti-hydrologiques (fournis par différents groupes de recherche : base de données HydroWeb du LEGOS, projets CASH et « River & Lake »). La liste de produits utilisés dans cette thèse est proposée plus loin dans cette section, à la page 66.

Structure des produits altimétriques

Les produits altimétriques, aussi dénommés GDRs (pour « Geophysical Data Record ») sont organisés en dossiers, à raison d'un dossier par cycle. Chacun de ces dossiers contient des fichiers de traces, à raison d'un fichier par trace, et facilement repérable par son numéro. Les fichiers de traces contiennent la totalité des enregistrements altimétriques (ou géophysiques) acquis pendant la durée d'opération du satellite sur cette trace, pour le cycle en question. Les enregistrements altimétriques sont aussi appelés SDR (pour « Scientific Data Record »).

Les enregistrements altimétriques contiennent les variables qui nous intéressent pour le suivi des eaux continentales : mesures du range et altitude du satellite, dates et coordonnées des mesures altimétriques, corrections instrumentales et géophysiques, etc. D'autres variables géophysiques dédiées au suivi des océans (ou autres applications) sont également présentes dans les enregistrements altimétriques mais ne nous seront a priori pas utiles. La figure 2.7 schématise l'organisation des produits altimétriques.

¹³ Ainsi que nous n'avons pas mené de travaux sur le traitement des formes d'onde radar (techniques dites de « retracking », permettant d'estimer les valeurs de range).

Les enregistrements altimétriques décrivent en général une mesure qui est en fait la moyenne de plusieurs mesures acquises à un pas de temps plus fin (les mesures altimétriques individuelles), mais contiennent toutefois de quoi les reconstituer partiellement, ce point est abordé en détail dans la section 3.4.

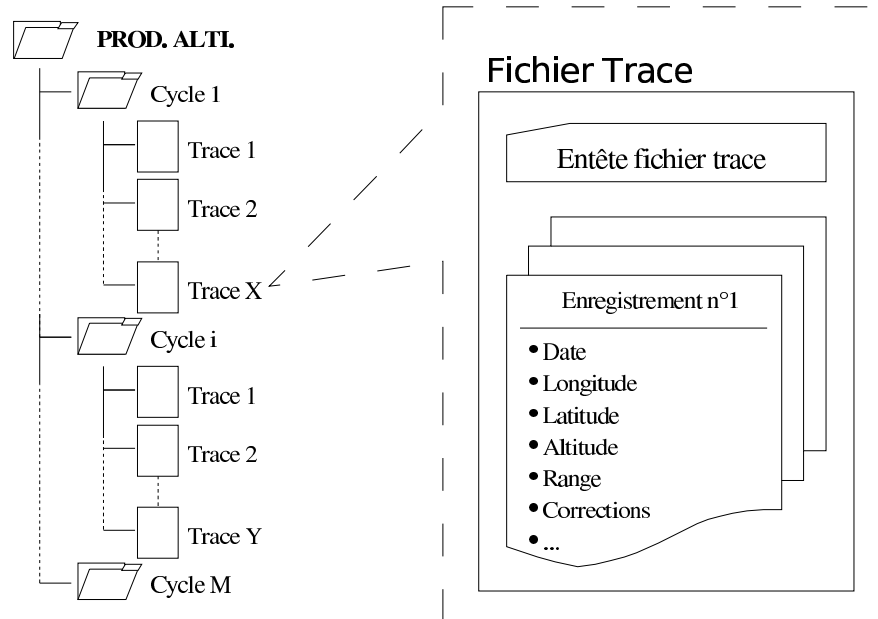


FIG. 2.7: Illustration schématique de la structure des fichiers constituant un produit altimétrique. Les produits altimétriques sont généralement délivrés sous forme de CD/DVD-Rom ou accessibles en téléchargement par serveur FTP.

Structure des produits alti-hydrologiques

Les produits alti-hydrologiques sont simplement constitués d'une série de fichiers, à raison d'un fichier par série temporelle altimétrique, et donc par station virtuelle. Les formats utilisés sont généralement des formats standards qui rendent leur utilisation aisée, citons notamment les formats : fichiers texte à colonnes séparées (fichiers .csv), XML¹⁴ (pour "eXtensible Markup Language"), NetCDF¹⁵. La plupart du temps, les fichiers d'un produit alti-hydrologique se limitent à ne fournir que le strict minimum permettant de représenter les séries temporelles : les dates et les valeurs du niveau des cours d'eau.

Comment obtenir des produits altimétriques ou alti-hydrologiques

Il existe de nombreux produits altimétriques et de nombreux moyens de les obtenir, néanmoins, nous avons regroupé ici un certain nombre de pistes susceptibles d'éclairer le lecteur :

AVISO Les produits AVISO (Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques) sont accessibles par le biais de divers moyens dont un serveur FTP ou un abonnement aux CD ou DVD des produits altimétriques.

- **Site web** : <http://www.jason.oceanobs.com/>. Le site web AVISO propose un catalogue des données issues de l'altimétrie satellitaire radar. Ce catalogue décrit succinctement les produits, leurs périodes de diffusion ainsi que les différents supports ou modes de distributions possibles.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons opté pour l'abonnement aux M-GDRs Topex/Poseidon délivrés sous forme de CD-Rom pour la période 1993-2002 et sous forme de DVD-Rom (contenant également

¹⁴Voir notamment : http://fr.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language

¹⁵Le format NetCDF est un format auto descriptif. On peut trouver de nombreux outils de lecture gratuits sur le site officiel : <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>.

les GDRs Jason-1) pour la période 2002 à nos jours. Depuis la fin 2005, les DVD-Rom ne contiennent plus que des GDRs Jason-1 puisque Topex/Poseidon a été mis hors service et placé sur une orbite « cimetière ».

CLS Les produits altimétriques CLS (Collecte Localisation Satellites) issus du retracking des formes d'ondes de Topex/Poseidon ont été obtenus dans le cadre d'une collaboration entre l'UMR TETIS et CLS et n'est pas distribué publiquement.

- **Site web** : <http://www.cls.fr/>

CASH Le produit alti-hydrologique CASH (Contribution de l'Altimétrie Spatiale à l'Hydrologie) a été généré par CLS dans le cadre du projet CASH, à partir du produit altimétrique CLS que nous traitons également dans cette thèse. Les données disponibles concernent uniquement la mission altimétrique Topex/Poseidon.

- **Site web** : <http://ocean.cls.fr/cash>

HydroWeb Le produit alti-hydrologique HydroWeb est élaboré par l'équipe GOHS (Géodésie, Océanographie et Hydrologie Spatiales) du LEGOS (Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales). Le site internet d'HydroWeb permet de télécharger des séries temporelles alti-hydrologiques du niveau de fleuves, zones d'inondation, lacs et réservoirs acquises sur la plupart des grands bassins fluviaux du globe. Les données disponibles concernent principalement les missions altimétriques Topex/Poseidon et ENVISAT.

- **Site web** : <http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/>

River & Lake Les produits alti-hydrologiques « River & Lake Hydrology » sont issus du travail mené dans le cadre du projet « River & Lake » (ESA). Ils sont construits à partir des formes d'onde des missions altimétriques ERS-2 et ENVISAT extraites sur un échantillon de stations virtuelles sur quelques grands fleuves du globe. Ces formes d'ondes sont retraitées (« retrackées ») par un système expert qui intègre une douzaine d'algorithmes de retracking spécialisés [Berry et al., 1997]. Chacun des deux produits alti-hydrologiques fournit des séries temporelles, chacune issue d'une mission altimétrique sur une station virtuelle. Ces produits sont partiellement disponibles sur le site Web de l'ESA¹⁶ et peuvent être obtenus sur demande en format ASCII ou XML¹⁷.

- **Site web** : <http://earth.esa.int/riverandlake/>
- **Serveur FTP** : <ftp://styx.esrin.esa.it/pub/apm/riverandlake/>

Autres ressources sur les produits altimétriques

D'autres ressources liées à l'altimétrie satellitaire radar sont disponibles notamment sur internet :

- Le site web <http://www.altimetry.info/> qui est un condensé de ce qui se fait aujourd'hui en altimétrie radar
- La Toolbox BRAT (pour BRAT : « Basic Radar Altimetry Toolbox ») qui est une boîte à outils permettant de manipuler et de traiter les données issues de nombreux produits altimétriques. BRAT est un logiciel libre disponible pour les systèmes Windows et Linux, et téléchargeable gratuitement sur le site web cité ci-dessus.
- Un tutoriel de trois-cent pages « Radar Altimetry Tutorial » [Rosmorduc et al., 2006] qui contient d'intéressantes informations sur l'altimétrie satellitaire radar nadir et ses applications.

¹⁶Voir <http://earth.esa.int/riverandlake/>.

¹⁷Nous n'avons pas eu accès au format XML du produit décrit dans la documentation [RLH, 2006].

2.3.2 Les produits altimétriques utilisés dans cette thèse

Différentes sources de données altimétriques ont été utilisées pendant cette thèse, ce qui a permis dans un premier temps de travailler sur plusieurs jeux de données, de façon à généraliser et à assurer la robustesse et la générique de la méthode de quantification de la qualité des séries temporelles altimétriques.

Voici une liste détaillée, produit par produit, des données altimétriques que nous avons utilisées. Les produits sont désignés par la notation suivante : « **Fournisseur - mission(s) altimétrique(s) - format** »

Pour chaque produit, les points « Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales » et « Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique » décrivent la configuration du produit utilisée :

- Le point « Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales » décrit les corrections qui sont appliquées au range afin de le corriger : des variations de célérité dans les différentes couches de l'atmosphère et des perturbations instrumentales. Toutes les corrections utilisées sont celles qui sont fournies dans les produits altimétriques ; elles ne sont pas appliquées par défaut à la valeur du range qui est fournie. Ce point permet donc de faire le bilan des corrections du range que nous avons choisi d'utiliser.
- Le point « Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique » décrit les critères de rejets des mesures individuelles lors de la lecture des produits altimétriques. Les noms des variables employés ici sont ceux qui sont utilisés dans les manuels utilisateurs respectifs des produits altimétriques.

AVISO - Topex/Poseidon - M-GDR

- **Fournisseur** : CNES/AVISO (ou NASA/PODAAC).
- **Mission(s)** : Topex/Poseidon.
- **Type** : Produit altimétrique.
- **Organisation & format des fichiers** : M-GDR (texte/binaire). Un sous-dossier par cycle, contenant chacun un fichier par trace.
- **Période de disponibilité** : septembre 1993 à novembre 2005 (changement d'orbite en août 2002).
- **Couverture** : Globale ($\pm 66^\circ$ en latitude).
- **Orbite(s)** : TPa/J1/J2 (ou TP), TPb.
- **Périodicité des cycles** : 10 jours (9,9156 jours exactement).
- **Nombre de traces** : 254.
- **Ellipsoïde de référence** : Demi-axe majeur = 6378136.3m ; aplatissement = $1/298,257$.
- **Géoïde fourni** : EGM96, mais seulement pour des mesures moyennées à 1Hz.
- **Fréquence des mesures** : 10Hz le long de la trace.
- **Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales** :
 - les corrections instrumentales sont intégrées par défaut dans les valeurs de range mesurées
 - correction de troposphère sèche (Dry_Corr, ordre de grandeur : $2.308m \pm 0.004m$)
 - les corrections suivantes n'ont pas été appliquées par manque de disponibilité : troposphère humide (Wet_Corr), marée solide (H_Set)
- **Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique** :
 - H_Alt_H(i)=valeur par défaut (32767)
 - Sat_Alt_H(i)=valeur par défaut (32767)
 - Nval_H_Alt=0
 - Sigma0_K=valeur par défaut (65535) ou Sigma0_K>7.0dB
 - Filtrage global (avec $K = 3$) sur les variables H_Alt et Sat_Alt
- **Commentaires** : Le manuel d'utilisateur [AVI, 1996], indispensable à l'exploitation de ce produit, décrit en détail la structure des fichiers des M-GDRs et les variables qui y sont enregistrées.

CLS - Topex/Poseidon - « ENVISAT-L2 »

- **Fournisseur** : CLS (Collecte Localisation Satellites)
- **Mission(s)** : Topex/Poseidon.
- **Type** : Produit altimétrique.
- **Organisation & format des fichiers** : Format de fichiers de type « Envisat L2 » (texte/binaire). Un dossier par bassin, un dossier par cycle, un fichier par trace.
- **Période de disponibilité** : septembre 1993 à août 2002.
- **Orbite(s)** : TPa/J1/J2.
- **Périodicité des cycles** : 10 jours (9.9156 jours exactement).
- **Couverture** : Découpée en bassins fluviaux (Amazone, Congo, Danube, Fleuve Jaune, Gange, La Plata, Lena et Mékong).
- **Nombre de traces** : 254.
- **Ellipsoïde de référence** :
- **Géoïde fourni** : N.C.
- **Fréquence des mesures** : 10Hz le long de la trace.
- **Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales** :
 - utilise les corrections recalculées pour l'occasion à partir des modèles de l'ECWMF¹⁸ [Mercier et Zanife, 2006].
- **Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique** :
 - Sélection des variables dont le coefficient de rétrodiffusion est compris dans la plage : $\sigma_0 \in [0.0; 100.0]$, σ_0 étant exprimé en (10^{-2} dB).
- **Commentaires** : Ce produit est issu d'un travail mené par CLS dans le cadre du projet CASH. Il présente l'originalité de reprendre les formes d'ondes radar de Topex/Poseidon, traitées à l'aide du segment sol de la mission ENVISAT. Ce produit est particulièrement intéressant car il propose quatre interprétations différentes du range, estimées par les quatre algorithmes « Ocean », « Ice1 », « Ice2 » et « SeaIce » implémentés dans ce segment sol. Il est conditionné au format des GDRs de la mission altimétrique ENVISAT. Les manuels [ESA, 2006] et [ESA, 2003] décrivent en détail la structure des fichiers et les variables qui sont disponibles dans ce format de produit.

CASH - Topex/Poseidon - NetCDF

- **Fournisseur** : Projet « CASH » (généré par CLS).
- **Mission(s)** : Topex/Poseidon.
- **Type** : Produit alti-hydrologique.
- **Organisation & format des fichiers** : Un fichier décrivant la série temporelle alti-hydrologique par station virtuelle. Format NetCDF (Network Common Data Form).
- **Période de disponibilité** : septembre 1993 à août 2002.
- **Couverture** : Sélection de stations virtuelles sur quelques grands bassins fluviaux.
- **Orbite(s)** : TPa/J1/J2.
- **Périodicité des cycles** : 10 jours (9.9156 jours exactement).
- **Nombre de traces** : Parmi 254 traces : restreint aux choix des stations virtuelles.
- **Ellipsoïde de référence** : mesures non géoréférencées.
- **Géoïde utilisé** : N.C.
- **Fréquence des mesures** : une mesure par cycle.
- **Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales** : N.C.
- **Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique** : N.C.
- **Commentaires** : Ce produit alti-hydrologique est un produit dérivé du produit « CLS- Topex/Poseidon- ENVISAT/L2 ».

¹⁸The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <http://www.ecmwf.int/>

« River & Lake Hydrology » (River & Lake - ERS-2/ENVISAT - RLH/ASCII)

- **Fournisseur** : « River & Lake », Projet ESA- De Montfort University (E.A.P.R.S. Department) - Lancaster University
- **Mission(s)** : ERS-2 et ENVISAT.
- **Type** : Produits alti-hydrologiques ($\times 2$).
- **Organisation & format des fichiers** : Un fichier par série temporelle alti-hydrologique, une série temporelle par station virtuelle et par trace. Format RLH ASCII.
- **Période de disponibilité** : ERS-2 : 1995-2003, ENVISAT : 2003-2007.
- **Couverture** : Sélection de stations virtuelles définies par le Cemagref (UMR TETIS, N. Bercher et P. Kosuth).
- **Orbite(s)** : ERS2/Envisat
- **Périodicité des cycles** : 35 jours.
- **Nombre de traces** : Parmi 1002 traces : restreint aux choix des stations virtuelles.
- **Ellipsoïde de référence** : mesures non géoréférencées (extractions dans WGS84).
- **Géoïde utilisé** : EGM96.
- **Fréquence des mesures** : une mesure par passage.
- **Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales** : N.C.
- **Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique** : N.C.
- **Commentaires** : Le chaîne de génération « RLH » est appliquée d'une part aux mesures altimétriques issues d'ERS-2 et d'autre part aux mesures issues d'ENVISAT, composant ainsi deux produits alti-hydrologiques distincts. Il existe également un produit altimétrique (donc plus complet) fourni par River & Lake, nommé « RLA » (pour « River & Lake Altimetry ») délivré en format binaire.

Notons que dans le cas des produits altimétriques, l'analyse de la qualité des mesures altimétriques nécessite de procéder à la construction d'un (ou plusieurs) produits alti-hydrologiques. Ceci est opéré à l'aide d'un fenêtrage géographique à la station virtuelle et de l'application de modules de sélection et de filtrage des mesures altimétriques (cf. chapitre 3).

De nombreux produits alti-hydrologiques ont été générés dans le cadre de cette thèse (cf. chapitre 7, section 7.2.2, page 174).

2.3.3 Dénomination des produits alti-hydrologiques, stations virtuelles et séries temporelles altimétriques

Dénomination des produits alti-hydrologiques

Puisque de multiples produits alti-hydrologiques peuvent être générés à partir d'un seul produit altimétrique, il est important de fixer une règle permettant de les nommer.

Le nom d'un produit alti-hydrologique doit comporter :

- le nom du fournisseur du produit altimétrique dont il est issu,
- le nom de format du produit altimétrique,
- le nom de l'algorithme de « (re)tracking » du produit altimétrique (un produit altimétrique peut contenir des valeurs de range issues de plusieurs trackers),
- une suite de sigles permettant d'identifier la chaîne de traitements appliquée aux séries temporelles altimétriques.

Par exemple, pour un produit alti-hydrologique généré à partir du produit AVISO/M-GDR auquel la chaîne suivante a été appliquée, et dans cet ordre :

- critères de sélection des mesures AVISO, sigle « aec » (pour "AVISO Editing Criteria"),
- sélection d'une mesure représentative par passage du satellite, sigle « opp » (pour "One per passage"),
- filtrage global avec $K = 3$, sigle « fg3 » (pour "Filtre Global" avec $K = 3$),

- filtrage calendaire récursif¹⁹ avec $K = 2, 5$, sigle « fcr2p5 » (pour "Filtre Calendaire Récursif", avec $K = 2, 5$), sera nommé :

« AVISO/M-GDR/aec-opp-fg3-fcr2p5 »

Généralement, la combinaison d'un nom de fournisseur et d'un nom de produit permet d'identifier la mission altimétrique. Dans l'exemple que nous venons de voir, la mission est « Topex/Poseidon ». Les filtres cités ici en exemple sont présentés au chapitre 3 de ce mémoire.

Dénomination des stations virtuelles

Un produit alti-hydrologique est constitué de multiples séries temporelles altimétriques, chacune ayant été extraite à l'aide d'une station virtuelle, sur un fleuve donné. De même que pour les produits alti-hydrologiques, une règle de dénomination des stations virtuelles a été définie.

Le nom d'une station virtuelle doit contenir :

- un sigle permettant d'identifier l'orbite sous laquelle la station virtuelle se situe,
- le nom de la (les) trace(s) de cette orbite contribuant à la station virtuelle,
- le nom du fleuve sur lequel les mesures altimétriques sont acquises,
- un identifiant permettant de désigner le numéro de l'intersection trace/fleuve, puisque un fleuve peut être intersecté plusieurs fois par une même trace,

Le sigle permettant de désigner une orbite a son importance et ceci pour plusieurs raisons :

- une orbite peut être utilisée par plusieurs missions altimétriques, c'est le cas par exemple de la première orbite de Topex/Poseidon (1993-2002) et l'orbite actuelle de Jason-1 (depuis 2002),
- une mission altimétrique peut avoir utilisé plusieurs orbites, c'est le cas par exemple des missions ERS-1 et Topex/Poseidon,

Remarque : Pour chacun des produits altimétriques cités au § 2.3.2 (page 66), la liste des sigles des orbites utilisées par la mission altimétrique concernée est fournie (Voir « Orbite(s) »).

Exemple : Deux stations virtuelles situées à la première et la deuxième intersection entre le fleuve Solimões et la trace 63 de la première orbite de Topex/Poseidon, seront nommées respectivement :

« TP-063A-Solimoes » et « TP-063B-Solimoes »

Dénomination des séries temporelles altimétriques

Enfin, les séries temporelles altimétriques doivent elles aussi être nommées de manière unique au sein du produit alti-hydrologique dont elles font partie.

Le nom d'une série temporelle altimétrique doit comporter les éléments suivants :

- le nom de la station virtuelle où elle a été acquise,
- le nom du tracker utilisé pour l'interprétation du range, puisque la station virtuelle fournit autant de séries temporelles qu'il y a de trackers,

Ainsi, une série temporelle altimétrique issue de la station virtuelle « TP-063B-Solimoes », et mesurée à l'aide du tracker « Ice2 » sera nommée :

« TP-063B-Solimoes-ice2 »

L'appartenance de cette série temporelle altimétrique à un produit alti-hydrologique permet de déterminer la mission altimétrique, le produit et le fournisseur de son produit altimétrique d'origine.

¹⁹ Les deux autres paramètres du filtrage calendaire $\Delta T/2 = 15$ jours et $qT = 1$ jour sont considérés comme des constantes dans nos applications, voir § 3.8.2.

Chapitre 3

GÉNÉRATION DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES À PARTIR DE PRODUITS ALTIMÉTRIQUES (DE NIVEAU 2)

Sommaire

3.1	Introduction à la génération des produits alti-hydrologiques	72
3.1.1	Principe	72
3.1.2	Intérêt pour la thèse	73
3.2	Application de critères de sélection des mesures altimétriques individuelles	73
3.3	Référencement des mesures altimétriques dans un système géodésique commun .	73
3.4	Construction des mesures altimétriques individuelles à haute fréquence	75
3.5	Extraction géoréférencée des mesures altimétriques	77
3.6	Corrections du range et construction de la mesure altimétrique du niveau de l'eau	81
3.6.1	Corrections du range	81
3.6.2	Construction des mesures altimétriques individuelles	82
3.6.3	Calcul de l'altitude orthométrique à l'aide d'un modèle du géoïde terrestre . .	82
3.7	Sélection d'une mesure représentative par passage sur site du satellite	82
3.8	Méthodes de filtrage	84
3.8.1	Filtrage « global »	84
3.8.2	Filtrage « calendaire » par fenêtre glissante et superposition des hydrogrammes annuels	86
3.8.3	Filtrage « calendaire » : variante récursive	87
3.9	Annexe : Calcul de la dispersion des mesures	87
3.10	Conclusions	90

3.1 Introduction à la génération des produits alti-hydrologiques

Comme nous le verrons ultérieurement, la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques permet de quantifier la qualité d'un certain type de produits dérivés des mesures d'altimétrie radar : les « produits alti-hydrologiques » (cf. définition au § 2.1.2, page 49). Cependant, les produits alti-hydrologiques sont à l'heure actuelle relativement rares : ils sont généralement élaborés par des équipes de recherche ou des opérateurs affiliés pour des besoins très spécifiques (par exemple dans le cadre du projet « CASH¹ » [Seyler et al., 2006; Mercier et Zanife, 2006]).

D'autre part, la complexité des formats de fichiers des produits altimétriques rend leur utilisation relativement difficile pour une utilisation opérationnelle en hydrologie. En effet, les produits altimétriques disponibles à l'heure actuelle sont issus de missions altimétriques spécifiques, lesquelles ont été développées pour mesurer un certain ensemble de grandeurs physiques et géophysiques à l'aide de capteurs spécialisés. De ce fait, chaque produit altimétrique est conditionné à l'aide d'un format de fichier développé pour satisfaire à ces besoins.

La nécessité d'une chaîne de génération de produits alti-hydrologiques « générique » est bien réel, la chaîne définie ici permet de générer aisément des produits alti-hydrologiques ou simplement une série temporelle alti-hydrologique à partir de multiples formats de produits altimétriques² (dont la liste est extensible).

Notons également l'existence de la récente boîte à outils **BRAT**³ (de l'anglais « Basic Radar Altimetry Toolbox », cf. [Rosmorduc et al., 2006]), implémentée sous la forme d'un logiciel libre multiplateforme doté d'une interface graphique et de bibliothèques permettant la lecture et la manipulation de multiples formats de produits altimétriques. La boîte à outils BRAT n'a pas été utilisée pour les travaux de cette thèse puisqu'elle a été diffusée alors que les outils de la thèse étaient dans un stade relativement avancé.

La chaîne de génération des produits alti-hydrologiques que nous avons développée est présentée en détail dans ce chapitre.

3.1.1 Principe

En premier lieu, rappelons nous qu'un produit alti-hydrologique consiste en un ensemble de séries temporelles alti-hydrologiques. Les données altimétriques permettant de générer une série temporelle alti-hydrologique sont extraites depuis une station virtuelle, par extraction des mesures altimétriques individuelles dans une fenêtre géoréférencée.

La chaîne de génération que nous proposons permet de construire des produits alti-hydrologiques à partir de produits altimétriques de niveau 2 (cf. § 2.3). Ceci est principalement dû au fait que nous n'avons pas développé, ni mis en œuvre dans cette thèse, d'algorithme de retracking des formes d'ondes radar ; ce type de traitement étant relativement lourd tant sur le plan matériel que logiciel.

La chaîne que nous avons développée est composée de modules de traitements paramétrables, sorte de boîte à outils, que l'on peut chaîner les uns à la suite des autres, selon les besoins. Pour générer un produit alti-hydrologique à partir d'un produit altimétrique, les données suivantes sont donc nécessaires en entrée de la chaîne :

1. un produit altimétrique de « niveau 2 » ainsi que l'ensemble des informations nécessaires à son interprétation (unité des grandeurs, systèmes de référence, etc.)
2. les informations de définition de multiples stations virtuelles

¹ Visiter http://www.cls.fr/html/oceano/general/applications/cash_fr.html pour plus d'informations.

² Les formats de produits altimétriques actuellement supportés sont : AVISO Topex/Poseidon M-GDR ; ESA ENVISAT « L2 product » et sa version adaptée par CLS pour le produit Topex/Poseidon « retracké » ; fichiers NetCDF (décrit généralement des produits alti-hydrologiques) ; fichiers texte ASCII à colonnes séparées (csv) ; fichiers Microsoft Excel.

³ BRAT est disponible gratuitement en téléchargement à l'adresse : <http://www.altimetry.info>.

3. les informations de paramétrage et d'ordonnancement des modules de la chaîne que l'on souhaite utiliser

Aussi, les choix faits lors de la définition d'une chaîne de génération particulière vont avoir un impact sur la qualité globale du produit généré.

Enfin, notons qu'il est possible d'ajouter de nouveaux modules dans la boîte à outils de la chaîne de génération des produits alti-hydrologiques.

3.1.2 Intérêt pour la thèse

Nous tirons d'autres bénéfices de l'implémentation de la chaîne de génération des produits alti-hydrologiques que ceux énoncés ci-dessus :

- (1) L'aspect modulaire de la chaîne de génération nous permet de générer de multiples produits alti-hydrologiques à partir d'un seul produit altimétrique, en lui appliquant différentes chaînes,
- (2) Le fait de contrôler complètement la chaîne nous permet de générer des produits dont nous connaissons parfaitement les caractéristiques,
- (3) Il est possible de mener des études comparatives sur la qualité des produits alti-hydrologiques résultants de telle ou telle configuration de la chaîne de génération.

L'un des objectifs de la thèse est de caractériser l'erreur des mesures altimétriques en fonction de certains attributs de génération des produits alti-hydrologiques, cette tâche est rendue possible grâce à cette implémentation.

La génération des séries temporelles altimétriques sur les plans d'eau suit 6 étapes selon le schéma synthétique de la figure 3.13.

3.2 Application de critères de sélection des mesures altimétriques individuelles

Les critères de sélection des mesures altimétriques individuelles sont un ensemble de règles permettant de supprimer des mesures jugées non réalistes. D'une manière générale, les critères de sélection ne portent pas sur la valeur finale des mesures altimétriques individuelles, mais seulement sur les variables qui l'accompagnent dans les enregistrements altimétriques (diverses grandeurs physiques et variables d'état fournies dans les enregistrements altimétriques).

Les manuels utilisateur des produits altimétriques décrivent les critères qu'il est recommandé d'appliquer afin d'éliminer les mesures jugées non valides. Ces critères sont bien entendu définis pour des mesures acquises en milieu océanique, et nous les adaptons au milieu continental de manière à obtenir des produits altimétriques avec un minimum de mesures aberrantes.

D'une manière générale, l'application de ces critères s'effectue lors de la lecture des fichiers des produits altimétriques. Les critères de sélection des mesures altimétriques individuelles que nous avons appliqué sont décrits pour chacun des produits altimétriques au § 2.3.2 (notons qu'ils ne concernent que les produits altimétriques - AVISO et CLS dans notre cas - et non pas aux produits alti-hydrologiques qui sont des produits « finis »).

3.3 Référencement des mesures altimétriques dans un système géodésique commun

La première phase de la construction des séries temporelles altimétriques consiste en un changement de système géodésique de référence. Les produits altimétriques utilisent généralement un système géodésique propre à la mission altimétrique dont ils sont issus (modèle ellipsoïdal terrestre à deux paramètres : longueur du demi axe majeur et coefficient d'aplatissement). Il est donc nécessaire pour la suite des

évènements de placer de manière systématique toutes les mesures altimétriques dans le même système géodésique.

La méthode utilisée pour le changement de système géodésique met en œuvre une transformation en deux étapes : (1) passage des coordonnées « LLA » (Latitude, Longitude, Altitude) du produit altimétrique vers des coordonnées « ECEF » (Earth-Centered, Earth-Fixed, utilisé notamment par les systèmes GPS) ; puis (2) passage des coordonnées ECEF en coordonnées LLA dans le système géodésique choisi.

Dans la pratique, nous avons choisi d'utiliser pour nos travaux le système géodésique WGS84.

Le système ECEF trouve son origine au centre de gravité de la Terre (« Earth-Centered »), localisé précisément grâce au suivi des orbites de nombreux satellites. Les axes x, y et z suivent la rotation de la Terre (« Earth-Fixed »), l'axe z traversant le pôle nord et les axes x, y définissant le plan équatorial, l'axe x intersectant le méridien de Greenwich.

Les équations de passages d'un système LLA vers ECEF et inversement sont décrites ci-dessous : Soit $[X, Y, Z]$ un point de l'espace ECEF et son homologue LLA $[\phi, \alpha, h]$:

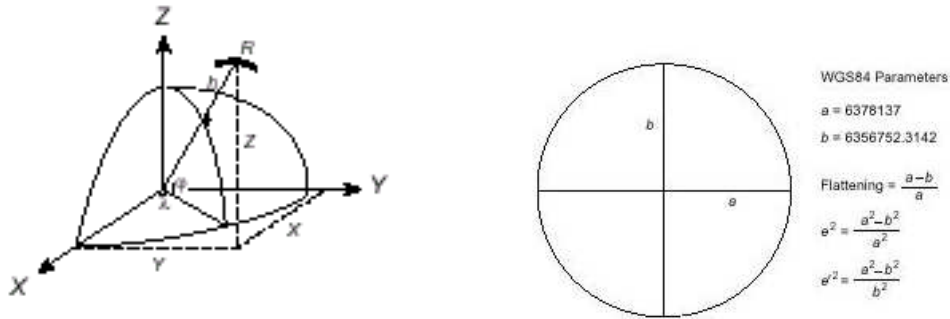


FIG. 3.1: Schémas pour le passage du système LLA vers ECEF et réciproquement.

Soit a le demi axe majeur de l'ellipsoïde, et e le coefficient d'aplatissement de l'ellipsoïde.

Passage d'un système LLA $[\alpha, \phi, h]$ vers le système ECEF $[x, y, z]$

$$\begin{bmatrix} x = (N + h) \cos(\alpha) \cos(\phi) \\ y = (N + h) \cos(\alpha) \sin(\phi) \\ z = ((1 - e^2)N + h) \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Passage du système ECEF $[x, y, z]$ vers un système LLA $[\alpha, \phi, h]$

$$\begin{bmatrix} \alpha = \arctan_q(\rho - e^2 a \cos^3(\theta), z + e p^2 b \sin^3(\theta)) \\ \phi = \text{mod}(\arctan_q(x, y), 2\pi) \\ h = \frac{\rho}{\cos(\alpha)} - N; \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

où :

$\arctan_q(x, y)$: est la fonction arctan à quatre quadrants, prenant comme arguments les coordonnées x et y d'un point au lieu d'un scalaire et permet de lever l'ambiguïté à $\pm\pi$ sur l'angle calculé⁴

$\text{mod}(x, y)$: est la fonction modulo définie comme le reste de la division de x par un nombre entier de fois y

⁴La fonction $\arctan_q$ à quatre quadrants est liée à la fonction arctan classique par la relation : $\alpha = \arctan_q(\cos \alpha, \sin \alpha) = \arctan(\tan(\alpha)) \pm \pi$.

N : est le rayon de l'ellipsoïde au nadir du point $[x, y, z]$ ou $[\alpha, \phi, h]$

et où les grandeurs intermédiaires sont définies par :

$$\left\{ \begin{array}{l} b = \sqrt{a^2(1 - e^2)} \\ e_p = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}} \\ \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \arctan_q(a.z, b.\rho) \\ N = \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2(\alpha))}} \end{array} \right.$$

Cette transformation est appliquée à chacune des mesures individuelles disponibles dans les produits altimétriques (10Hz pour Topex/Poseidon, 18Hz pour ENVISAT, 20Hz pour Jason-1, etc.)

L'erreur de calcul numérique introduite par ces changements de repères successifs LLA, ECEF, LLA reste insignifiante selon h (l'altitude), et de l'ordre de $(10^{-10})^\circ$ pour les coordonnées (erreur de positionnement sur le globe à l'équateur de quelques centièmes de millimètres).

Dans la pratique, le passage d'un système géodésique à un autre est effectué lors de la lecture des fichiers du produit altimétrique, de manière à pouvoir opérer à la volée l'extraction géoréférencée des mesures altimétriques individuelles (détaillée plus bas au § 3.5). Mais pour certains produits, le changement de système géodésique n'est effectué que lorsque la mesure altimétrique est construite (cf. § 3.4), c'est à dire après l'extraction géoréférencée. Ceci est possible lorsque les coordonnées $[\phi; \alpha]$ après changement de système géodésique se retrouvent inchangées à un résidu de calcul près, alors que seule la composante altitude se voit attribuer une valeur différente dans le nouveau système.

3.4 Construction des mesures altimétriques individuelles à haute fréquence

Les mesures altimétriques d'enregistrement sont construites à partir d'un certain nombre de mesures altimétriques individuelles (10 à 20, selon les missions et produits) qui sont acquises à un pas de temps plus fin. Par exemple, pour Jason-1, les enregistrements altimétriques (voir § 2.3.1 et fig. 2.7) sont fournis à une cadence de 1Hz, alors que les mesures altimétriques individuelles qui ont servi à leur élaboration sont mesurées à une cadence de 20Hz.

L'échantillonnage temporel des enregistrements et la vitesse projetée au sol du satellite permet de calculer l'échantillonnage spatial résultant le long de la trace du satellite. Par exemple, la vitesse de Topex/Poseidon de 5,8km/s et l'échantillonnage des enregistrements des M-GDRs à 1Hz permettent d'obtenir une résolution spatiale le long de la trace de 5,8km. Une résolution spatiale de cet ordre de grandeur est clairement insuffisante et n'est pas adaptée à la plupart des cours d'eau du globe. Il est donc nécessaire de travailler à la cadence temporelle la plus fine offerte partiellement par les enregistrements altimétriques.

De par leur construction, les enregistrements altimétriques ne permettent pas de reconstituer l'équivalent d'un enregistrement complet pour chacune des mesures altimétriques individuelles. Néanmoins, ils contiennent les variables nécessaires à la construction des mesures altimétriques individuelles originales (les deux variables « altitude du satellite » et le range), mais sans les valeurs de corrections, ni les date et coordonnées nécessaires à la suite de nos opérations.

Les variables nécessaires à la constitution d'un enregistrement minimaliste correspondant à une mesure altimétrique individuelle sont les suivantes :

- la date de la mesure individuelle
- les coordonnées $[longitude; latitude]$ de la mesure individuelle
- les valeurs des corrections à appliquer à la mesure du range

- la hauteur du géoïde associée à la mesure individuelle

Toutes les variables énumérées ci-dessus ne vont pas nécessairement être reconstruites : c'est le cas par exemple des diverses corrections à appliquer au range. Les valeurs moyennes des corrections qui sont proposées dans les enregistrements altimétriques seront utilisées telles quelles car leur variabilité le long de la trace - entre deux enregistrements consécutifs - est inconnue. Interpoler les valeurs des corrections entre les enregistrements altimétriques reviendrait alors à s'appuyer sur l'hypothèse que les valeurs fournies dans les enregistrements ne sont pas sous-échantillonnées⁵ dans l'espace, hypothèse que nous ne sommes pas en mesure de vérifier sans être capable de recalculer les corrections à un pas spatial plus fin (le cas échéant, nous ne nous intéresserions d'ailleurs plus à leur interpolation).

Nous avons par contre besoin pour la suite des traitements, des dates exactes des mesures individuelles et de leurs coordonnées. Ces deux variables sont obtenues par interpolation à partir des enregistrements consécutifs précédent et suivant.

Enfin, la hauteur de géoïde sera calculée sur la base des coordonnées interpolées, à l'aide de la grille du modèle de géoïde EGM96 (cf. § 2.2.2).

Interpolation des dates et coordonnées des mesures altimétriques individuelles

De par la construction des enregistrements altimétriques, les dates et coordonnées des mesures altimétriques d'enregistrement sont centrées respectivement dans le temps et l'espace sur le groupe des mesures individuelles, comme cela est illustré par la figure 3.2.

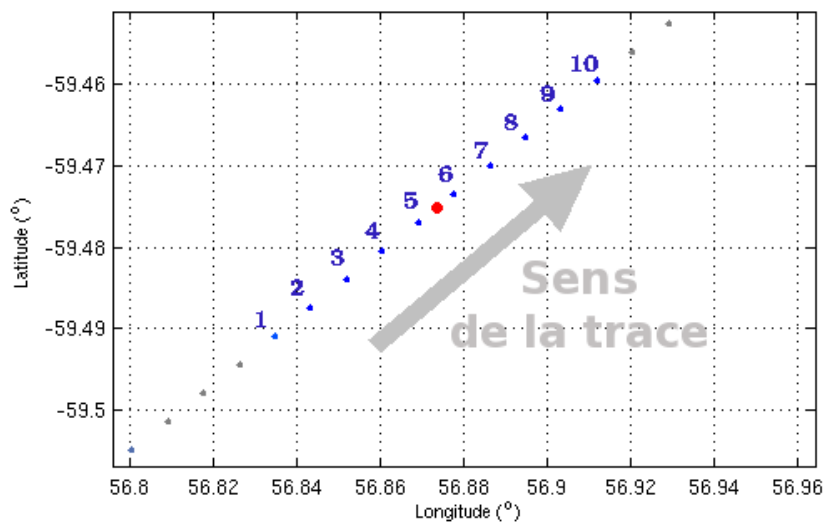


FIG. 3.2: Illustration, pour $N = 10$, le long de la trace du satellite : (1) des coordonnées interpolées pour les N mesures altimétriques individuelles (points bleus) ; (2) des coordonnées de la mesure de l'enregistrement altimétrique (point rouge). Les coordonnées de la mesure altimétrique d'enregistrement sont centrées, dans le temps et l'espace, sur les mesures altimétriques individuelles à partir desquelles elle est construite. Les points gris représentent les mesures altimétriques individuelles des enregistrements altimétriques consécutifs précédent (bas gauche) et suivant (haut droite).

La technique d'interpolation retenue pour les dates et les coordonnées est basée sur l'interpolation linéaire entre les valeurs de l'enregistrement courant (celui qui est en train d'être lu) et celles qui sont fournies dans les enregistrements altimétriques consécutifs précédent et/ou suivant. L'interpolation linéaire présente, par rapport aux approches trigonométriques, des avantages non négligeables : une simplicité de mise en œuvre, un temps de calcul réduit et une insensibilité aux dérives numériques.

⁵Le sous-échantillonnage (ou recouvrement spectral) d'un signal provoque une perte irréversible de son contenu informatif.

L'interpolation est effectuée en deux temps et les mesures altimétriques individuelles sont séparées en deux groupes : (1) le groupe des mesures altimétriques individuelles « pré-enregistrement » et (2) le groupe des mesures altimétriques individuelles « post-enregistrement ».

Idéalement, le groupe « pré-enregistrement » est interpolé à l'aide de l'enregistrement altimétrique courant et de l'enregistrement altimétrique précédent, de même, le groupe « post-enregistrement » est idéalement interpolé à l'aide de l'enregistrement altimétrique courant et de l'enregistrement altimétrique suivant. Malheureusement, il existe des configurations où les enregistrements altimétriques précédents et/ou suivants ne sont pas présents dans les produits altimétriques.

Afin de traiter au mieux ces cas de lacunes, un petit algorithme a été mis au point pour déterminer quel enregistrement non manquant peut être utilisé en substitution d'un manquant pour l'interpolation linéaire. Ce processus est appliqué séparément pour chacun des deux groupes de mesures individuelles. L'algorithme est illustré par le schéma de la figure 3.3.

3.5 Extraction géoréférencée des mesures altimétriques

La génération des séries temporelles altimétriques nécessite l'extraction des données depuis les produits altimétriques, et à partir de la définition des stations virtuelles. Pour chaque station virtuelle, l'extraction des mesures se fait dans une fenêtre géoréférencée, délimitant la zone où le satellite survole un cours d'eau. Ces fenêtres doivent être définies en prenant en compte à la fois les contours du cours d'eau ainsi que certains paramètres liés à la technique altimétrique, comme la distance entre les mesures individuelles consécutives⁶⁷ et la largeur de la trace au sol.

Le choix des dimensions de la fenêtre d'extraction résulte d'un compromis où pour chaque passage du satellite nous recherchons à la fois à :

- minimiser la dispersion du groupe des mesures individuelles qui seront collectées dans la fenêtre lors du passage,
- maximiser la probabilité d'obtenir au moins une mesure individuelle du niveau du cours d'eau par passage.

En effet, plus la fenêtre d'extraction s'étend sur les terres émergées (principalement selon la direction de la trace), plus la dispersion du groupe de mesures (à raison d'un groupe par passage) va, a priori, augmenter. Cette dispersion des mesures est conditionnée en partie par l'état des surfaces observées par l'altimètre : la part de surface d'eau dans l'empreinte radar, la rugosité de la surface d'eau, l'encaissement du cours d'eau dans son lit (principalement pour les périodes de basses eaux), le relief environnant, la présence d'îlots, de végétation sur les berges, etc. Cet état de surface est dépendant du niveau du cours d'eau lui-même, au grès des saisons ou de ses crues et décrues.

Dans des conditions de mesures difficiles, l'altimètre peut se retrouver dans l'incapacité à estimer le range, ceci pour deux raisons principales : l'état des surfaces observées n'est pas adapté à l'altimètre et les formes d'ondes radar ne sont pas interprétables, ou bien, l'altimètre a perdu sa cible, on dit alors qu'il « décroche » : la technique de suivi du relief (« tracking ») mise en œuvre par l'altimètre étant alors temporairement en échec (les effets du décrochage sur les performances des séries temporelles altimétriques seront abordés au chapitre 8). Le choix d'une fenêtre d'extraction trop petite peut donc, sous ces conditions, limiter les chances d'obtenir au moins une mesure par passage. Il est donc probable de n'obtenir aucune mesure pour certains passages du satellite (ou cycles), ce qui va avoir pour effet d'augmenter la période d'échantillonnage effective et donc de globalement dégrader la qualité de l'échantillonnage du signal hydrologique que l'on cherche à observer.

⁶Voir définitions en page 49.

⁷La distance entre les mesures altimétriques individuelles peut être calculée à partir de la fréquence d'acquisition des mesures et de la vitesse du satellite projetée au sol.

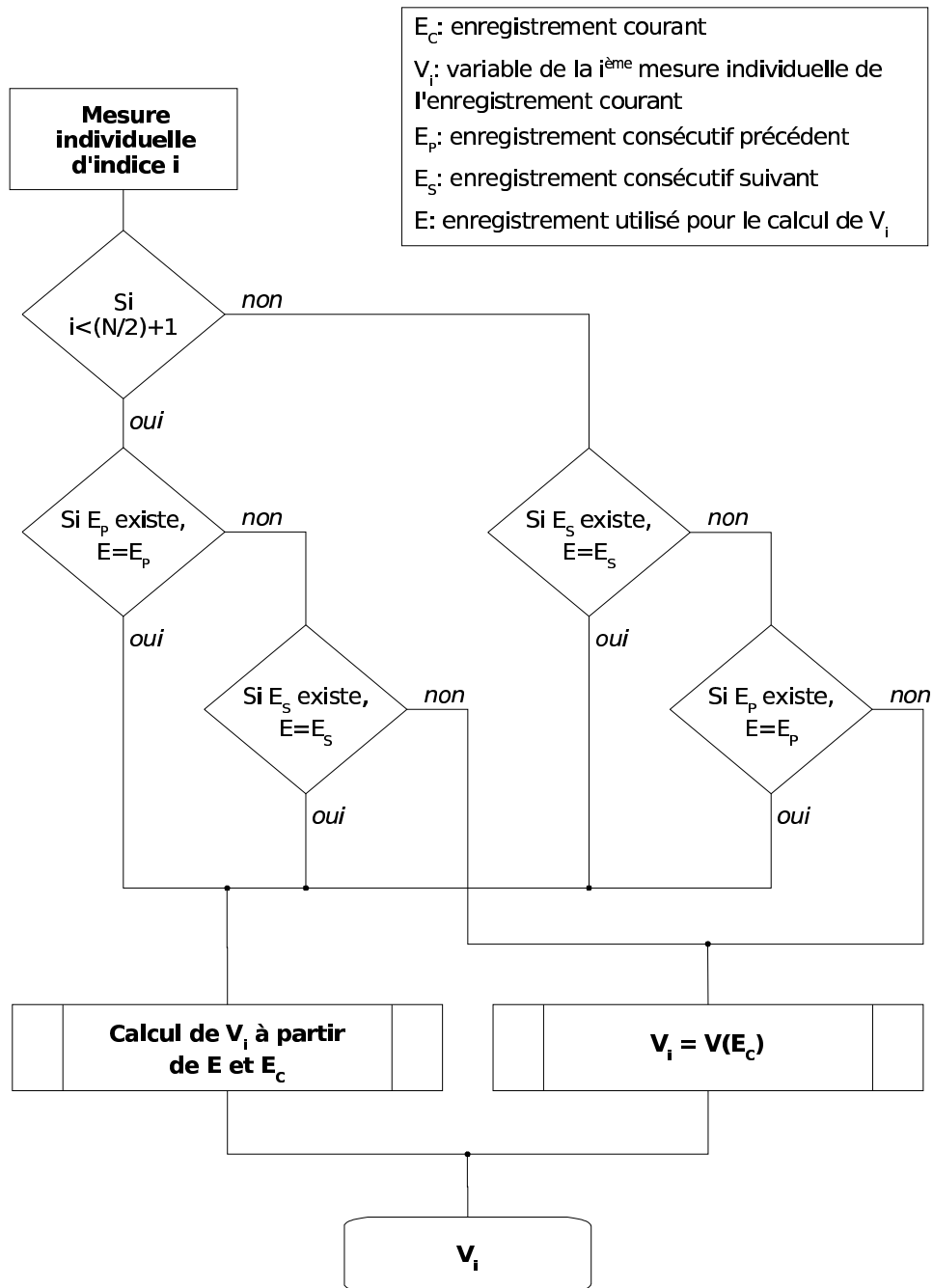


FIG. 3.3: Schéma simplifié de l'algorithme de détermination de l'enregistrement altimétrique à utiliser pour l'interpolation des variables nécessaires à la construction des mesures altimétriques individuelles. En cas d'absence de E_p et de E_s , les valeurs des coordonnées des mesures altimétriques individuelles se voient attribuer les valeurs des coordonnées de E_c . Quant à la date, elle peut toujours être approximée car le pas de temps entre les mesures altimétriques individuelles est toujours connu.

Il est important de noter que le bruit de mesure associé à chacun des ranges estimés est réduit par la répétition des mesures radar : la forme d'onde à partir de laquelle un range est estimé est en fait la moyenne de dizaines de formes d'ondes acquises à des fréquences plus élevées (environ cent à deux-cents fois plus, selon les altimètres). En statistiques, il est bien connu que répéter N fois une même mesure permet d'améliorer la qualité de l'estimateur de sa moyenne.

Gardons donc en tête que le choix d'une fenêtre de dimensions modérées (par exemple ajustée sur les berges en période de moyennes eaux) n'est pas un handicap majeur puisque les mesures qui sont perdues sont : soit entachées d'un bruit de mesure trop important et mettent en échec l'algorithme d'estimation du range ; soit perdues pour cause de décrochage de l'altimètre.

Pour terminer, voici une liste d'éléments nécessaires, dans la pratique, à la définition des fenêtres d'extraction :

- **Largeur de la trace au sol** : L'extraction des coordonnées des mesures des cycles d'une mission altimétrique nous permet de définir les limites Est et Ouest de ses traces, et donc leurs largeurs. Ainsi, pour la mission Topex/Poseidon, les largeurs des traces sont de 1,7 km environ au niveau de l'équateur, 770 m environ au niveau de Paris ($48^{\circ}50'N$) et de 340 m environ au niveau sa latitude de passage la plus grande ($66^{\circ}07'N$). Les limites Est et Ouest des traces permettent donc d'intégrer la variabilité de passage sur site du satellite, de limiter la largeur de la fenêtre d'extraction en longitude et d'améliorer son ajustement au cours d'eau en latitude.
- **Contours des cours d'eau** : Localiser les limites des cours n'est pas une tâche aisée. Certains cours d'eau connaissent des périodes d'inondation, ou d'étiage qui modifient de manière importante les contours de leurs berges. Dans les travaux de cette thèse, les dimensions de la fenêtre d'extraction sont statiques et ne suivent pas les contours réels des cours d'eau au cours du temps, faute de données. Le suivi dynamique des contours des cours d'eau nécessiterait : (1) d'avoir pour chaque passage du satellite, une image de la scène permettant de discriminer les surfaces en eaux des autres surfaces (images radar, visible, etc.) ; (2) la mise au point d'une méthode de définition automatique des limites de la fenêtre d'extraction, tâche qui pour le moment est purement manuelle. Néanmoins, plusieurs sources de données géographiques permettent aujourd'hui de délimiter les cours d'eau de manière statique, de manière convenable, notamment les données SWBD et les images fournies par le logiciel GoogleEarth (voir 2.2.1).
- **Empreinte de l'écho radar au sol** : La taille de l'empreinte de l'onde radar au sol (cf. figure 1.17, p. 37) est un paramètre à prendre en compte dans les applications en hydrologie continentale. En effet, le diamètre de celle-ci pouvant atteindre plusieurs kilomètres [Chelton et al., 2001], des perturbations dans la forme d'onde radar vont nécessairement voir le jour dans le cas de mesures acquises sur des cours d'eau de largeur inférieure à celle de l'empreinte.
- **Largeur minimale des cours d'eaux observables** : Dans [Birkett et al., 2002], Charon Birkett définit une largeur minimale théorique des cours d'eau observables par Topex/Poseidon, mais nous verrons par la suite que cette limite n'est pas rédhibitoire - notamment du fait de la largeur importante de la tâche radar au sol - et que le niveau des eaux de certains fleuves du bassin amazonien, dont la largeur est de l'ordre de la centaine de mètres, ne paraissent pas plus pénalisés que d'autres fleuves plus larges (cf. chapitre 8).
- **L'effet « d'accroche persistante » de l'altimètre** : Dans le cas des mesures altimétriques acquises dans une fenêtre d'extraction qui s'étend sur les terres émergées, il arrive parfois que le système de tracking reste focalisé sur une surface d'eau venant d'être survolée, le range est alors surestimé. Ce phénomène peut se corriger par calcul (cf. [Frappart et al., 2006], [Mercier, 2001]), mais dans le cadre d'une correction automatisée, nous ne sommes pour le moment pas capables de : (1) détecter si ce phénomène se produit ou non ; (2) connaître avec précision (et donc de manière dynamique) les contours des cours d'eau. Retenons donc que plus les fenêtres d'extraction s'étalent sur les terres,



FIG. 3.4: Illustration d'une fenêtre géographique d'extraction sur le fleuve Solimões (Brésil) pour la station virtuelle « TP-076-Solimoes » : Accumulation des mesures à 10Hz obtenues par Topex/Poseidon sur la trace 76 de sa première première orbite (1993-2002). Les traits obliques de gauche et de droite représentent respectivement les limites Ouest et Est de la trace, extraites depuis quelques cycles. (Image GoogleEarth).

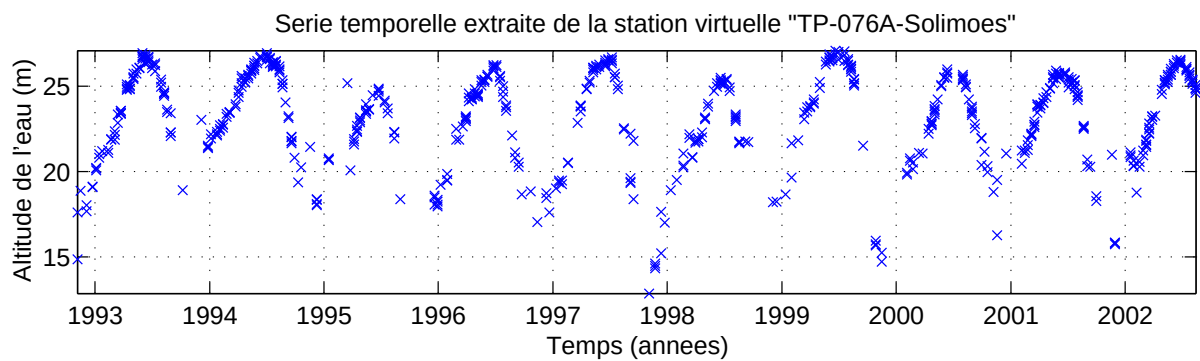


FIG. 3.5: Illustration d'une série temporelle altimétrique extraite depuis une fenêtre géographique d'extraction : cette série temporelle est le résultat de l'extraction fenêtrée des données, pour la station virtuelle « TP-076-Solimoes » illustrée ci-dessus (fig. 3.4). Les mesures à 10Hz situées sur un axe vertical commun appartiennent au même groupe de mesures et sont obtenues lors d'un passage du satellite.

plus le risque de collecter des mesures dont le range est surestimé est grand.

- **Représentation ponctuelle des mesures radar sur un fond de carte :** Bien que les dimensions de l'empreinte radar au sol soient de l'ordre de quelques kilomètres (cf. figure 1.17, p. 37), nous représenterons chacune des mesures altimétriques par un point géodésique (latitude, longitude) correspondant à la projection au sol de la position du satellite lors de la mesure (cf. fig. 3.4).

Finalement, la taille de la fenêtre doit être choisie de manière à maximiser les chances d'obtenir au moins une mesure par passage du satellite sur la station virtuelle. Dans les résultats que nous présentons plus tard, nous avons choisi d'ajuster les fenêtres d'extraction sur les berges du cours d'eau, avec comme contrainte, si le cours d'eau n'est pas assez large, que la fenêtre couvre au moins trois mesures individuelles consécutives (pour Topex/Poseidon, les mesures sont espacées d'environ 580m le long de la trace, les fenêtres doivent donc être d'une largeur (longitudinale à la trace) d'au moins 1,8km afin de contenir les trois mesures individuelles souhaitées).

3.6 Corrections du range et construction de la mesure altimétrique du niveau de l'eau

Afin de pouvoir dériver les mesures altimétriques du niveau des cours d'eau depuis les produits altimétriques, il est nécessaire de procéder à un certain nombre de manipulations des données. Les produits altimétriques contiennent pour chacune des mesures individuelles et/ou d'enregistrement les grandeurs suivantes :

- l'altitude de l'altimètre radar par rapport au référentiel géodésique de la mission (que nous avons par ailleurs transposé dans WGS84)
- la valeur de range obtenue par analyse de la forme d'onde radar par un algorithme de tracking ou de retracking
- des valeurs de corrections instrumentales, atmosphériques et géophysiques
- des variables d'état ou de mesures physiques complémentaires

3.6.1 Corrections du range

Le range⁸, tel qu'il est fourni dans les produits altimétriques est généralement le résultat brut de la mesure effectuée par l'altimètre, obtenu par analyse de la forme d'onde radar et corrigé des perturbations instrumentales. Cependant, les effets de ralentissement des ondes électromagnétiques dans les différentes couches de l'atmosphère ne sont pas pris en compte à ce stade alors qu'il peuvent introduire une surestimation du range de l'ordre de plusieurs mètres.

Un certain nombre de corrections doit donc être appliqué - autant que cela est possible - au range avant de pouvoir l'utiliser pour en déduire l'altitude des surfaces d'eau. Ces corrections souvent fournies dans les produits altimétriques, dans le cadre des applications en océanographie et ne sont malheureusement pas toujours disponibles sur les zones continentales. Toutefois, lorsqu'elles sont disponibles⁹, elles doivent être retranchées au range.

Les M corrections $\psi_{sat}(m)$ à appliquer au range peuvent être sommées :

$$\Psi_{sat} = \sum_{m=1}^M \psi_{sat}(m)$$

puis retranchées au range $r(n)$ afin d'obtenir le range corrigé $r_c(n)$:

$$r_c(n) = r(n) - \Psi_{sat}$$

⁸La définition du range est donnée au § 2.1.2.

⁹Voir le § 2.3.2 (page 66) pour la liste des corrections appliquées en fonction du produit altimétrique utilisé et le § 1.2.2 pour le descriptif des différentes corrections.

3.6.2 Construction des mesures altimétriques individuelles

Les mesures altimétriques individuelles $Z_{Sat}(n)$ sont construites à partir de l'altitude du satellite $Alt_{Sat}(n)$ et de la valeur du range corrigé $r_c(n)$, comme suit :

$$Z_{Sat}(n) = Alt_{Sat}(n) - r_c(n) \quad (3.3)$$

3.6.3 Calcul de l'altitude orthométrique à l'aide d'un modèle du géoïde terrestre

Avant de pouvoir utiliser les mesures altimétriques individuelles pour construire des séries temporelles, nous devons compenser les effets de variation de gravité à la surface du globe qui déforment localement la surface des cours d'eau.

La hauteur de géoïde $\mathcal{G}(n)$ est calculée pour chacune des mesures altimétriques individuelles et doit être ajoutée à la mesure altimétrique corrigée de l'équation (3.3) :

$$Z_{Sat}(n) = Alt_{Sat}(n) - r_c(n) + \mathcal{G}(n) \quad (3.4)$$

Comme nous l'avons vu dans le § 2.2.2, nous utilisons pour tous nos travaux le modèle de géoïde EGM96 sous la forme d'une grille à partir de laquelle il est possible d'interpoler les valeurs $\mathcal{G}(n)$ en tout point du globe.

3.7 Sélection d'une mesure représentative par passage sur site du satellite

L'extraction fenêtrée des mesures altimétriques individuelles permet d'obtenir une série temporelle pour laquelle un groupe de mesures (de 0 à N mesures) est collecté à chaque passage du satellite. La dispersion des mesures au sein de chacun de ces groupes est représentative des interprétations successives des formes d'onde radar à partir desquelles les valeurs de range sont estimées.

La représentation dans le temps de ces mesures peut révéler de fortes variations du niveau des eaux dans un laps de temps très court (le temps de passage du satellite), ces artefacts de mesures créant alors une forte incohérence hydrologique qu'il convient de corriger.

Il nous a donc paru indispensable de choisir une mesure représentative pour chacun de ces groupes. Lorsque le passage du satellite a permis de collecter au moins une mesure par groupe, le processus de « sélection d'une mesure représentative par passage du satellite » s'attachera alors à ne conserver que la mesure la plus représentative du groupe.

Il est important de noter à ce sujet que chaque mesure altimétrique est accompagnée d'autres grandeurs (constituantes d'un enregistrement altimétrique) nécessaires à la compréhension du phénomène de mesure et de sa qualité. Il nous ne sera donc pas possible de générer une « mesure représentative » à l'aide d'un opérateur arithmétique, mais seulement de choisir parmi les mesures existantes du groupe.

Cette étape repose principalement sur le choix d'un opérateur de sélection de la « mesure représentative ». Nous avons opté pour « la mesure la plus proche de la médiane des mesures », démarche qui s'inspire de la technique de traitement du signal dite du « filtre médian », réputée efficace pour l'immunité au bruit qu'elle propose.

Un exemple de résultat est donné à la figure 3.6.

La sélection d'une « mesure représentative par passage sur site du satellite » ne permet pas de s'assurer de la cohérence des séries temporelles altimétriques obtenues : des mesures aberrantes peuvent y subsister et nuire à la cohérence hydrologique de l'ensemble. Enfin, remarquons que cette étape ne dégrade en rien la période d'échantillonnage effective de la série temporelle altimétrique.

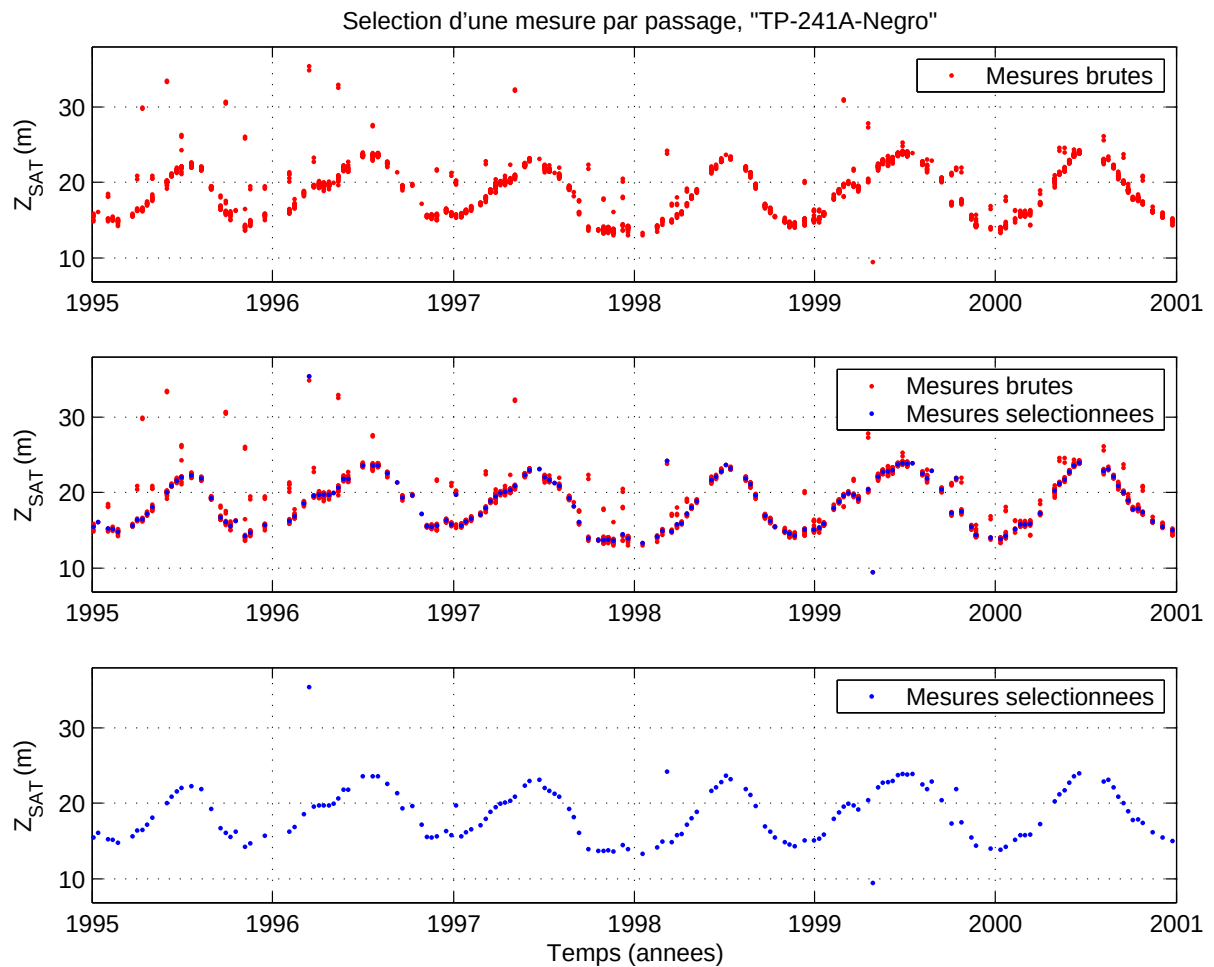


FIG. 3.6: Illustration du processus de sélection d'une mesure par passage du satellite pour la station virtuelle « TP-241A-Negro ». En haut : série temporelle brute où l'on peut observer les groupes de mesures collectées lors de chacun des passages du satellite à la station virtuelle. Au milieu : une comparaison entre les mesures brutes et les mesures sélectionnées. En bas : le résultat du processus de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite. Le résultat est proche de celui qui pourrait être fourni par une technique de filtrage, mais laisse quand même quelques mesures aberrantes dans la série temporelle.

3.8 Méthodes de filtrage

Nous avons vu que les séries temporelles altimétriques obtenues jusqu'à présent peuvent contenir des mesures aberrantes qu'il convient d'éliminer, ou présenter des incohérences hydrologiques importantes qu'il convient de minimiser. Pour tenter de remédier à ces problèmes, plusieurs méthodes de filtrage temporel présentées ici peuvent être mises en œuvre.

3.8.1 Filtrage « global »

Le méthode de « filtrage global » permet de supprimer les mesures altimétriques qui sortent nettement de la tendance globale de la série temporelle altimétrique à laquelle elles appartiennent. Ce filtrage doit être appliqué à la plupart des séries temporelles issues des produits altimétriques, où des mesures fortement aberrantes (écart de plusieurs dizaines de mètres à la moyenne de la série temporelle altimétrique) peuvent subsister même après l'application du processus de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite décrit dans le § 3.7.

Principe

Ce filtrage effectue une sélection globale, à l'échelle de la série temporelle altimétrique, des mesures qu'il convient de conserver. Ces mesures doivent être incluses dans un intervalle Δ_Z , représentatif des niveaux des eaux de la série temporelle altimétrique, notée Z_{Sat} . Cet intervalle Δ_Z est défini à partir du calcul des estimateurs de la moyenne et de la variance (non biaisé) des mesures altimétriques de la série temporelle, au sens de la loi normale :

$$\Delta_Z = [Z_{\min}; Z_{\max}] = [\mu_{Z_{Sat}} \pm K \cdot \sigma_{Z_{Sat}}] \quad (3.5)$$

avec :

$$\mu_{Z_{Sat}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{Sat}(i) \quad (3.6)$$

et :

$$\sigma_{Z_{Sat}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Z_{Sat}(i) - \mu_{Z_{Sat}})^2 \quad (3.7)$$

où :

N est le nombre de mesures contenues dans la série temporelle Z_{Sat}

$\mu_{Z_{Sat}}$ est l'estimateur de la moyenne de la série temporelle Z_{Sat}

$\sigma_{Z_{Sat}}^2$ est l'estimateur non biaisé de la variance de la série temporelle Z_{Sat}

$\sigma_{Z_{Sat}}$ est l'estimateur non biaisé de l'écart-type de la série temporelle Z_{Sat}

K est un coefficient de dilatation de l'intervalle Δ_Z autour de la moyenne, généralement fixé à $K = 3$ de manière à préserver 99% de la population théorique des mesures, selon la loi normale.

Ce filtre permet de retirer les mesures aberrantes dont la valeur ne suit pas la tendance générale de la série temporelle altimétrique. Néanmoins, comme l'illustre la figure 3.7, ce filtrage ne permet pas de supprimer les mesures fortement erronées comprises dans la plage $[Z_{\min}; Z_{\max}]$ qui portent à confusion quant à la saison hydrologique observée (mesure de basse eaux surestimée passant pour une mesure de hautes eaux, et réciproquement).

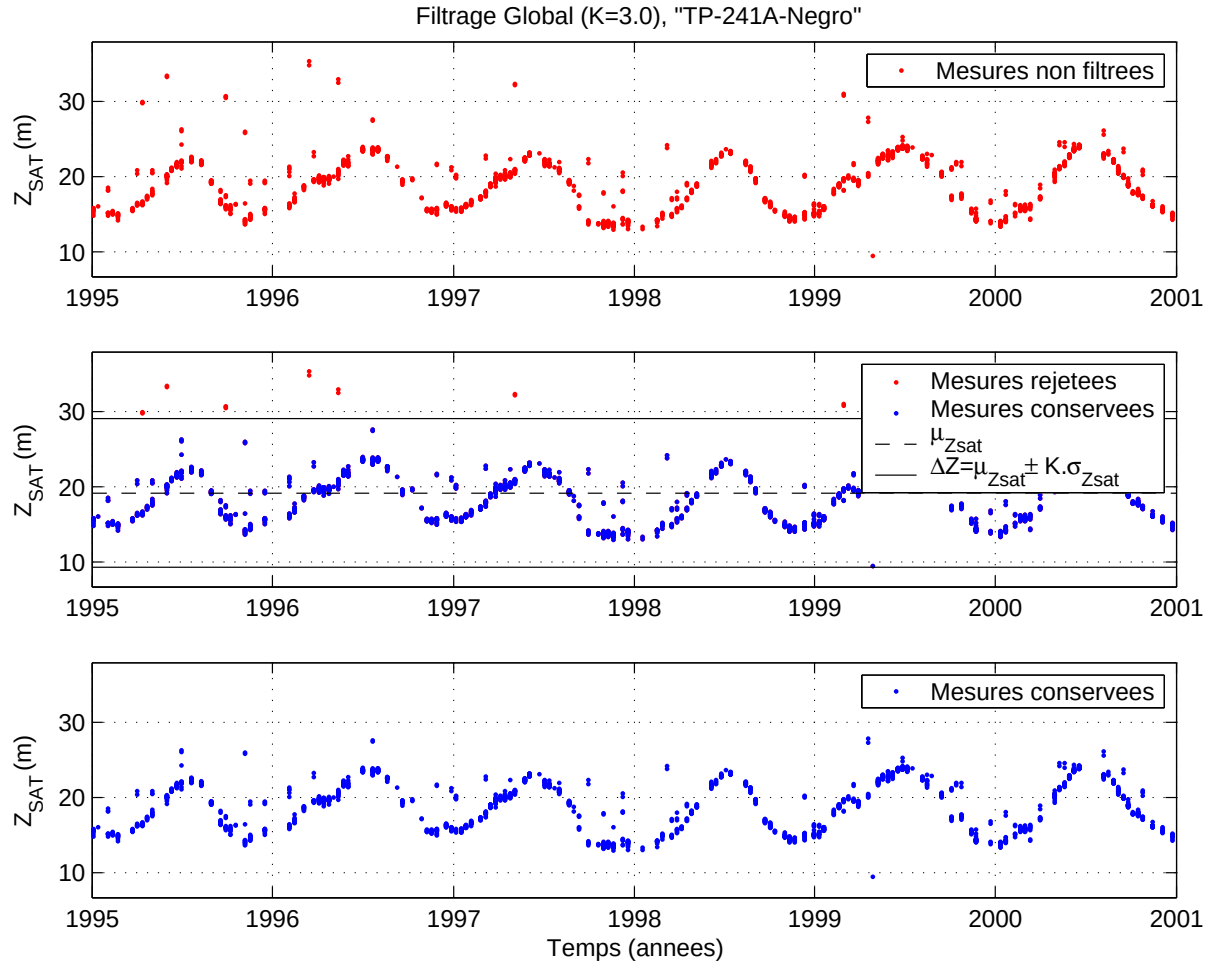


FIG. 3.7: Illustration du filtrage global sur la série temporelle de la station virtuelle « TP-241A-Negro », pour $K = 3$. En haut : La série temporelle avec plusieurs mesures par passage contenant un certain nombre de mesures aberrantes. Au milieu : Les mesures en rouge sont en dehors des limites définies par l'intervalle Δ_Z (lignes en trait plein noirs en haut et en bas) et sont retirées de la série temporelle. En bas : la série temporelle résultante. Ce filtre permet de retirer les mesures aberrantes dont l'altitude n'est pas comprise dans la dynamique générale de la série temporelle.

3.8.2 Filtrage « calendaire » par fenêtre glissante et superposition des hydrogrammes annuels

La méthode de « filtrage calendaire » repose sur l'hypothèse de la présence d'une tendance annuelle prépondérante dans le signal hydrologique observé par le satellite, et permet par conséquent de mieux profiter de l'information portée par le régime hydrologique annuel. Il permet de retirer certaines mesures aberrantes qui sont inscrites dans la tendance globale de la série temporelle mais que le filtrage global ne peut pas détecter.

Cette technique n'est pas adaptée aux cours d'eau - ou tronçons de cours d'eau - qui n'ont pas de régime annuel marqué, comme par exemple, les cours d'eau dont le régime hydrologique est régulé par l'homme, ou encore les parties les plus à l'amont des cours d'eau dont le régime hydrologique peut être très chahuté¹⁰, et donc sans tendance annuelle prépondérante.

Principe

Ce filtrage repose sur la superposition des hydrogrammes annuels mesurés par le satellite, obtenue en représentant les mesures altimétriques selon leur date calendaire (i.e. numéro du jour de l'année). Une année calendaire commence au premier janvier se termine au 366^{ème} jour.

Un filtrage à fenêtre temporelle glissante de largeur Δ_T est ensuite mis en œuvre selon l'axe du temps calendaire. La fenêtre est centrée successivement sur chacune des mesures de la série temporelle, les mesures comprises dans la fenêtre sont utilisées pour le calcul de l'intervalle Δ_Z représentatif de la tendance locale. Si la valeur de la mesure courante est incluse dans l'intervalle Δ_Z , alors elle est conservée, sinon elle est rejetée.

Dans le détail, les étapes suivantes sont mises en œuvre pour obtenir la série temporelle filtrée :

– Partie 1 : Construction d'un gabarit temporel de filtrage :

1. les mesures altimétriques sont superposées par représentation selon leur date calendaire,
2. une grille temporelle de Q instants t_q est définie à l'aide du paramètre qT , quantum de temps (ou résolution temporelle),
3. pour chacun des instants t_q :
 - (a) une fenêtre glissante de largeur $[t_q \pm \Delta_T/2]$, centrée sur l'instant t_q , permet de collecter les mesures altimétriques de manière localisée,
 - (b) les valeurs de $\mu_{Z_{Sat}}(t_q)$ et $\sigma_{Z_{Sat}}(t_q)$ sont calculées à partir des mesures incluses dans la fenêtre, selon les mêmes équations (3.6) et (3.7) que pour le filtrage global,
4. ces Q couples $[\mu_{Z_{Sat}}(t_q); \sigma_{Z_{Sat}}(t_q)]$ sont assemblés pour former le gabarit temporel (en temps calendaire) des intervalles de filtrage : $\Delta_Z(t_q) = \mu_{Z_{Sat}}(t_q) \pm K \cdot \sigma_{Z_{Sat}}(t_q)$ (voir fig. 3.8),

¹⁰Généralement, les parties amont des cours d'eau (non régulés) présentent des hydrogrammes moins marqués par des tendances saisonnières. Leur réponse hydraulique est marquée par le régime des pluies locales au bassin versant qui leur donne naissance. Plus la surface du bassin versant qui alimente un cours d'eau est grande, plus l'inertie hydraulique résultante (liée au stockage de l'eau) sera grande. Cette inertie a un effet de lissage du régime hydrologique des cours d'eau. La réponse hydraulique du cours d'eau à l'exutoire représente donc l'image du régime hydraulique à l'échelle du bassin versant, potentiellement marqué par des tendances saisonnières.

– Partie 2 : Filtrage des mesures altimétriques individuelles :

1. pour chacune des mesures altimétriques de date t_i
 - (a) la date calendaire approchée tc_i (à qT près) est calculée à partir de la date réelle t_i de la mesure :
 - (b) on relève sur le gabarit les valeurs de l'intervalle $\Delta_Z(tc_i)$ à la date calendaire tc_i ,
 - (c) si la mesure altimétrique est incluse dans l'intervalle $\Delta_Z(tc_i)$, alors elle est conservée. Elle est retirée de la série temporelle dans le cas contraire.
2. les mesures conservées sont assemblées pour former la série temporelle filtrée.

La translation de la fenêtre glissante prend en compte les effets de bord et s'effectue de manière circulaire : les dates sont utilisées en « modulo 366 », ce qui fait de ce filtre un « filtre circulaire » sans effets de bords¹¹.

L'illustration proposée en figure 3.9 montre bien les améliorations apportées par cette méthode de filtrage, par rapport au filtrage global, au niveau du pouvoir de détection des mesures aberrantes incluses dans la dynamique de la série temporelle.

Néanmoins, des mesures erronées semblent ne pas être rejetées par ce filtre, c'est pour cette raison qu'une variante récursive a été mise en place.

3.8.3 Filtrage « calendaire » : variante récursive

La variante récursive du filtrage calendaire permet de réitérer le processus de filtrage pour l'intégralité de la série temporelle tant que des mesures jugées aberrantes peuvent être retirées. L'avantage de cette variante est de pouvoir répéter l'opération de filtrage sur les zones où un premier passage n'a pas suffi. Cette approche présente toutefois le risque de supprimer trop de mesures en érodant trop fortement la série temporelle.

La figure 3.11 illustre le résultat du filtrage calendaire récursif après quelques itérations.

Les résultats peuvent paraître perfectibles, mais il serait difficile même pour un expert de désigner de manière plus efficace d'autres mesures aberrantes. Les critères de sélections d'un expert étant subjectifs, nous obtiendrions alors un hydrogramme représentant plus une vision de ce que devrait être l'hydrogramme que ce qu'il est en réalité.

Enfin, nous pouvons remarquer que les valeurs du paramètre K employées dans les deux méthodes de filtrage globale et calendaire sont différentes (les exemples présentés utilisent respectivement $K = 3$ et $K = 2, 5$) : du fait de l'application locale de ce dernier, le pouvoir de rejet des mesures aberrantes peut être revu à la hausse par rapport au filtrage globale où de faibles valeurs de K peuvent détériorer les séries temporelles altimétriques.

3.9 Annexe : Calcul de la dispersion des mesures

Les mesures altimétriques issues de la fenêtre d'extraction géoréférencée, représentent, pour un cycle donné (et donc un passage du satellite) l'ensemble des interprétations du niveau de l'eau qu'a pu fournir l'altimètre dans un laps de temps très court (quelques secondes au plus). Ce laps de temps peut être considéré comme un instant ponctuel aux vues des vitesses de variations des niveaux des eaux. Pour chacun des passages du satellite, les mesures acquises sont caractérisables par une valeur moyenne de groupe et une valeur de dispersion de groupe.

¹¹Par exemple, pour $\Delta_T/2 = 15$ jours et $t_i = 355$, les mesures utilisées pour le calcul de $\Delta_Z(i)$ sont celles dont les dates sont incluses dans l'intervalle $[355 - 15; 366] \cup [1; \text{mod}(355 + 15, 366)]$, soit $[340; 366] \cup [1; 4]$.

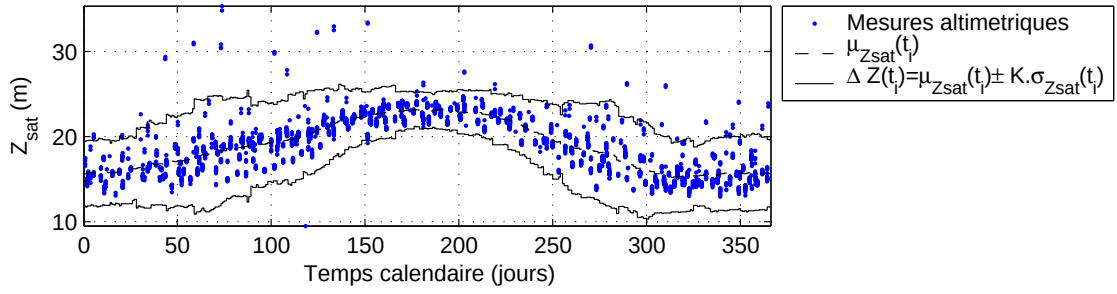
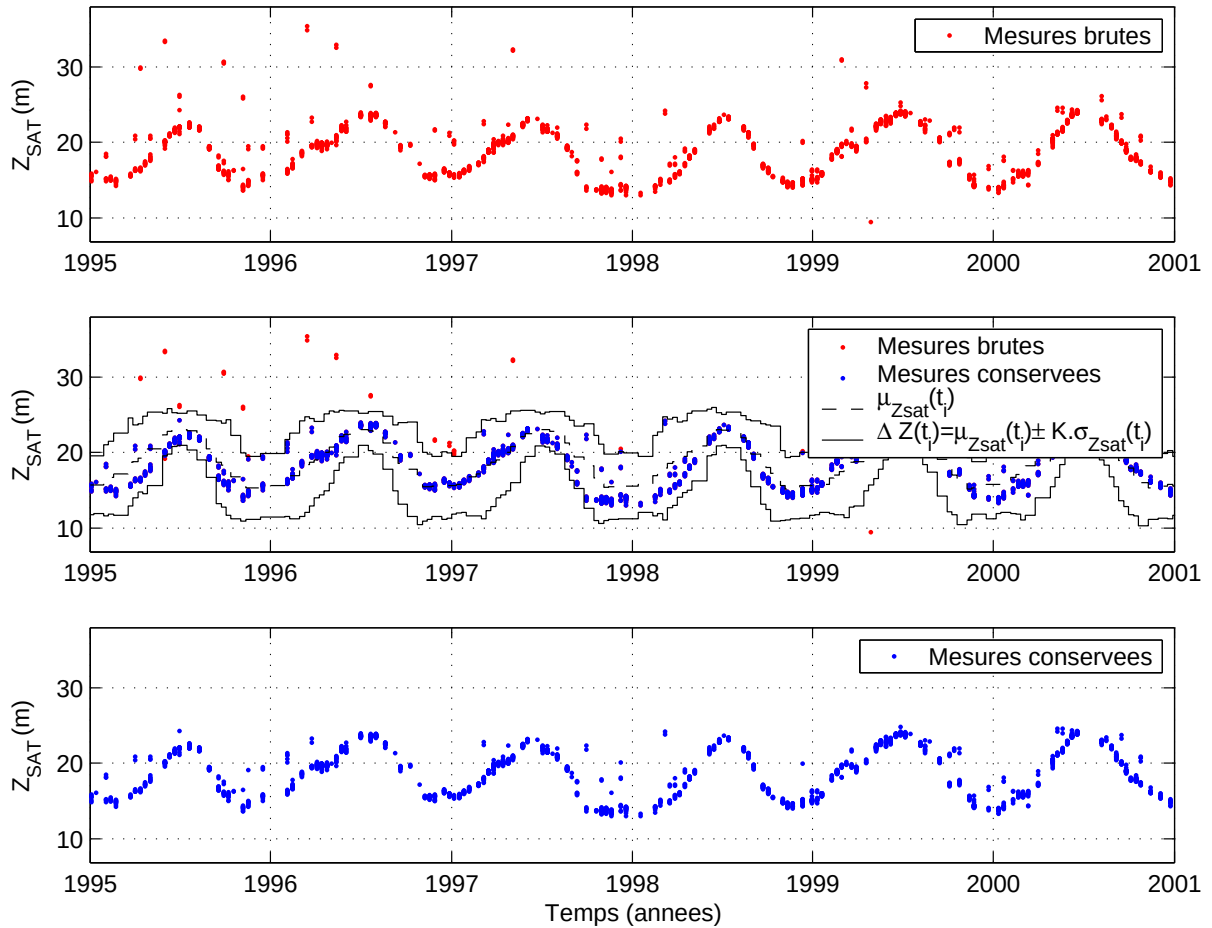
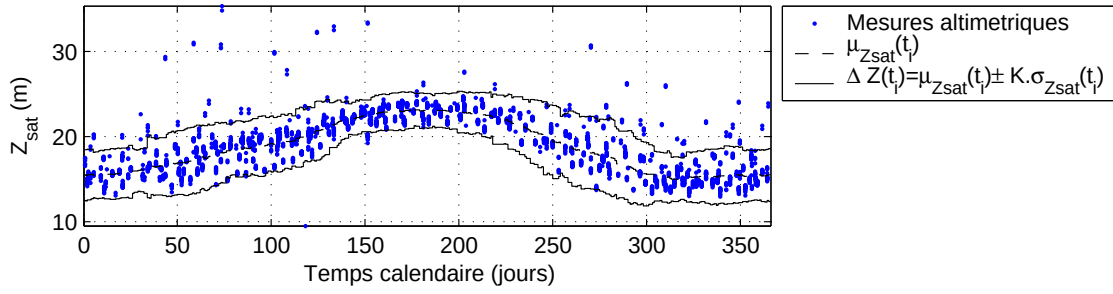
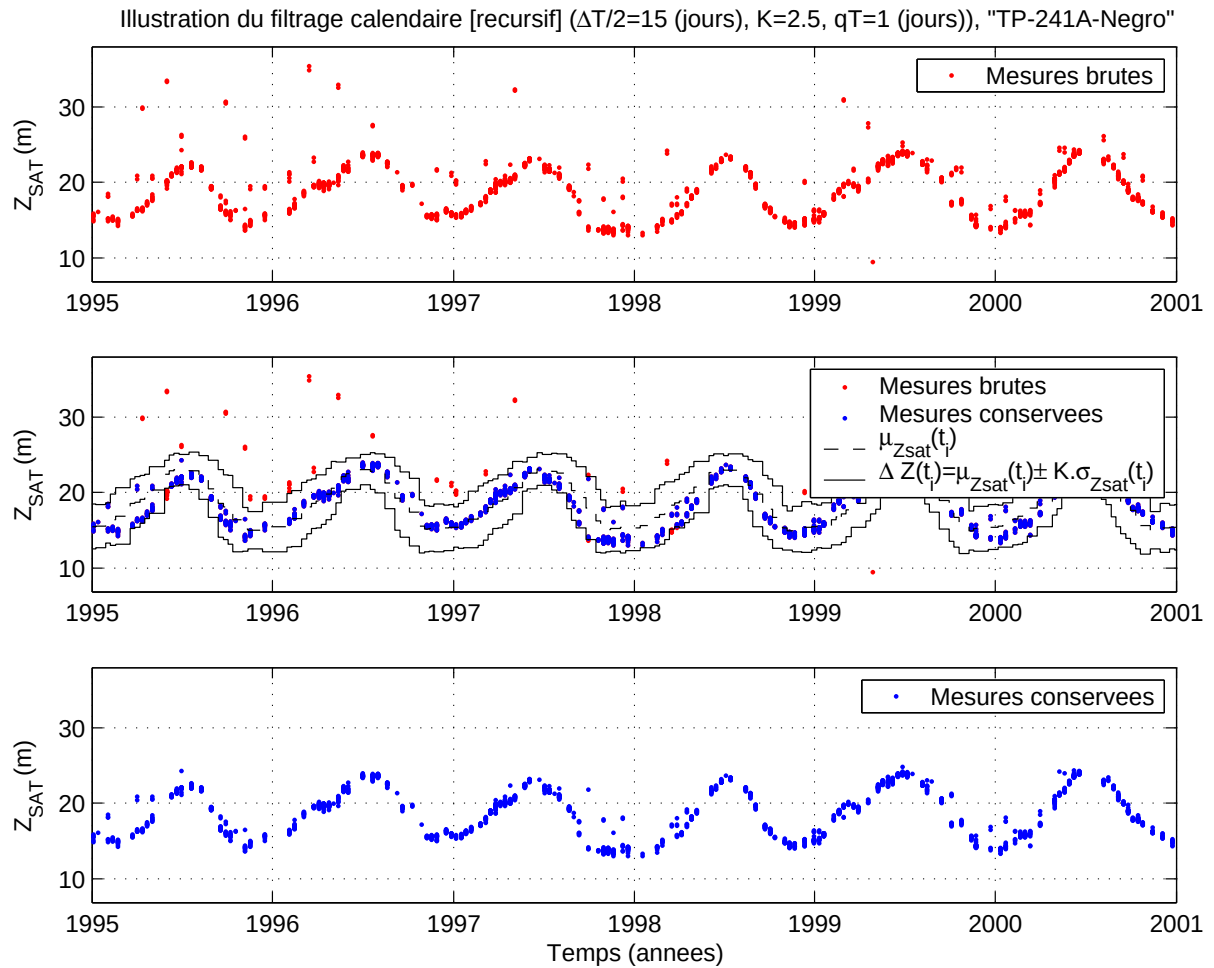
Illustration du gabarit du filtrage calendaire ($\Delta T/2=15$ (jours), $K=2.5$, $qT=1$ (jours)), "TP-241A-Negro"FIG. 3.8: Illustration du gabarit utilisé par le filtrage calendaire sur la série temporelle de la station virtuelle « TP-241A-Negro », pour $K = 2,5$; $\Delta_T = 15$ jours et $qT = 1$ jour.Illustration du filtrage calendaire ($\Delta T/2=15$ (jours), $K=2.5$, $qT=1$ (jours)), "TP-241A-Negro"FIG. 3.9: Illustration du filtrage calendaire sur la série temporelle altimétrique de la station virtuelle « TP-241A-Negro », pour $K = 2,5$; $\Delta_T = 15$ jours et $qT = 1$ jour. En haut : La série temporelle avec plusieurs mesures par passage contenant un certain nombre de mesures aberrantes. Au milieu : Les mesures en rouge sont en dehors des limites définies par l'intervalle mobile $\Delta_Z(t_i)$ (lignes en trait plein noirs en haut et en bas) et sont retirées de la série temporelle résultante. En bas : la série temporelle. Ce filtre permet de retirer les mesures aberrantes comprises dans la dynamique générale de la série temporelle.

Illustration du gabarit du filtrage calendaire [récursif] ($\Delta T/2=15$ (jours), $K=2.5$, $qT=1$ (jours)), "TP-241A-Negro"FIG. 3.10: Illustration du gabarit utilisé par le filtrage calendaire récursif sur la série temporelle de la station virtuelle « TP-241A-Negro », pour $K = 2, 5$; $\Delta_T = 15$ jours et $qT = 1$ jour.FIG. 3.11: Illustration du filtrage calendaire récursif sur la série temporelle de la station virtuelle « TP-241A-Negro », pour $K = 2, 5$; $\Delta_T = 15$ jours et $qT = 1$ jour. En haut : La série temporelle avec plusieurs mesures par passage contenant un certain nombre de mesures aberrantes. Au milieu : Les mesures en rouge sont en dehors des limites définies par l'intervalle mobile $\Delta_Z(t_i)$ (lignes en trait plein noirs en haut et en bas) et sont retirées de la série temporelle résultante. En bas : la série temporelle. Ce filtre permet de retirer les mesures aberrantes comprises dans la dynamique générale de la série temporelle. Cette variante récursive permet de définir un gabarit de filtrage plus resserré sur les données.

Cette étape ne permet pas de connaître, ni la précision des séries temporelles altimétriques, ni leur qualité, mais permet néanmoins deux choses au travers de la quantification de la dispersion groupe :

- estimer l'impact des dimensions de la fenêtre d'extraction sur la dispersion des mesures,
- réaliser que les mesures sont d'autant plus réalistes, à un biais près, que leur dispersion de groupe est faible.

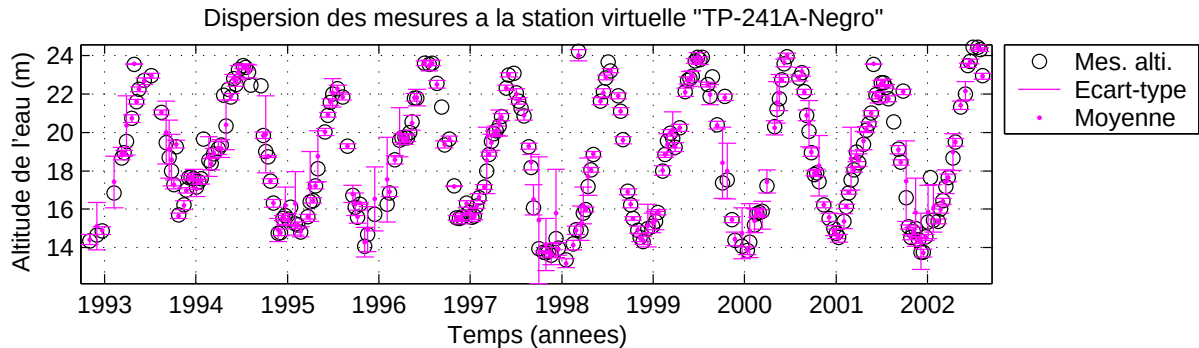


FIG. 3.12: Illustration de la dispersion des groupes de mesures altimétriques, pour chaque passage du satellite. Données issues de la mission Topex/Poseidon, à la station virtuelle « TP-241A-Negro » (produit AVISO/M-GDR).

Le calcul de dispersion, appliqué aux mesures collectées à chaque cycle, pose ici le problème du choix d'un estimateur fiable pour les petits nombres d'échantillons. Les estimateurs de moyenne et de variance de la loi Normale ne sont pas adaptés à ces petits nombres d'échantillons.

La figure 3.12 illustre la moyenne et la dispersion pour chacun des groupes de mesures. La tendance générale montre que lorsque les mesures altimétriques semblent se trouver en période de hautes eaux, la dispersion semble diminuer, alors que lorsque les mesures altimétriques semblent se trouver en période de basses eaux, la dispersion semble augmenter. Nous pouvons donc en conclure que l'interprétation des valeurs de range (faites à partir des formes d'ondes radar) semble être plus difficile à réaliser durant les périodes de bases eaux que pendant les périodes de hautes eaux (ce point est abordé en détail dans les chapitres 7 & 8).

3.10 Conclusions

La figure 3.13 illustre de manière synthétique le mécanisme de construction des produits alti-hydrologiques. Les opérations qui viennent d'être décrites dans cette section doivent être mises en œuvre dans l'ordre où elles sont illustrées sur cette figure. Ceci est vrai pour toutes les opérations à l'exception des opérations de sélection d'une mesure par passage et des opérations de filtrage.

Il est parfois intéressant de repenser la configuration des filtres à appliquer aux séries temporelles altimétriques ainsi que leur ordonnancement. Chaque combinaison choisie permettra alors de générer un nouveau produit alti-hydrologique. L'ensemble des combinaisons possibles est donc énorme. Cependant, la définition de la chaîne de génération d'un produit alti-hydrologique sera établie en fonction des caractéristiques du produit altimétrique que seul l'utilisateur peut estimer. Il en est ainsi lorsqu'un seul produit altimétrique est utilisé.

Lorsque l'on souhaite comparer des produits altimétriques entre eux, une chaîne de génération commune peut être définie afin de générer des produits alti-hydrologiques homogènes, permettant ainsi de les comparer dans des conditions de traitement strictement identiques. Les choix qui sont faits dans cette étape de génération sont les premiers paramètres qui vont avoir une influence sur la qualité globale d'un produit altimétrique au travers d'un produit alti-hydrologique.

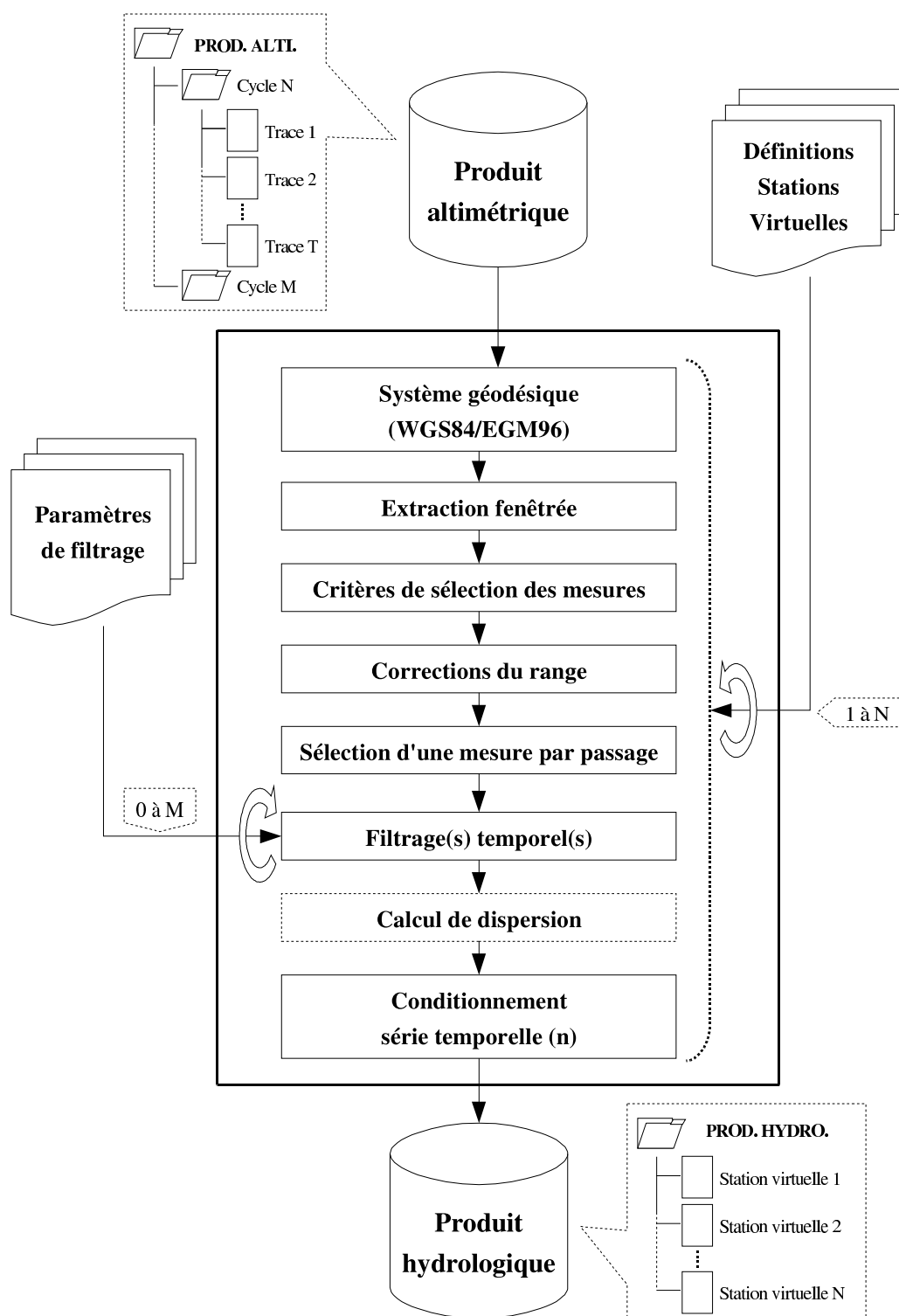


FIG. 3.13: Illustration schématique des différentes étapes de traitement de la méthode de construction des séries temporelles altimétriques constitutantes d'un produit alti-hydrologique. Les séries temporelles altimétriques sont extraites depuis un produit altimétrique d'après les définitions des stations virtuelles. Elles subissent ensuite une série de traitements permettant d'obtenir des séries de mesures exploitables. Les étapes de filtrages sont appliquées en fonction des paramètres de filtrage fixés par l'utilisateur et caractérisent le produit alti-hydrologique résultant. Enfin, les séries temporelles altimétriques sont stockées sous forme de fichiers pour constituer le produit alti-hydrologique et sont prêtes à l'emploi. Plusieurs produits alti-hydrologiques peuvent être générés à partir d'un produit altimétrique en modifiant les paramètres d'entrée utilisés : définitions des stations virtuelles, méthodes et paramètres de filtrage.

D'une manière générale, un certain nombre de déterminants jouent un rôle dans le processus de génération des séries temporelles altimétriques, et auront donc un impact sur la qualité de ces séries temporelles.

Déterminants de la qualité des séries temporelles alti-hydrologiques

Les déterminants de la qualité des produits alti-hydrologiques qui sont liés aux opérations de génération des séries temporelles altimétriques peuvent être classés en quatre catégories : (1) la technique de mesure radar, (2) la cible mesurée, (3) les caractéristiques des produits altimétriques et (4) la méthode de construction des séries temporelles altimétriques.

La liste ci-dessous énumère (de manière non-exhaustive) les principaux déterminants, par catégories :

1. Technique de mesure :
 - Précision de l'altimètre
 - Précision de l'orbite du satellite
2. Cible mesurée :
 - Caractéristiques morphologiques et états des surfaces : surface d'eau dans l'empreinte radar, rugosité de surface, etc.
 - Relief rencontré à l'approche de la station virtuelle (effet de « décrochage »)
3. Produits altimétriques utilisés :
 - Qualité et présence (ou non) des diverses corrections géophysiques
 - Conditionnement et limites numériques pour la représentation de grandeurs mesurées¹²
4. Construction des séries temporelles altimétriques :
 - Choix d'un modèle de géoïde
 - Dimensions de la fenêtre d'extraction
 - Paramètres utilisateur pour la génération des séries temporelles altimétriques :
 - Opérateur de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite
 - Paramètres et ordonnancement des processus de filtrage

¹²Ce point n'est pas abordé ailleurs dans ce mémoire, mais notons simplement que certains produits altimétriques développés pour des applications en océanographie ne sont pas prévus pour représenter correctement l'amplitude des valeurs de ranges mesurées sur les surfaces continentales. Par exemple, le produit AVISO/M-GDR de la mission Topex/Poseidon contient des valeurs de compléments de ranges (valeur permettant de construire les mesures altimétriques individuelles à 10Hz à partir de la mesure moyenne à 1Hz) représentées par un nombre entier codé sur deux octets dont l'unité est le mm. L'amplitude de cette variable est limitée à $\pm(2^{15} - 1)$ mm, soit $\pm 32,767$ m, ce qui est insuffisant lorsque le relief survolé par Topex/Poseidon est très accidenté. Dans les cas où la valeur réelle dépasse ces limites, la valeur de complément du range enregistrée est alors positionnée à une valeur par défaut, la mesure est donc perdue. Ceci peut avoir pour effet de dégrader en apparence la période d'échantillonnage effective sur une station virtuelle car bien souvent plusieurs mesures altimétriques individuelles consécutives sont perdues.

Deuxième partie

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE STANDARD POUR LA QUANTIFICATION DE LA QUALITÉ DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES

Chapitre 4

BASES DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

Sommaire

4.1	Introduction à la méthode proposée	96
4.1.1	Utilisation systématique de mesures in-situ reconstituées	96
4.1.2	Quantification de l'« erreur approximée » $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ et des indicateurs de précision approxi- més et de précision réelle	96
4.1.3	Analyse statistiquement significative sur la qualité des mesures altimétriques .	96
4.2	Formalisation mathématique de l'erreur et des indicateurs de précision	97
4.2.1	Développement de l'erreur moyenne ($\mu_{\varepsilon_{Sat}}$)	98
4.2.2	Développement de la variance de l'erreur ($\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2$)	99
4.2.3	Développement de l'erreur moyenne quadratique ($RMS_{\varepsilon_{Sat}}^2$)	100
4.2.4	Synthèse	101
4.3	Elaboration d'une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Pro- duits Alti-Hydrologiques	101
4.3.1	Calcul des indicateurs de précision approxi- més $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ par quantifica- tion de l'erreur approximée $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$	102
4.3.2	Estimation des indicateurs de précision finaux $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ par prise en compte des indicateurs de précision des mesures in-situ et des mesures in-situ reconstituées	102
4.3.3	Schéma synthétique de la méthode	102

4.1 Introduction à la méthode proposée

La quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques se présente comme un enjeu majeur pour l'exploitation effective de l'altimétrie satellitaire radar dans les applications en hydrologie et l'étude des eaux de surface en général. Comme nous venons de le voir à la section 1.3, il n'existe pas pour le moment de cadre formel permettant de mener à bien la quantification et l'analyse statistique de la précision des produits altimétriques ou alti-hydrologiques.

Cette lacune s'explique principalement par la difficulté qui se présente lorsque l'on souhaite quantifier la précision des mesures altimétriques par comparaison directe avec des mesures in-situ : la couverture spatiale des missions altimétriques couplée aux limitations d'accès aux mesures in-situ font que le nombre de sites d'étude est très réduit.

Ces limitations ont restreint les précédents travaux d'analyse de la précision par comparaison directe aux mesures in-situ à quelques sites d'étude, et ont empêché l'analyse à grande échelle de la précision des produits altimétriques ou alti-hydrologiques. Nous introduisons dans ce chapitre une démarche permettant de dépasser cette limitation et nous proposons une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques.

Cette méthode porte sur la qualité au sens « altimétrique » telle que définie au § 2.1.4 par le calcul des indicateurs de précision des mesures (moyenne $\mu_{\varepsilon_{Sat}}$, écart-type $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ et $RMSE_{\varepsilon_{Sat}}$) et des indicateurs d'échantillonnage (période d'échantillonnage effective T_{eff} et taux de pertes de mesures η_{eff}).

4.1.1 Utilisation systématique de mesures in-situ reconstituées

La méthode que nous avons développée dans le cadre de cette thèse propose une solution alternative à la comparaison directe des mesures altimétriques aux mesures in-situ, et repose sur la comparaison systématique des mesures altimétriques à des mesures in-situ reconstituées sous la trace des satellites. Ces mesures in-situ reconstituées sont construites afin d'estimer le niveau du cours d'eau à l'endroit des mesures altimétriques (i.e. à la station virtuelle, cf. § 5.2).

Bien que la capacité à reconstituer des mesures in-situ dépende de la distance aux stations limnimétriques délivrant des mesures in-situ à l'amont et à l'aval de la station virtuelle, ainsi que de la morphologie et de l'hydrologie du cours d'eau, cette approche permet cependant d'élargir considérablement le nombre de sites sur lesquels il est possible de quantifier une précision approximée des mesures altimétriques.

4.1.2 Quantification de l'« erreur approximée » $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ et des indicateurs de précision approximatifs et de précision réelle

Le fait de quantifier la précision des mesures altimétriques par comparaison aux mesures in-situ reconstituées présente certaines imperfections. En effet, quelle que soit la technique utilisée pour reconstituer des mesures in-situ à partir de mesures amont et aval, elle introduit une erreur supplémentaire dans le bilan global de l'erreur des mesures altimétriques que nous sommes capables de quantifier.

Nous appelons l'« erreur approximée » des mesures altimétriques, l'erreur obtenue par comparaison des mesures altimétriques aux mesures in-situ reconstituées.

La section 4.2 propose un développement mathématique de l'erreur des mesures altimétriques et de ses indicateurs de précision. Il permet d'exprimer l'erreur réelle des mesures altimétriques en fonction de l'erreur approximée et des autres postes d'erreurs imputables aux mesures in-situ ainsi qu'aux mesures in-situ reconstituées.

4.1.3 Analyse statistiquement significative sur la qualité des mesures altimétriques

L'analyse de la précision des séries temporelles altimétriques, à l'aide de la méthode proposée, appliquée à un grand nombre de stations virtuelles permet d'aborder le problème de la précision des mesures altimétriques d'un point de vue statistique, à l'échelle d'un produit alti-hydrologique. Cette approche

permet la mise en œuvre de nouvelles applications parmi lesquelles deux sont particulièrement intéressantes : (1) le calcul de l'incertitude associée aux mesures altimétriques par modélisation de l'erreur (en fonction de paramètres géophysiques, cf. chapitre 8) ; (2) la comparaison de la précision entre différents produits alti-hydrologiques (cf. chapitre 7) pour améliorer les chaînes de traitement.

Ces deux applications permettent de combler les lacunes actuelles quant à l'exploitation des données altimétriques pour le suivi du niveau des cours d'eau :

- Le calcul de l'incertitude associée aux mesures altimétriques par modélisation de l'erreur permet de qualifier la donnée altimétrique et donc de juger de sa pertinence pour diverses applications en hydrologie,
- La comparaison de la précision entre différents produits alti-hydrologiques permet d'évaluer les améliorations apportées par de nouveaux développements tels que de nouvelles missions altimétriques, de nouveaux algorithmes de tracking et retracking, de nouvelles chaînes de génération des produits altimétriques (calcul des corrections) et chaînes de génération des produits alti-hydrologiques.

4.2 Formalisation mathématique de l'erreur et des indicateurs de précision

Idéalement, nous souhaiterions pouvoir quantifier l'erreur des mesures altimétriques (ε_{Sat}) obtenue par comparaison directe des mesures altimétriques (Z_{Sat}) aux valeurs réelles du niveau des cours d'eau (Z). Pour mémoire (cf. éq. 2.1), l'erreur de la $n^{\text{ème}}$ mesure d'une série temporelle altimétrique s'écrit :

$$\varepsilon_{Sat}(n) = Z_{Sat}(n) - Z(n) \quad (4.1)$$

Puisque nous ne disposons pas des valeurs réelles du niveau des cours d'eau, mais des mesures de celles-ci, il n'est possible de quantifier qu'une erreur approchée ($\varepsilon_{sat_{Mis}}$), obtenue par comparaison des mesures altimétriques aux mesures in-situ (Z_{Mis}) :

$$\varepsilon_{sat_{Mis}}(n) = Z_{Sat}(n) - Z_{Mis}(n) \quad (4.2)$$

Cependant - comme nous l'avons vu précédemment - les sites de stations virtuelles où il est possible d'effectuer une comparaison directe entre mesures altimétriques et mesures in-situ sont très rares. La quantification de l'erreur $\varepsilon_{sat_{Mis}}$ est limitée à un faible nombre de sites (stations virtuelles) et ne permet donc pas d'aborder le problème de la qualité des mesures altimétriques de manière systématique et statistiquement significative.

Pour palier à cela, nous avons généralisé l'utilisation de séries temporelles à la station virtuelle, reconstituées à partir de mesures in-situ amont et aval (Z_{Ris}), ce qui permet d'évaluer l'erreur des mesures altimétriques sur de nombreux sites.

Par la suite et pour simplifier les notations, nous appellerons :

- « série temporelle in-situ reconstituée » Z_{Ris} , la série temporelle reconstituée à partir des mesures in-situ amont et aval,
- « mesures in-situ reconstituées » $Z_{Ris}(n)$, les valeurs de cette série temporelle in-situ reconstituée,
- « erreur approximée des mesures altimétriques » ($\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ ou $\varepsilon_{sat_{Ris}}$), l'écart entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées.

$$\tilde{\varepsilon}_{Sat}(n) = \varepsilon_{sat_{Ris}}(n) = Z_{Sat}(n) - Z_{Ris}(n) \quad (4.3)$$

Parallèlement à cela, nous pouvons exprimer l'erreur des mesures in-situ (ε_{Mis} , erreur des mesures de niveau acquises par les stations limnimétriques) :

$$\varepsilon_{Mis}(n) = Z_{Mis}(n) - Z(n) \quad (4.4)$$

Nous pouvons de la même façon exprimer l'erreur des mesures in-situ reconstituées (ε_{Ris}) comme la somme d'une erreur de reconstitution (ε_{Rec}) et d'une erreur de mesure in-situ (ε_{Mis}) :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{Ris}(n) &= Z_{Ris}(n) - Z(n) \\ &= Z_{Ris}(n) - Z_{Mis}(n) + Z_{Mis}(n) - Z(n) \\ &= \varepsilon_{Rec}(n) + \varepsilon_{Mis}(n)\end{aligned}\quad (4.5)$$

Finalement, en reprenant l'équation (4.1) ci-dessus, l'erreur des mesures altimétriques que nous cherchons à quantifier s'exprime comme une composition de trois sources d'erreur :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{Sat}(n) &= Z_{Sat}(n) - Z(n) \\ &= Z_{Sat}(n) - Z_{Ris}(n) + Z_{Ris}(n) - Z_{Mis}(n) + Z_{Mis}(n) - Z(n) \\ &= \tilde{\varepsilon}_{Sat}(n) + \varepsilon_{Rec}(n) + \varepsilon_{Mis}(n)\end{aligned}\quad (4.6)$$

De façon générale, comme nous le verrons plus loin, nous appelons « erreur de reconstitution » l'erreur commise en reconstituant les mesures in-situ à une station limnimétrique à partir des mesures in-situ issues de stations limnimétriques amont et aval.

En reprenant les équations de définition des indicateurs de précision vus au chapitre 2 (§ 2.1.3, page 51), nous pouvons développer l'expression des indicateurs de précision de l'erreur approximée des mesures altimétriques, et montrer que cette erreur approximée ($\tilde{\varepsilon}_{Sat}$) est une surestimation de l'erreur réelle des mesures altimétriques (ε_{Sat}).

Le développement des trois indicateurs de précision de l'erreur des mesures altimétriques (μ_ε , σ_ε et RMS_ε) fait l'objet des trois sections suivantes.

Remarque : Le fait que l'erreur réelle ε_{Sat} s'exprime comme la somme d'erreurs (eq. (4.6)) ne signifie pas pour autant que l'erreur approximée $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ que nous quantifions est inférieure à l'erreur réelle. En effet, aucun a priori ne nous permet de prévoir le signe des valeurs prises par les trois termes d'erreur de cette équation.

4.2.1 Développement de l'erreur moyenne ($\mu_{\varepsilon_{Sat}}$)

Selon l'équation (2.2), l'expression de l'erreur moyenne peut s'écrire sous la forme :

$$\mu_{\varepsilon_{Sat}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{Sat}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{\varepsilon}_{Sat}(n) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{Rec}(n) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{Mis}(n) \quad (4.7)$$

Soit après identification :

$$\mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \quad (4.8)$$

La moyenne de l'erreur des mesures altimétriques ($\mu_{\varepsilon_{Sat}}$) est le résultat d'une composition de plusieurs sources d'erreurs :

- erreurs de tracking (ou de retracking) induisant parfois d'importantes surestimations du niveau moyen des eaux, notamment en périodes de basses eaux,
- lacunes et imperfections des corrections du range (d'après [Mercier et Zanife, 2006], la valeur moyenne totale des corrections est d'environ 2, 5m pour la mission Topex/Poseidon),
- le modèle de géoïde utilisé (composante systématique d'erreur du géoïde)

L'équation (4.8) nous indique que nous allons pouvoir estimer cette erreur moyenne moyenne des mesures altimétriques comme la somme algébrique de la moyenne de l'erreur approximée des mesures altimétriques, de la moyenne de l'erreur de reconstitution et de la moyenne de l'erreur des mesures in-situ.

4.2.2 Développement de la variance de l'erreur ($\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2$)

D'après l'équation (4.6), nous pouvons exprimer l'erreur approximée des mesures altimétriques ($\tilde{\varepsilon}_{Sat}$) - erreur que nous savons quantifier - comme la combinaison des erreurs : des mesures altimétriques, du processus de reconstitution et des mesures in-situ :

$$\tilde{\varepsilon}_{Sat}(n) = \varepsilon_{Sat}(n) - \varepsilon_{Rec}(n) - \varepsilon_{Mis}(n) \quad (4.9)$$

La variance de l'erreur approximée des mesures altimétriques peut donc s'écrire comme une combinaison de la variance de ces erreurs :

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\tilde{\varepsilon}_{Sat}(n) - \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}]^2 \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\varepsilon_{Sat}(n) - \mu_{\varepsilon_{Sat}} - \varepsilon_{Rec}(n) + \mu_{\varepsilon_{Rec}} - \varepsilon_{Mis}(n) + \mu_{\varepsilon_{Mis}}]^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

En développant puis en regroupant les termes de la seconde ligne de l'équation (4.10), nous montrons que :

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\varepsilon_{Sat}(n) - \mu_{\varepsilon_{Sat}}]^2 \\ &+ \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\varepsilon_{Rec}(n) - \mu_{\varepsilon_{Rec}}]^2 \\ &+ \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\varepsilon_{Mis}(n) - \mu_{\varepsilon_{Mis}}]^2 \\ &+ \frac{2}{N-1} \sum_{n=1}^N (\varepsilon_{Rec}(n) - \mu_{\varepsilon_{Rec}}) \cdot (\varepsilon_{Mis}(n) - \mu_{\varepsilon_{Mis}}) \\ &- \frac{2}{N-1} \sum_{n=1}^N (\varepsilon_{Sat}(n) - \mu_{\varepsilon_{Sat}}) \cdot (\varepsilon_{Rec}(n) - \mu_{\varepsilon_{Rec}}) \\ &- \frac{2}{N-1} \sum_{n=1}^N (\varepsilon_{Mis}(n) - \mu_{\varepsilon_{Mis}}) \cdot (\varepsilon_{Sat}(n) - \mu_{\varepsilon_{Sat}}) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Après identification dans l'équation (4.11), nous trouvons :

$$\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 = \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 + 2\mathbb{V}(\varepsilon_{Rec}, \varepsilon_{Mis}) - 2[\mathbb{V}(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Rec}) + \mathbb{V}(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Mis})] \quad (4.12)$$

La variance de l'erreur approximée des mesures altimétriques ($\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2$) s'écrit comme la somme des variances des erreurs des mesures altimétriques ($\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2$), du processus de reconstitution ($\sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2$) et des mesures in-situ ($\sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2$) ainsi que d'une combinaison de trois termes de covariance entre ces trois erreurs : $\mathbb{V}(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Rec})$, $\mathbb{V}(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Mis})$ et $\mathbb{V}(\varepsilon_{Rec}, \varepsilon_{Mis})$.

Les variances des trois erreurs ε_{Sat} , ε_{Rec} et ε_{Mis} s'expliquent en partie par les raisons suivantes :

$\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2$: intègre les lacunes et imperfections des composantes variables des corrections du range¹, l'erreur variable du modèle de géoïde utilisé et l'erreur des mesures altimétriques elles-mêmes : mauvaise estimation du range (forme d'onde mal interprétée), instabilité du tracking dans des configurations de mesures défavorables (relief variant brutalement à l'approche de la station virtuelle qui fait « décrocher » l'altimètre, phénomène accroche persistente, etc.),

¹Pour exemple, et selon [Mercier et Zanife, 2006], l'amplitude annuelle de la correction de troposphère humide peut atteindre 50cm environ.

- $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2$: intègre l'erreur induite par la méthode de reconstitution : (1) l'imperfection du modèle notamment lorsque l'hypothèse sur la forme du profil de la ligne d'eau énoncée par la condition n°3 du § 5.1 n'est pas vérifiée ; (2) une erreur sur le nivellement altimétrique des stations limnimétriques peut provoquer des erreurs lors de la reconstitution des séries temporelles in-situ : le polynôme utilisé pour l'interpolation des mesures in-situ est sensé représenter le profil de la ligne d'eau à un instant t . S'il est construit à partir de points de référence dont les altitudes sont erronées, sa courbure peut être faussée et la mesure in-situ reconstituée peut présenter un biais. L'hydrogramme résultant de la reconstitution de N mesures, pour un endroit donné, peut être altéré de manière non linéaire et non constante.
- $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2$: est caractéristique de la méthode de mesure in-situ. Dans le cas d'un limnimètre automatisé, la valeur de $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2$ peut être fournie par le constructeur de l'appareil. Dans le cas d'une mesure relevée par un opérateur sur une échelle de mesures, cette erreur dépend principalement de la résolution de l'échelle de mesure ainsi que de l'agitation de la surface d'eau au moment de la mesure.

Les trois termes de covariance de l'équation (4.12) $\mathbb{V}(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Rec})$, $\mathbb{V}(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Mis})$ et $\mathbb{V}(\varepsilon_{Rec}, \varepsilon_{Mis})$ sont issus des produits croisés entre les trois séries temporelles d'erreur ε_{Sat} , ε_{Rec} et ε_{Mis} . En première approche, les séries temporelles Z_{Sat} , Z_{Ris} et Z_{Mis} provenant de processus indépendants (mesure altimétrique, reconstitution et mesure in-situ), il est réaliste de présumer qu'il n'y a pas de corrélation entre les trois séries temporelles d'erreur ε_{Sat} , ε_{Rec} et ε_{Mis} . Ces termes de covariance doivent donc être proches de zéro ou du moins négligeables par rapport aux termes de variance.

Nous nous tiendrons à cette hypothèse d'indépendance statistique (orthogonalité) entre ces trois variables ε_{Sat} , ε_{Rec} et ε_{Mis} , et supposerons la condition suivante vérifiée :

$$\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \gg 2 [\mathbb{V}(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Rec}) + \mathbb{V}(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Mis}) + \mathbb{V}(\varepsilon_{Rec}, \varepsilon_{Mis})] \quad (4.13)$$

Au final, nous obtenons l'expression simplifiée de la variance de l'erreur approximée des mesures altimétriques :

$$\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \quad (4.14)$$

Nota : Il est très important d'avoir initié ce développement depuis l'équation (4.9), par opposition à la formulation de l'équation (4.6), pour obtenir des termes de covariance négligeables. En effet, dans le cas d'un développement initié depuis la formulation de l'équation (4.6), nous aurions obtenu un terme de covariance $\mathbb{V}(\tilde{\varepsilon}_{Sat}, \varepsilon_{Rec})$, entre $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ et ε_{Rec} , non négligeable puisque l'erreur approximée des mesures altimétriques ($\tilde{\varepsilon}_{Sat}$) est une combinaison de l'erreur de reconstitution (ε_{Rec}) et de l'erreur des mesures altimétriques (ε_{Sat}).

4.2.3 Développement de l'erreur moyenne quadratique ($RMS_{\varepsilon_{Sat}}^2$)

Un développement similaire à celui de l'expression de la variance (éq. 4.10 à 4.12) nous permet d'exprimer la valeur RMS de l'erreur approximée des mesures altimétriques sous la forme suivante :

$$RMS_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 = RMS_{\varepsilon_{Sat}}^2 + RMS_{\varepsilon_{Rec}}^2 + RMS_{\varepsilon_{Mis}}^2 + 2 RMS(\varepsilon_{Rec}, \varepsilon_{Mis}) - 2 [RMS(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Rec}) + RMS(\varepsilon_{Sat}, \varepsilon_{Mis})] \quad (4.15)$$

dont on montre, à l'aide de la relation (4.18) présentée plus bas, qu'elle peut s'écrire également sous la forme :

$$RMS_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 = RMS_{\varepsilon_{Sat}}^2 + RMS_{\varepsilon_{Rec}}^2 + RMS_{\varepsilon_{Mis}}^2 + 2 \mu_{\varepsilon_{Rec}} \cdot \mu_{\varepsilon_{Mis}} - 2 [\mu_{\varepsilon_{Sat}} \cdot \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Sat}} \cdot \mu_{\varepsilon_{Mis}}] \quad (4.16)$$

La relation (4.18) qui lie la valeur RMS, la variance et la moyenne d'une variable x s'obtient comme

suit :

$$\begin{aligned}
 \sigma_x^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu_x)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n^2 - 2x_n\mu_x + \mu_x^2) \\
 &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N x_n^2 - \frac{2\mu_x}{N-1} \sum_{n=1}^N x_n + \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \mu_x^2 \\
 &= \frac{N}{N-1} RMS_x^2 - \frac{2N\mu_x^2}{N-1} + \frac{N\mu_x^2}{N-1} \\
 &= \frac{N}{N-1} RMS_x^2 - \frac{N\mu_x^2}{N-1}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Soit :

$$RMS_x^2 = \mu_x^2 + \frac{N-1}{N} \sigma_x^2 \tag{4.18}$$

Cette formulation des valeurs RMS sera utilisée lors de l'étape de correction des indicateurs de précision des mesures altimétriques opérée au chapitre 6. Elle y est utilisée pour calculer la valeur RMS corrigée, à partir de la variance et de la moyenne corrigées.

4.2.4 Synthèse

D'après les équations (4.8) et (4.14), nous pouvons exprimer la moyenne et la variance de l'erreur approximée des mesures altimétriques, obtenues par comparaison à des mesures in-situ reconstituées :

$$\begin{cases} \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} = \mu_{\varepsilon_{Sat}} - \mu_{\varepsilon_{Rec}} - \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases} \tag{4.19}$$

Les équations (4.8) et (4.12) expriment sous une forme théorique et mathématique le fait que la quantification de la moyenne et de la variance de l'erreur des mesures altimétriques par comparaison à une série temporelle in-situ reconstituée induit :

- Pour la moyenne : un biais systématique d'estimation de l'erreur moyenne des mesures altimétriques, égal à $\mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}}$,
- Pour la variance : une surestimation de la variance sensiblement égale à $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2$.

Ainsi, sous réserve de pouvoir quantifier ou estimer :

- la valeur des indicateurs de précision $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$ de l'erreur imputable aux mesures in-situ, et
 - la valeur des indicateurs de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ de l'erreur imputable à la reconstitution,
- alors les équations (4.8) et (4.14) permettent de s'approcher de la valeur réelle des indicateurs de précision des mesures altimétriques ($\mu_{\varepsilon_{Sat}}$, $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ et $RMS_{\varepsilon_{Sat}}$).

4.3 Elaboration d'une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques

La Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques que nous proposons repose sur la confrontation entre mesures altimétriques Z_{Sat} et mesures in-situ reconstituées Z_{Ris} et sur la quantification des termes des équations (4.19) pour fournir une estimation de $\mu_{\varepsilon_{Sat}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$. Elle s'articule en six grandes étapes présentées en détails aux chapitres 5 et 6, dont voici un bref descriptif :

4.3.1 Calcul des indicateurs de précision approximatés $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ par quantification de l'erreur approximatée $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$

Les trois premières étapes de la méthode permettent, par confrontation systématique à une série temporelle in-situ reconstituée, de quantifier l'erreur approximatée d'une série temporelle alti-hydrologique ainsi que les indicateurs de précision approximatés associés $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$, $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $RM\tilde{S}_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$.

Etape 1 : Reconstitution d'une série temporelle in-situ (Z_{Ris}) à la station virtuelle à partir des mesures in-situ issues de stations limnimétriques amont et aval.

Etape 2 : Construction de la série temporelle de l'erreur approximatée des mesures altimétriques ($\tilde{\varepsilon}_{Sat}$) par comparaison des mesures altimétriques (Z_{Sat}) aux mesures in-situ reconstituées (Z_{Ris}).

Etape 3 : Calcul des indicateurs de précision approximatés ($\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$, $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $RM\tilde{S}_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$) et des indicateurs d'échantillonnage finaux (T_{eff} et η_{eff}).

Le chapitre 5 développe en détail ces trois étapes.

4.3.2 Estimation des indicateurs de précision finaux $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ par prise en compte des indicateurs de précision des mesures in-situ et des mesures in-situ reconstituées

Les trois dernières étapes de la méthode permettent d'estimer les indicateurs de qualité finaux² d'un produit alti-hydrologique sur une station virtuelle.

Etape 4 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$.

Etape 5 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ reconstituées $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$. Quantification de l'erreur des mesures in-situ reconstituées (ε_{Rec}) sur des stations limnimétriques de test ; modélisation des indicateurs ($\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$) et estimation de leurs valeurs pour chacune des stations virtuelles du produit alti-hydrologique.

Etape 6 : Estimation des indicateurs de précision finaux ($\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$, $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $R\hat{M}S_{\varepsilon_{Sat}}$) à partir de l'équation (4.19) et analyse des possibles cas de rejets.

Le chapitre 6 développe en détail ces trois étapes.

4.3.3 Schéma synthétique de la méthode

La figure 4.1 illustre de manière schématique le déroulement de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques au travers de ses six étapes.

Pour obtenir une estimation statistiquement significative de la qualité d'un produit alti-hydrologique sur un réseau hydrographique, il convient d'appliquer ces six étapes à un grand nombre de stations virtuelles. Ceci fera l'objet du chapitre 7 où la méthode sera déployée pour différents produits alti-hydrologiques sur une centaine de stations virtuelles du réseau hydrographique amazonien.

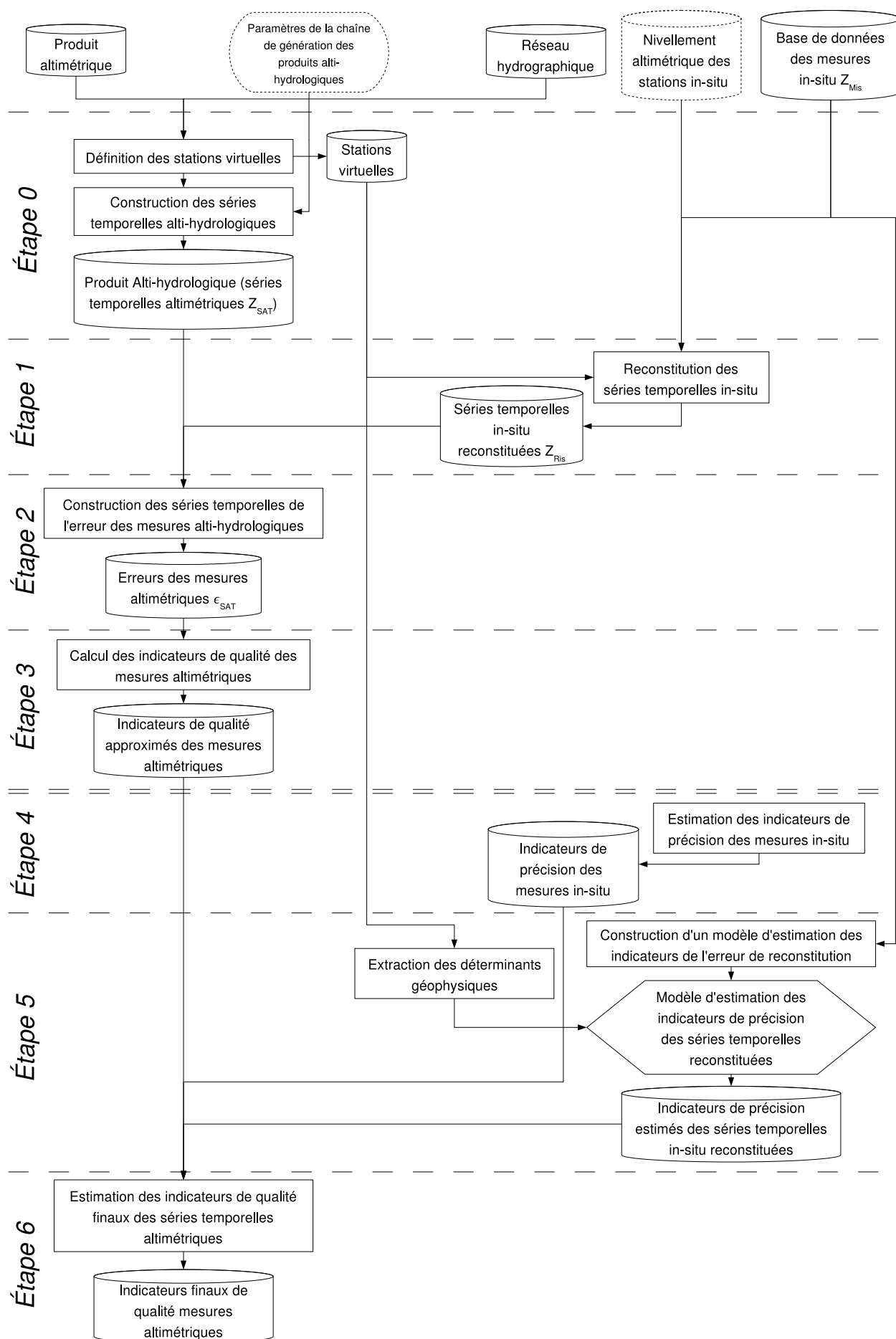
Une étape supplémentaire appelée « Etape 0 » est incluse dans ce schéma, elle correspond à la chaîne de génération des produits alti-hydrologiques à partir de produits altimétriques. De cette manière, la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques peut être vue comme

²Les indicateurs d'échantillonnage finaux sont indépendants de la qualité des mesures in-situ ou des mesures in-situ reconstituées et sont donc obtenus dès la fin de l'étape 3 de la méthode.

un outil permettant de quantifier la qualité de produits altimétriques dits de « niveau 2 » (cf. § 2.3) aussi bien que de produits plus évolués tels que les produits alti-hydrologiques.

L'intérêt d'un tel outil est de pouvoir comparer différentes chaînes de génération des produits alti-hydrologiques et de pouvoir définir la chaîne la plus adaptée au traitement de tel ou tel produit altimétrique ou bien aux besoins des utilisateurs finaux des produits alti-hydrologiques.

FIG. 4.1: (ci-contre) Schéma complet d'implantation de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques. En entrée : produit altimétrique ; réseau hydrographique ; mesures in-situ et autres données annexes (paramètres de génération du produit alti-hydrologique et nivellement altimétrique des stations limnimétriques). La méthode se déroule en 6+1 étapes : (0) Génération d'un produit alti-hydrologique (optionnel), (1) Reconstitution des séries temporelles in-situ, (2) Construction des séries temporelles de l'erreur approximée des mesures altimétriques, (3) Calcul des indicateurs de qualité approximés ; (4) Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ ; (5) Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ reconstituées et (6) Calcul des indicateurs de qualité finaux des mesures altimétriques.



Chapitre 5

PREMIÈRE APPROXIMATION DES INDICATEURS DE QUALITÉ PAR COMPARAISON AUX SÉRIES TEMPORELLES IN-SITU RECONSTITUÉES

Sommaire

5.1	Introduction	108
5.2	Etape 1 : Reconstitution d'une série temporelle in-situ à la station virtuelle	108
5.2.1	Technique de reconstitution des séries temporelles in-situ en des points des cours d'eau par interpolation polynomiale à minimum d'énergie entre les stations limnimétriques	109
5.2.2	Solution par interpolation polynomiale de degré trois ou quatre	111
5.3	Etape 2 : Construction d'une série temporelle de l'erreur approximée	114
5.3.1	Corrections horaires et appariement des mesures in-situ et altimétriques	116
5.3.2	Construction d'une série temporelle de l'erreur approximée des mesures altimétriques	118
5.4	Etape 3 : Calcul de la première approximation des indicateurs de qualité	118
5.4.1	Critères de représentativité hydrologique des séries temporelles in-situ reconstituées et conditions de recevabilité	120
5.4.2	Approximation de la « qualité globale » des mesures altimétriques	125
5.4.3	Approximation de la « qualité par périodes hydrologiques » des mesures altimétriques	125
5.5	Conclusion	128

5.1 Introduction

Le chapitre 4 a introduit les bases d'une « Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques » reposant sur la confrontation entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées aux stations virtuelles et sur le développement mathématique des indicateurs de précision aboutissant aux équations (4.19).

Le présent chapitre détaille les trois premières étapes de cette méthode (cf. § 4.3.1) consacrées au calcul des indicateurs de qualité approximatifs $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ résultant de cette confrontation entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées.

Le chapitre 6 détaillera les trois étapes suivantes permettant de tenir compte des erreurs de mesures in-situ et des erreurs de mesures in-situ reconstituées pour améliorer l'estimation des indicateurs de qualité des mesures altimétriques.

Note : Sauf mention contraire, les séries temporelles altimétriques présentées dans les figures de ce chapitre sont issues du produit alti-hydrologique « AVISO/M-GDR/aec-opp-fg3-fcr2p5 ».

5.2 Etape 1 : Reconstitution d'une série temporelle in-situ à la station virtuelle à partir des mesures in-situ amont et aval

Pour la majorité des stations virtuelles altimétriques, la station limnimétrique la plus proche se situe à une distance trop grande pour pouvoir raisonnablement être comparée directement à la série temporelle altimétrique. La figure 5.1 montre, dans le cas du bassin amazonien, l'histogramme de distribution des distances des stations virtuelles aux stations limnimétriques les plus proches. La distance médiane pour 38 stations virtuelles (sur 77) est de 55km environ.

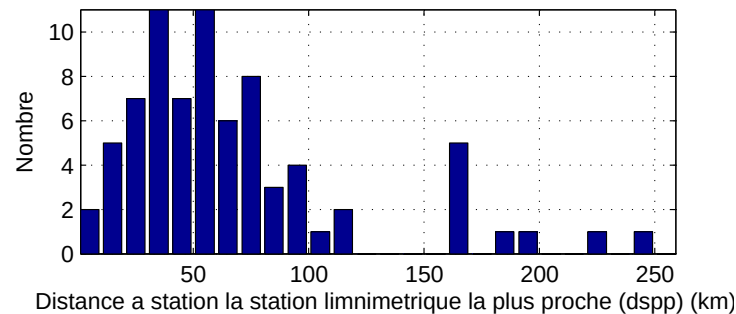


FIG. 5.1: Histogramme des distances des stations virtuelles aux stations limnimétriques les plus proches.

De ce fait, la comparaison directe entre mesures altimétriques et mesures in-situ n'est possible que pour un très faible nombre de stations virtuelles et ne fournit pas une information statistiquement significative sur la précision des mesures altimétriques (seulement 2 stations virtuelles disposent d'une station limnimétrique à moins de 10km de distance).

Pour cette raison il est nécessaire d'appuyer l'analyse de la précision sur des séries temporelles in-situ reconstituées. A cette fin, nous avons mis au point une technique d'interpolation de la ligne d'eau à un instant t fixé, basée sur des mesures in-situ issues de stations limnimétriques amont et aval (de deux à quatre stations limnimétriques¹).

Plusieurs configurations peuvent se présenter selon la situation de la station virtuelle et la disponibilité des stations limnimétriques en amont et/ou à l'aval. Dans le cas où des stations limnimétriques sont

¹Notons toutefois que l'interpolation basée sur deux stations limnimétriques revient, quelle que soit la méthode employée, à de l'interpolation linéaire.

présentes seulement à l'amont ou à l'aval, nous nous retrouvons dans une configuration dite « d'extrapolation ». Dans le cas où des stations limnimétriques sont présentes à la fois à l'amont et à l'aval, nous nous retrouvons dans une configuration dite « d'interpolation » ; configuration a priori la plus favorable.

Plusieurs techniques pourraient être utilisées pour estimer le niveau réel des cours d'eau sous la trace du satellite. L'utilisation de modèles de propagation hydrauliques déterministes (ou de modèles conceptuels) tels que des modèles du second ordre avec retard permet de calculer en tout point x le niveau des eaux entre deux stations limnimétriques. Cependant, deux raisons nous ont poussés à privilégier la méthode d'interpolation présentée ci-dessous :

- La régularité des profils des lignes d'eau à un instant t fixé (cf. § 5.2.1, p. 109), nous permet de définir une technique simple, stable et moins gourmande en temps de calcul.
- Le calage des paramètres de modèles hydrauliques est en général un travail assez lourd, dont les résultats peuvent être d'une qualité insuffisante pour la mise en œuvre de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques.

5.2.1 Technique de reconstitution des séries temporelles in-situ en des points des cours d'eau par interpolation polynomiale à minimum d'énergie entre les stations limnimétriques

Le principe d'interpolation que nous proposons de mettre en œuvre ici repose sur une hypothèse physique sur la forme du profil de la ligne d'eau d'un cours d'eau à un instant t fixé². Nous supposons que pour des fleuves de plaine considérés sur de grandes distances, le profil longitudinal de la ligne d'eau se rapproche d'une courbe strictement croissante et convexe qui peut être qualifiée de courbe à « énergie minimale » du profil longitudinal. Cette hypothèse repose sur le fait que l'écoulement le long du cours d'eau a pour effet d'éroder plus rapidement le fond du lit aux endroits où les eaux dissipent le plus d'énergie (pente forte, vitesse d'écoulement élevée), la force d'arrachement y étant plus grande. Ce phénomène d'érosion a pour conséquence le lissage du fond du lit, et donc du profil de la ligne d'eau.

La figure 5.2 montre un échantillonnage spatial du profil longitudinal de la ligne d'eau des fleuves Solimões et Amazone à différentes dates (tous les deux mois) obtenu à partir des mesures in-situ (ANA), les stations limnimétriques ayant été nivelées par [Kosuth et al., 2006]. La forme convexe et lisse de la ligne d'eau sous-tend l'hypothèse selon laquelle son profil longitudinal à un instant t fixé est à énergie minimale (cf. éq. (5.1)).

Soit $Z(x, t)$, le niveau d'un cours d'eau à l'abscisse x et à l'instant t . Pour un tronçon de cours d'eau délimité par les abscisses curvilignes $\Delta x = [x_{\min}, x_{\max}]$, nous appellerons « énergie de son profil »³ l'expression $\mathcal{E}(t, \Delta x)$ ci-dessous. Soit pour un tronçon Δx :

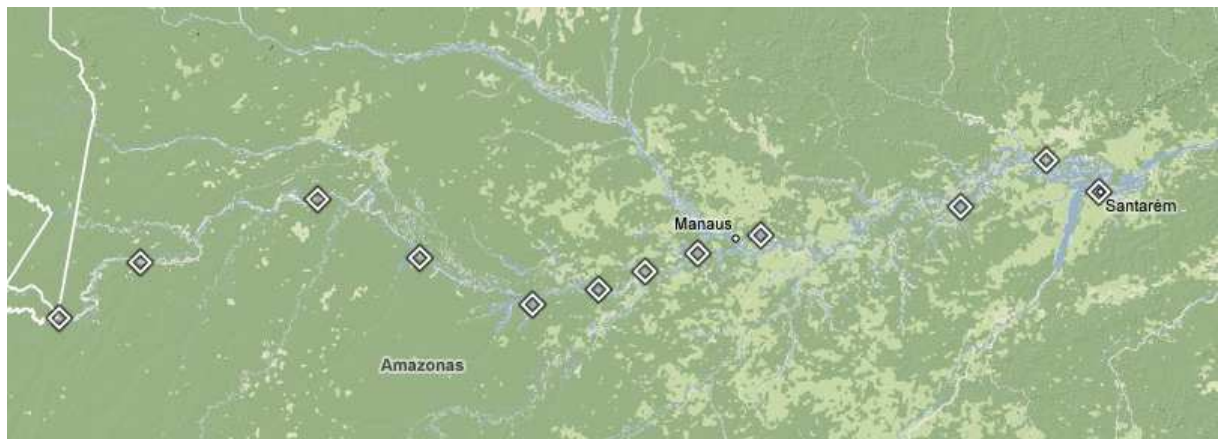
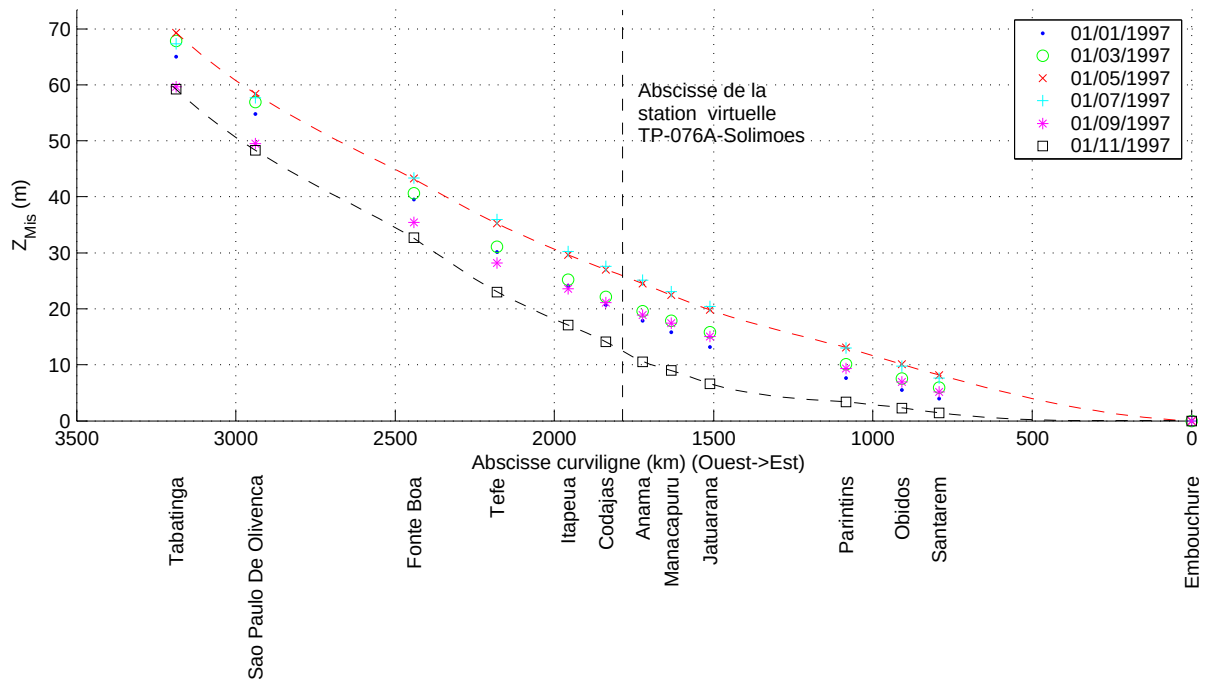
$$\mathcal{E}(t, \Delta x) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left[\frac{\partial^2 Z(x, t)}{\partial x^2} \right]^2 dx \quad (5.1)$$

avec :

$$\begin{cases} x_{\min} = \inf(\Delta x) \\ x_{\max} = \sup(\Delta x) \end{cases}$$

²Le profil de la ligne d'eau d'un cours d'eau, à un instant t fixé, représente l'altitude de la surface de l'eau en fonction de son abscisse curviligne x . Nous adoptons pour convention que l'abscisse curviligne d'un cours d'eau trouve son origine à l'océan et croît à mesure que l'on s'en éloigne vers l'amont.

³Notons qu'il ne s'agit pas de l'énergie hydraulique de l'écoulement mais d'une hypothèse sur la régularité longitudinale de la perte d'énergie.



L'enjeu réside dans le choix d'une fonction mathématique $Z(x, t)$ continue doublement dérivable permettant d'intégrer la contrainte de minimisation de l'énergie du profil de la ligne d'eau à l'instant t sur l'intervalle considéré. La fonction choisie doit vérifier les trois conditions suivantes⁴ :

1. elle passe par les points N de mesures fournis par les stations limnimétriques sélectionnées,
2. elle est continue et doublement dérivable sur l'intervalle Δx , sa dérivée seconde étant continue,
3. l'énergie $\mathcal{E}$ de la fonction sur l'intervalle Δx est minimale.

5.2.2 Solution par interpolation polynomiale de degré trois ou quatre

Parmi les fonctions d'interpolation qui respectent les trois conditions énumérées ci-dessus, les polynômes de degré N nous permettent d'intégrer la contrainte de minimisation de l'énergie tout en manipulant une écriture analytique de la solution recherchée $Z(x, t) = \sum_{i=0}^N a_i(t)x^i$.

Les conditions 1 et 3 reviennent à fixer $N + 1$ contraintes au polynôme de degré N , permettant de déterminer ses $N + 1$ paramètres. Ainsi, le degré N sera égal au nombre de stations limnimétriques utilisées pour l'interpolation.

Le choix d'un polynôme de degré quatre passant par les niveaux mesurés à quatre stations limnimétriques présente un compromis intéressant entre la complexité de calcul et le sens physique local de l'interpolation.

Si la présence et la disposition des stations limnimétriques le permet, les mesures issues de deux stations limnimétriques à l'amont de la station virtuelle et de deux autres à l'aval permettront de contraindre le polynôme de manière équilibrée. Dans les cas où les quatre stations ne sont pas réparties de manière équilibrée, les résultats seront potentiellement moins efficaces, du fait des effets de bords que présente la méthode : la courbure du polynôme étant moins réaliste à ses extrémités (i.e. les limites du tronçon du cours d'eau).

Dans les cas où seulement trois stations limnimétriques sont disponibles, l'interpolation à base de polynôme de degré trois reste intéressante car elle permet toujours de mener à bien l'interpolation à l'aide d'une courbe continue permettant d'estimer le profil de la ligne d'eau, ceci de façon plus satisfaisante qu'une simple interpolation linéaire entre deux stations limnimétriques.

On montre en effet facilement que dans le cas de deux stations limnimétriques, le polynôme de degré 2 minimisant l'énergie de la ligne d'eau se ramène à une fonction linéaire, le coefficient du terme de degré 2 étant nul (énergie nulle).

Enfin, il est important de noter que cette technique d'interpolation polynomiale implique le calage d'un nouveau polynôme pour chacune des dates pour lesquelles N mesures in-situ sont disponibles aux N stations limnimétriques.

Voici le détail de la méthode de calcul des coefficients du polynôme, dans le cas d'un polynôme de degré 4, passant par 4 points de référence (fixes) pour l'interpolation d'une mesure in-situ à l'instant t :

Soit :

- x_{SV} , le point d'abscisse curviligne de la station virtuelle où l'on souhaite reconstituer une série temporelle,
- x_1, x_2, x_3, x_4 les abscisses curvilignes des 4 stations limnimétriques amont et aval pour lesquelles on dispose de mesures in-situ,

⁴Une quatrième condition sur le caractère strictement croissant de la ligne d'eau n'a pas été prise en compte ici mais un test est mené a posteriori pour en vérifier le respect.

- le polynôme de degré quatre : $\mathcal{P}(x) = a_4.x^4 + a_3.x^3 + a_2.x^2 + a_1.x + a_0$, dont on recherche les coefficients a_4, a_3, a_2, a_1 et a_0 , respectant la condition 3 de minimisation de l'énergie $\mathcal{E}$ décrite par l'équation (5.1).
- les quatre mesures in-situ connues z_1, z_2, z_3 et z_4 relevées à l'instant t respectivement aux abscisses curvilignes x_1, x_2, x_3 et x_4 le long du cours d'eau.
- $x_{\min}$ et $x_{\max}$ les limites de l'intervalle sur lequel on souhaite minimiser l'énergie du profil longitudinal de la ligne d'eau⁵.

Nous souhaitons trouver le polynôme $\mathcal{P}(x)$ tel que :

$$z_1 = a_4.x_1^4 + a_3.x_1^3 + a_2.x_1^2 + a_1.x_1 + a_0 \quad (5.2a)$$

$$z_2 = a_4.x_2^4 + a_3.x_2^3 + a_2.x_2^2 + a_1.x_2 + a_0 \quad (5.2b)$$

$$z_3 = a_4.x_3^4 + a_3.x_3^3 + a_2.x_3^2 + a_1.x_3 + a_0 \quad (5.2c)$$

$$z_4 = a_4.x_4^4 + a_3.x_4^3 + a_2.x_4^2 + a_1.x_4 + a_0 \quad (5.2d)$$

L'application de la condition n°3 de minimisation de $\mathcal{E}$ fournit une cinquième équation.

Le terme en dérivée seconde de l'expression de $\mathcal{E}$ (éq. 5.1) s'écrit à l'instant t :

$$\frac{\partial^2 Z(x, t)}{\partial x^2} = \frac{d^2 \mathcal{P}(x)}{dx^2} = 12a_4.x^2 + 6a_3.x + 2a_2$$

L'énergie du profil de la ligne d'eau dans l'intervalle Δx à l'instant t s'écrit :

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left[\frac{\partial^2 Z(x, t)}{\partial x^2} \right]^2 dx \\ &= \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} [144a_4^2 x^4 + 144a_4 a_3 x^3 + (36a_3^2 + 48a_4 a_2)x^2 + 24a_3 a_2 x + 4a_2^2] dx \\ &= \frac{144}{5} a_4^2 (x_{\max}^5 - x_{\min}^5) + 36a_4 a_3 (x_{\max}^4 - x_{\min}^4) + (12a_3^2 + 16a_4 a_2) \cdot (x_{\max}^3 - x_{\min}^3) \dots \\ &\quad + 12a_3 a_2 (x_{\max}^2 - x_{\min}^2) + 4a_2^2 (x_{\max} - x_{\min}) \end{aligned} \quad (5.3)$$

On vérifie que l'expression de $\mathcal{E}$ ne dépend ni de a_1 , ni de a_0 car elle porte seulement sur la dérivée seconde de $\mathcal{P}(x)$.

La condition 1 appliquée aux quatre points x_1, x_2, x_3 et x_4 (éq. 5.2) permet d'exprimer les coefficients a_3, a_2, a_1 et a_0 en fonction de a_4, x_1, x_2, x_3, x_4 et de z_1, z_2, z_3 et z_4 sous la forme linéaire en a_4 ($a_i = y + z.a_4$). Ainsi, l'équation (5.3) pourra se ramener à une fonction polynomiale de degré 2 en a_4 , que l'on minimisera.

Pour exprimer de façon analytique a_0, a_1, a_2 et a_3 en fonction de a_4, x_i et Z_i , on part du système d'équations (5.2) et on passe par les étapes suivantes :

⁵Dans la pratique, l'intervalle Δx est le plus souvent défini par $x_{\min} = \min(x_1, x_2, x_3, x_4, x_{SV})$ et $x_{\max} = \max(x_1, x_2, x_3, x_4, x_{SV})$.

On passera par les sous-étapes suivantes :

$$\begin{aligned}
 (5.2a) \rightarrow & a_0 = \alpha_0 + \alpha_1 a_1 + \alpha_2 a_2 + \alpha_3 a_3 + \alpha_4 a_4 \\
 (5.2b) \rightarrow & a_1 = \beta_0 + \beta_2 a_2 + \beta_3 a_3 + \beta_4 a_4 \\
 \text{d'où} & a_0 = \alpha'_0 + \alpha'_2 a_2 + \alpha'_3 a_3 + \alpha'_4 a_4 \\
 (5.2c) \rightarrow & a_2 = \gamma_0 + \gamma_3 a_3 + \gamma_4 a_4 \\
 \text{d'où} & a_0 = \alpha''_0 + \alpha''_3 a_3 + \alpha''_4 a_4 \\
 \text{et} & a_1 = \beta'_0 + \beta'_3 a_3 + \beta'_4 a_4 \\
 (5.2d) \rightarrow & a_3 = \delta_0 + \delta_4 a_4 \\
 \text{d'où} & a_0 = \alpha'''_0 + \alpha'''_4 a_4 \\
 \text{et} & a_1 = \beta''_0 + \beta''_4 a_4 \\
 \text{et} & a_2 = \gamma'_0 + \gamma'_4 a_4
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

L'expression de $\mathcal{E}(a_4)$ devient alors :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}(a_4) = & \begin{bmatrix} 4(x_{\max} - x_{\min})\gamma_0'^2 \\ + 12(x_{\max}^2 - x_{\min}^2)\delta_0\gamma_0' \\ + 12(x_{\max}^3 - x_{\min}^3)\delta_0^2 \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} 8(x_{\max} - x_{\min})\gamma_0'\gamma_4' \\ + 12(x_{\max}^2 - x_{\min}^2)(\delta_4\gamma_0' + \delta_0\gamma_4') \\ + 24(x_{\max}^3 - x_{\min}^3)\delta_0\delta_4 \\ + 16(x_{\max}^3 - x_{\min}^3)\gamma_0' \\ + 36(x_{\max}^4 - x_{\min}^4)\delta_0 \end{bmatrix} .a_4 \\
 & + \begin{bmatrix} 4(x_{\max} - x_{\min})\gamma_4'^2 \\ + 12(x_{\max}^2 - x_{\min}^2)\delta_4\gamma_4' \\ + 12(x_{\max}^3 - x_{\min}^3)\delta_4^2 \\ + 16(x_{\max}^3 - x_{\min}^3)\gamma_4' \\ + 36(x_{\max}^4 - x_{\min}^4)\delta_4 \\ + \frac{144}{5}(x_{\max}^5 - x_{\min}^5) \end{bmatrix} .a_4^2
 \end{aligned}$$

Posons :

$$\mathcal{E}(a_4) = \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_1 .a_4 + \mathcal{E}_2 .a_4^2 \tag{5.5}$$

On recherche a_4 tel que :

$$a_4 = \arg \min_{a_4} (\mathcal{E}(a_4))$$

Puisque l'énergie $\mathcal{E}(a_4)$ est une fonction quadratique en a_4 à coefficient de a_4^2 positif, elle est minimale lorsque sa dérivée première s'annule :

$$\frac{d\mathcal{E}(a_4)}{da_4} = \mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2.a_4 = 0$$

$\mathcal{E}_1$ et $\mathcal{E}_2$ sont calculés en fonction des valeurs de $x_{\min}$, $x_{\max}$, des x_i et des z_i ($i = 1, 2, 3, 4$).
On en déduit :

$$a_4 = -\frac{\mathcal{E}_1}{2\mathcal{E}_2} \quad (5.6)$$

Il suffit enfin de remplacer le coefficient a_4 par son expression (5.6) dans les équations (5.4) pour obtenir les expressions des autres coefficients a_3 , a_2 , a_1 et a_0 .

La valeur reconstituée du niveau de l'eau au point d'abscisse curviligne x_{SV} et à l'instant t , obtenue par interpolation polynomiale à minimum d'énergie s'écrit alors :

$$Z_{Ris}(x_{SV}, t) = \mathcal{P}(x_{SV}, t) = a_4(t)x_{SV}^4 + a_3(t)x_{SV}^3 + a_2(t)x_{SV}^2 + a_1(t)x_{SV} + a_0(t)$$

où a_4 , a_3 , a_2 , a_1 et a_0 dépendent de t .

Ce calcul doit donc être répété pour tous les instants t_i , où les mesures aux stations limnimétriques amont et aval sont disponibles de manière à obtenir une série temporelle in-situ reconstituée. Cependant, la disponibilité des données aux stations limnimétriques amont et aval n'est pas toujours garantie, cela limite les instants où la série temporelle pourra être reconstituée et comparée à la série temporelle altimétrique.

Un exemple de reconstitution du profil de la ligne d'eau à différentes dates est donné à la figure 5.2. Un exemple de reconstitution de la série temporelle in-situ en une station virtuelle est donné à la figure 5.4.

Dans le cadre de cette thèse un code de calcul des séries temporelles in-situ reconstituées à base de polynômes de degré 2, 3 et 4 a été programmé en langage C sous la forme de trois bibliothèques externes (Mex-file) pour Matlab⁶, selon le schéma de la figure 4.1 et les développements mathématiques de la section 5.2.

Le module d'interpolation qui exploite ces trois méthodes d'interpolation permet de prendre en charge les cas où $N = 1, 2, 3$ ou 4 station(s) limnimétrique(s) amont et/ou aval sont utilisées pour reconstituer la série temporelle aux instants t requis. Il permet ainsi d'obtenir de manière transparente une série temporelle in-situ reconstituée du niveau des cours d'eau aux stations virtuelles, quel que soit le nombre de stations limnimétriques sélectionnées pour cette reconstitution.

Dans le cas de l'application au bassin amazonien, les stations limnimétriques utilisées pour reconstituer chaque station virtuelle doivent être définies par l'utilisateur. Ce choix fait intervenir son jugement personnel sous la forme d'un compromis entre le nombre de stations limnimétriques à utiliser et leur distance à la station virtuelle. L'annexe A présente, pour les stations virtuelles définies sur les orbites de Topex/Poseidon et ENVISAT, le choix des stations limnimétriques utilisées pour reconstituer les séries temporelles in-situ.

5.3 Etape 2 : Construction d'une série temporelle de l'erreur approximée des mesures alti-hydrologiques

La méthode de construction des séries temporelles de l'erreur aux stations virtuelles présentée ici s'appuie sur la comparaison entre les séries temporelles altimétriques et les séries temporelles in-situ

⁶L'implémentation sous forme de bibliothèque externe écrite en C permet de réduire de manière significative le temps de calcul nécessaire au calcul des coefficients des polynômes.

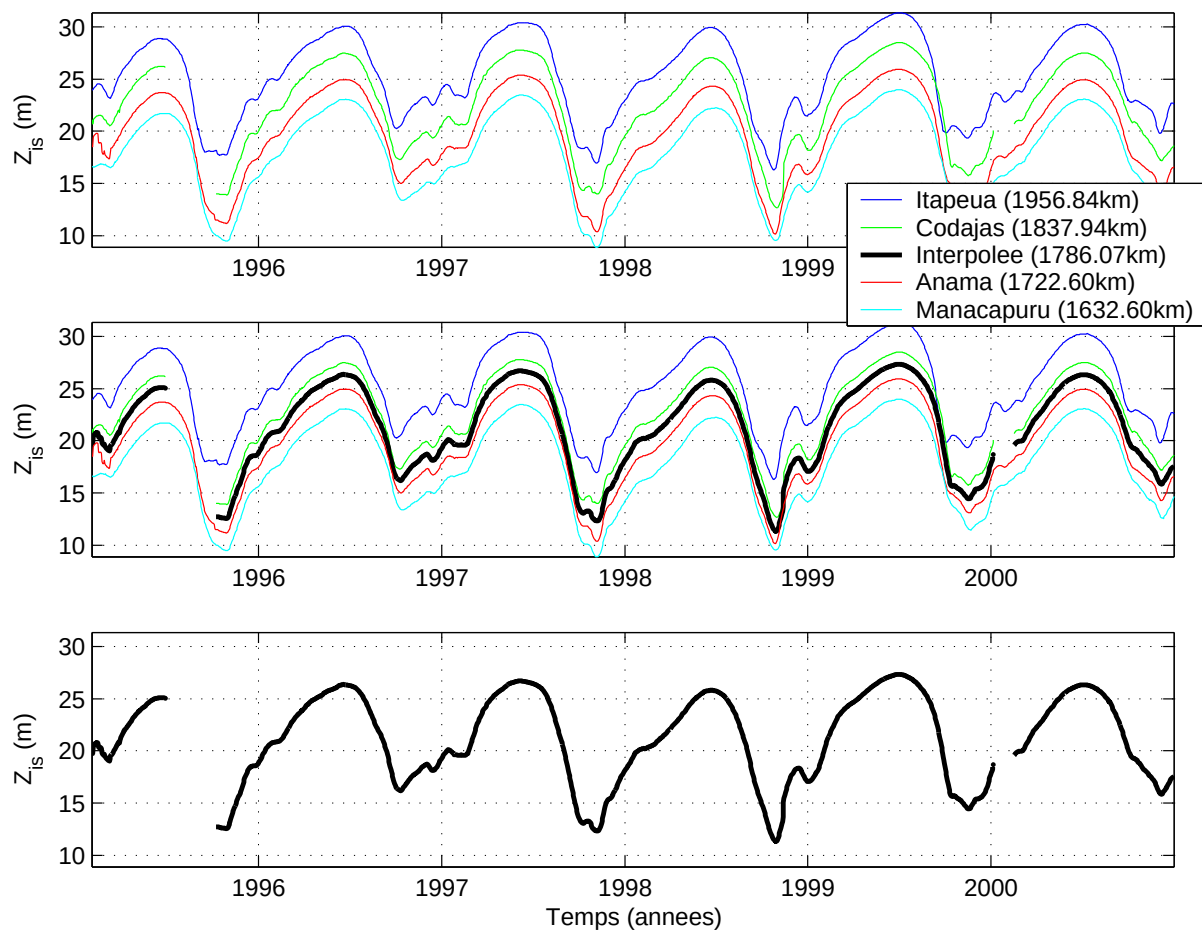


FIG. 5.4: Exemple de série temporelle in-situ à la station virtuelle « TP-076A-Solimoes » sur le fleuve Solimões. En haut : La méthode d'interpolation utilise les mesures in-situ de quatre stations limnimétriques, dont deux à l'amont (Itapeua à 1956,84km & Codajas à 1837,94km) et deux à l'aval (Anama à 1722,6km & Manacapuru à 1632,6km). Au milieu : la série temporelle in-situ reconstituée par interpolation polynomiale à minimum d'énergie (station virtuelle à 1786,07km) est cohérente d'un point de vue hydrodynamique car son niveau est toujours situé entre les niveaux des séries temporelles des stations amont et aval. En bas : cette série temporelle in-situ reconstituée va servir de référence lors de la quantification de la qualité des séries temporelles altimétriques. Notons que l'absence de mesures dans l'une des séries temporelles de référence se propage dans la série temporelle in-situ reconstituée, ici par exemple lors des années 1995 et 2000.



FIG. 5.5: Carte des stations limnimétriques utilisées pour reconstituer la série temporelle in-situ à la station virtuelle « TP-076A-Solimoes » à la figure 5.4 (Image GoogleEarth).

reconstituées⁷ par la méthode développée au § 5.2.

Du fait de l'utilisation de valeurs in-situ reconstituées au lieu de mesures in-situ réelles, l'erreur réelle ε définie par l'équation (2.1) est impossible à calculer de manière directe et c'est l'erreur $\varepsilon_{sat_{Ris}}$ définie par l'équation (4.3) qui sera caractérisée.

La solution proposée ici permet donc, dans un premier temps, de quantifier une approximation de l'erreur réelle des mesures altimétriques à l'aide de la comparaison entre les mesures altimétriques et les mesures in-situ reconstituées : nous l'appellons « erreur approximée des mesures altimétriques » et la notons $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ (ou $\varepsilon_{sat_{Ris}}$).

Nous verrons en détail dans le chapitre suivant (chap. 6) comment recalculer au mieux les indicateurs de précision en estimant puis retranchant la part de l'erreur induite par la Méthode de Reconstitution des Séries Temporelles In-Situ.

D'une manière plus générale, le calcul d'une série temporelle de l'erreur nécessite trois étapes préalables : (1) prise en compte des décalages horaires (données in-situ en heure locale), (2) calcul - par interpolation temporelle - des valeurs de la série temporelle in-situ reconstituée aux instants exacts des passages du satellite et (3) appariement des mesures altimétriques et in-situ. Ces trois étapes sont présentées dans la section ci-dessous.

5.3.1 Corrections horaires et appariement des mesures in-situ et altimétriques

Une fois que la série temporelle in-situ reconstituée est calculée sur la station virtuelle, il est nécessaire d'effectuer deux opérations sur l'axe des temps avant de pouvoir la comparer à la série temporelle altimétrique : nous devons d'une part (1) prendre en compte les décalages horaires entre les mesures altimétriques (fournies en heures UTC) et les mesures in-situ (fournies en heures locales) ; et d'autre part (2) estimer au mieux la valeur du niveau du cours d'eau reconstituée à l'instant exact d'acquisition des mesures altimétriques puisque les mesures in-situ sont elles aussi échantillonnées dans le temps (à raison d'une ou deux mesures in-situ par jour en général). Dans certains cas un décalage temporel de quelques heures peut en effet se traduire par une variation de quelques décimètres du niveau réel.

Décalages horaires en heures UTC

Les mesures in-situ sont relevées en heures locales, alors que les mesures altimétriques sont relevées en heures au format UTC⁸ (pour « Temps Universel Coordonné » ou « Coordinated Universal Time⁹ »).

Nous devons donc prendre en compte les décalages horaires de manière à limiter les déphasages artificiels qui en résulteraient. Malgré de nombreuses recherches, nous n'avons pas pu trouver de librairie logicielle ou d'indications précises permettant de manipuler les décalages horaires selon les découpages géopolitiques actuels, ni permettant de prendre en charge les passages en heure d'été ou heure d'hiver. Il nous a paru suffisant de calculer le décalage horaire à partir de la longitude des stations virtuelles, avec une résolution d'une demie-heure.

Le décalage horaire δ_t traduit l'avance de l'heure locale sur l'heure UTC. C'est donc la valeur à retrancher d'une mesure du temps en heure locale (t_{loc} , en heures décimales), pour obtenir son équivalent en heure UTC ($t_{UTC} = t_{loc} - \delta_t$). Pour un point du globe de longitude lon (en degrés décimaux), le décalage horaire δ_t se calcule à l'aide de l'équation suivante :

⁷Sauf pour les quelques rares configurations « satellite / cours d'eau » où une comparaison directe aux mesures issues d'une station limnimétrique très proche de la station virtuelle peut être effectuée, la série temporelle in-situ reconstituée étant alors équivalente à la série mesurée.

⁸Des informations intéressantes sont disponibles sur la page anglaise de Wikipedia dédiée au standard UTC : <http://en.wikipedia.org/wiki/UTC>.

⁹L'ordre des lettres de l'acronyme UTC résulte d'un compromis entre sa version francophone TUC (Temps Universel Coordonné) et anglophone CUT (Coordinated Universal Time).

$$\delta_t = \frac{1}{2} \left\lfloor \frac{24}{180} lon + \frac{1}{2} \right\rfloor \quad (5.7)$$

où :

$$\begin{cases} \lfloor x \rfloor \text{ est la partie entière de } x, \text{ et } \lfloor x + \frac{1}{2} \rfloor \text{ est le nombre entier le plus proche de } x \\ -180 \leq lon \leq 180 \end{cases}$$

Notons que, puisque les passages en heure d'été ou d'hiver ne sont pas pris en compte dans cette formulation, la valeur de δ_t proposée ici se situe dans une fourchette à $\pm 1h30$ autour de la valeur « officielle » du décalage horaire. La figure ci-dessous (fig. 5.6) illustre la relation entre la valeur de la longitude et la valeur du décalage horaire δ_t .

Dans le cas de la station limnimétrique de Manaus (longitude = $-60,0269^\circ$, code 14990000), le décalage horaire δ_t est de -4 heures.

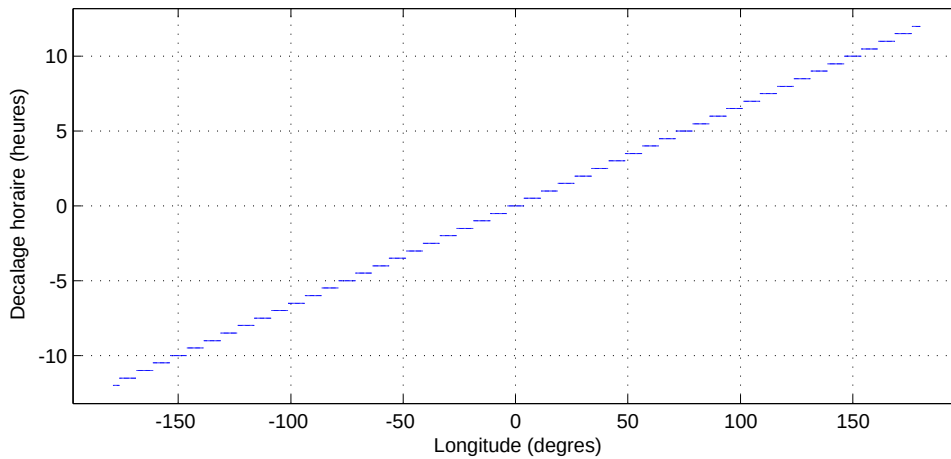


FIG. 5.6: Conversion de l'heure locale mesurée en un point du globe en heure UTC : décalage horaire déduit de la longitude. Chaque palier s'étale sur 15° ($360^\circ/24h$) de longitude et représente une tranche horaire de 30 minutes.

Interpolation temporelle aux instants exacts des mesures altimétriques

L'interpolation temporelle des mesures in-situ aux instants exacts des mesures altimétriques s'effectue à l'aide de la technique d'interpolation spatiale polynomiale définie au § 5.2.1, page 109, en l'appliquant selon l'axe des temps. L'utilisation de cette technique d'interpolation permet de s'assurer que le résultat de l'interpolation ne sera pas aberrant d'un point de vue hydrologique : la contrainte de minimisation d'énergie appliquée aux variations temporelles du niveau des eaux au cours du temps garanti l'obtention de séries temporelles reconstituées à variations continues et lissées de manière optimale.

Comme nous le verrons plus en détails par la suite, il arrive que les séries temporelles issues de stations limnimétriques utilisées pour la reconstitution d'une série temporelle in-situ présentent des lacunes (un nombre minimal de mesures consécutives manquantes est nécessaire pour qualifier ces trous de lacunes). Ces lacunes induisent à leur tour des lacunes dans la série temporelle in-situ reconstituée résultante.

Un processus de détection de ces lacunes dans la série temporelle in-situ reconstituée est intégré à la méthode d'interpolation temporelle et permet d'empêcher l'interpolation des mesures lorsque les lacunes sont trop importantes. Si les lacunes sont de courtes durées, elles peuvent être comblées par l'interpolation temporelle, sinon, elles sont maintenues. De façon générale, nous avons interpolé temporellement des lacunes de durée inférieure à 5 jours.

Bien évidemment, le choix des stations limnimétriques utilisées pour la reconstitution des séries temporelles in-situ est d'une grande importance et doit être effectué en prêtant attention aux lacunes présentes dans les séries temporelles issues des stations limnimétriques. L'opérateur doit alors considérer le com-

promis existant entre le nombre de stations limnimétriques à utiliser pour la reconstitution, leur taux de lacunes de mesures et leurs distances à la station virtuelle.

Appariement des mesures altimétriques et des mesures in-situ reconstituées

La dernière étape de la génération d'une série temporelle in-situ reconstituée consiste en un appariement (création de paires) des mesures altimétriques et des mesures in-situ reconstituées. Cette procédure permet d'associer à chaque mesure altimétrique, une mesure in-situ reconstituée et interpolée temporellement à l'instant de la mesure altimétrique. Cependant, du fait des lacunes qui peuvent apparaître dans les séries temporelles in-situ reconstituées et de l'impossibilité qui en résulte de mener à bien leur interpolation temporelle (ou rééchantillonnage à des instants choisis), certaines mesures altimétriques ne pourront pas être appariées à une mesure in-situ reconstituée. Il convient donc de retirer de la série temporelle altimétrique ces mesures puisque nous ne pourrions quantifier l'erreur correspondante¹⁰.

Une fois cette étape terminée, les valeurs de la série temporelle in-situ reconstituée sont parfaitement en phase avec celles de la série temporelle altimétrique et peuvent être comparées date à date comme l'illustre la figure 5.7.

5.3.2 Construction d'une série temporelle de l'erreur approximée des mesures altimétriques

La construction de la série temporelle de l'erreur approximée, à partir d'une série temporelle altimétrique et d'une série temporelle in-situ reconstituée est très simple et consiste en le calcul de la différence date à date entre les mesures altimétriques et les mesures in-situ reconstituées.

Soit $\tilde{\varepsilon}_{Sat}(n)$, l'erreur approximée de la $n^{\text{ème}}$ mesure altimétrique :

$$\tilde{\varepsilon}_{Sat}(n) = Z_{Sat}(n) - Z_{Ris}(n) \quad (5.8)$$

où :

Z_{Ris} est la série temporelle in-situ reconstituée, une estimation de la série temporelle du niveau du cours d'eau sous la trace du satellite,

$\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ est la série temporelle de l'erreur approximée des mesures altimétriques.

5.4 Etape 3 : Calcul de la première approximation des indicateurs de qualité

Avant d'engager le calcul des indicateurs de qualité sur une station virtuelle à partir de la série temporelle de l'erreur approximée obtenue au § 5.3, il est indispensable de vérifier que les deux séries temporelles altimétrique et in-situ reconstituée se prêtent à une analyse pertinente de qualité. En effet, en réduisant le nombre de mesures altimétriques utilisables et en modifiant leur répartition dans le cycle hydrologique, les lacunes des séries temporelles in-situ reconstituées risquent de biaiser les indicateurs de qualité.

Nous utilisons l'information de répartition dans l'année calendaire des mesures in-situ reconstituées pour quantifier des critères de représentativité hydrologiques et définir des conditions de recevabilité de la station virtuelle pour le calcul des indicateurs de qualité. Ceci est l'objet de la section 5.4.1.

¹⁰ Contrairement aux indicateurs de précision approximatés qui ne peuvent être calculés qu'à partir des mesures altimétriques appariées, les indicateurs d'échantillonnage sont calculés à partir de toutes les mesures disponibles dans la série temporelle altimétrique.

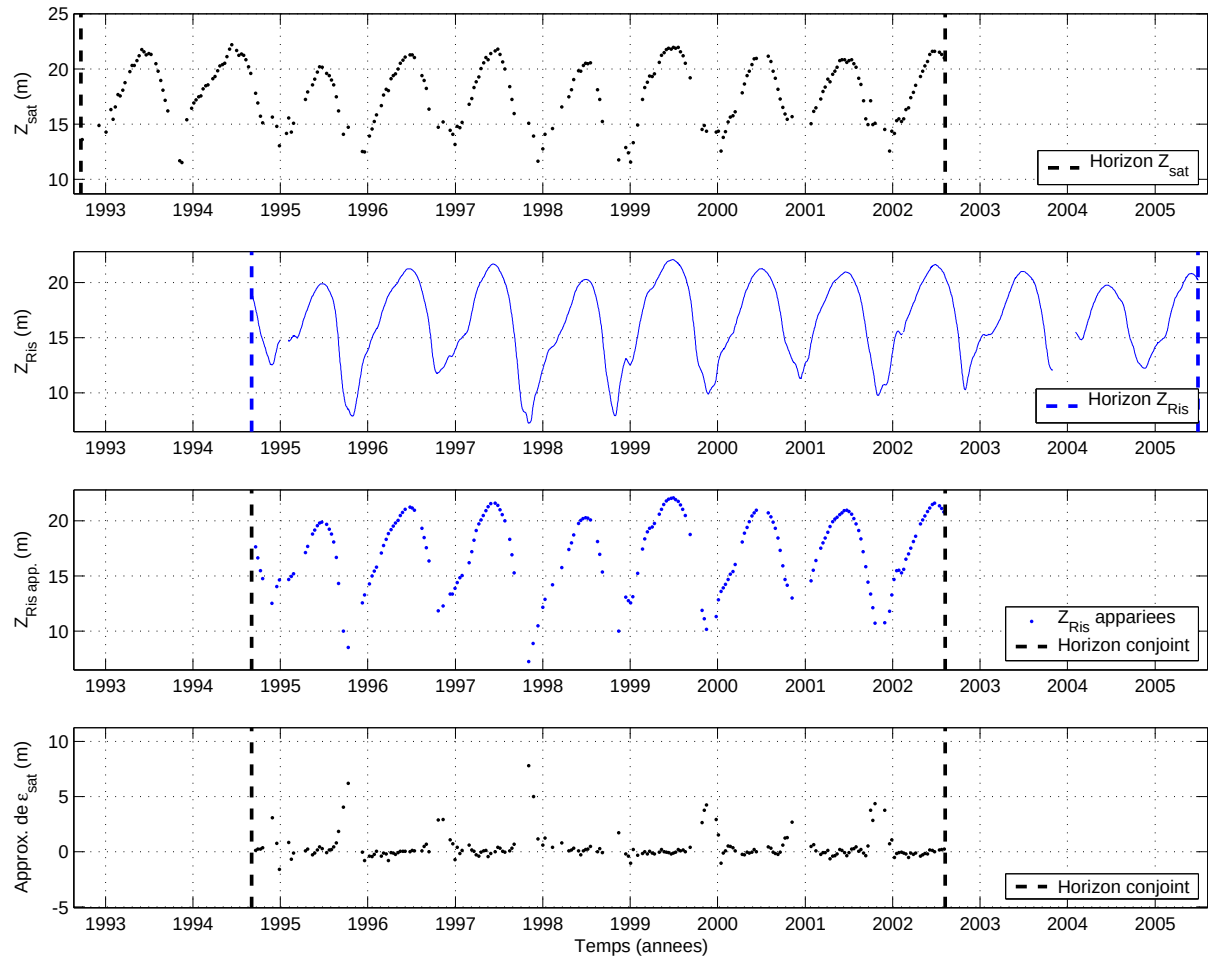


FIG. 5.7: Illustration de l'appariement des mesures altimétriques et des mesures in-situ reconstituées pour construire la série temporelle de l'erreur approximée à la station virtuelle « TP-063A-Solimoes ». Deux graphes du haut : les séries temporelles altimétrique (résultat de l'étape 0) et in-situ reconstituée (résultat de l'étape 1) sur leurs horizons respectifs. Troisième graphe : Mesures in-situ reconstituées appariées sur l'horizon conjoint. Bas : série temporelle de l'erreur des mesures altimétriques sur l'horizon conjoint (résultat de l'étape 2).

Une fois vérifiée la recevabilité de la station virtuelle, nous pouvons appliquer les équations (2.2) à la série temporelle de l'erreur approximée afin de calculer une première approximation des indicateurs de la « qualité globale¹¹ » des mesures altimétriques : ceci fait l'objet de la section 5.4.2.

La structure de l'erreur des mesures altimétriques peut dépendre du niveau réel du cours d'eau. Pour rendre compte de ce phénomène, nous découpons la dynamique hydrologique en trois « périodes hydrologiques » : « basses eaux », « moyennes eaux » et « hautes eaux ». Ce découpage permet de quantifier les indicateurs de qualité pour chacune de ces trois périodes et d'en affiner l'analyse. Ceci fait l'objet la section 5.4.3.

Nous illustrerons l'ensemble de cette section 5.4 sur deux stations virtuelles :

La station virtuelle « TP-063A-Solimoes » située sur le rio Solimões sous la trace 63 du satellite Topex/Poseidon dans la fenêtre géographique¹² lat [-3,2483 ; -3.2141] lon [-59.9828 ; -59.9543]. Des données altimétriques y sont disponibles du 25/09/1992 au 3/08/2002.

La série temporelle in-situ reconstituée sur cette station virtuelle est calculée à partir des stations limnimétriques in-situ de Anama (14050000), Manacapuru (14100000), Jatuarana (15030000) et Parintins (16350002). Elle présente des données du 3/09/1994 au 29/09/2005 elle présente plusieurs lacunes dont une relativement importante du 30/10/2003 au 2/2/2004 (soit 94 jours, cf. fig. 5.8 à gauche).

La station virtuelle « TP-178A-Jutai » située sur le rio Jutai sous la trace 178 du satellite Topex/Poseidon dans la fenêtre géographique lat [-3,4383 ; -3,4219] lon [-67,5232 ; -67,4969]. Des données altimétriques y sont disponibles du 29/10/1992 au 29/07/2002.

La série temporelle in-situ reconstituée sur cette station virtuelle à l'aide des stations limnimétriques in-situ de Conceição (12150000), Barreira Alta (12200000) et Porto Seguro (12240000) présente des données du 2/09/1997 au 30/10/2003 dont une lacune importante du 17/11/1997 au 19/02/1999 (soit 458 jours, cf. fig. 5.8, à droite).

5.4.1 Critères de représentativité hydrologique des séries temporelles in-situ reconstituées et conditions de recevabilité

Pour une série temporelle altimétrique donnée, l'estimation des indicateurs de qualité est conditionnée par la disponibilité des mesures in-situ reconstituées et par leur répartition dans l'année calendaire.

Supposons par exemple que les mesures in-situ reconstituées disponibles sur une station virtuelle soient plus nombreuses pendant la période de hautes eaux que pendant les autres périodes. Le calcul des indicateurs de qualité globaux sera alors surpondéré par les erreurs en périodes de hautes eaux. Du fait des lacunes de la série temporelle in-situ reconstituée (ou mesurée), les indicateurs de qualité des mesures altimétriques obtenus ne seront pas représentatifs de l'ensemble du cycle hydrologique.

Deux questions se posent alors :

1. Comment les mesures in-situ reconstituées couvrent-elles l'horizon de la série temporelle altimétrique et a-t-on suffisamment de paires de mesures altimétriques / mesures in-situ reconstituées pour évaluer la qualité des mesures altimétriques ?
2. La répartition des mesures in-situ reconstituées dans l'année calendaire est-elle homogène ?

Afin de répondre à ces questions et de caractériser la pertinence des séries temporelles in-situ reconstituées pour l'évaluation de la qualité des mesures altimétriques, nous avons défini six paramètres.

¹¹Le chapitre 6 présentera une approche permettant d'affiner le calcul des indicateurs de précision par estimation de la part de l'erreur induite par la Méthode de Reconstitution des Séries Temporelles In-Situ.

¹²Les coordonnées sont exprimées en degrés décimaux, dans le système géodésique WGS84.

Les quatre premiers portent uniquement sur l'analyse de la série temporelle in-situ reconstituée sur l'horizon couvert par les mesures altimétriques, les deux suivants portent sur l'analyse de l'appariement entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées :

η_d : taux de disponibilité des mesures in-situ reconstituées,

N_{CA} : nombre de cycles hydrologiques continus (périodes de 12 mois consécutifs) effectivement disponibles pour l'analyse de l'erreur,

$\mathcal{I}_H$: indice d'homogénéité de la répartition des mesures in-situ reconstituées dans l'année calendaire,

$\tilde{N}_{CA}$: nombre équivalent de cycles hydrologiques annuels disponibles pour l'analyse de l'erreur,

M_a : nombre de mesures altimétriques appariées,

η_a : taux d'appariement des mesures altimétriques,

Taux de disponibilité des mesures in-situ reconstituées η_d (connaissant la disponibilité des mesures altimétriques)

Nous appelons « taux de disponibilité des mesures in-situ reconstituées » η_d le rapport entre le nombre de mesures in-situ reconstituées sur l'horizon couvert par les mesures altimétriques et la durée de cet horizon¹³ :

$$\eta_d = \frac{N_d}{\Delta_a} \quad (5.9)$$

avec :

N_d Le nombre de mesures in-situ reconstituées disponibles sur l'horizon couvert la série temporelle altimétrique,

Δ_a La durée de l'horizon couvert par la série temporelle altimétrique.

Ce taux vaut 1 (ou 100%) lorsque la série temporelle in-situ reconstituée couvre l'ensemble de l'horizon altimétrique et vaut exactement 0,5 (ou 50%) si elle n'en couvre que la moitié.

Pour les deux stations virtuelles considérées, nous obtenons 78,1% (TP-063A-Solimoes) et 33,0% (TP-178A-Jutai).

Nombre de cycles annuels complets N_{CA}

Nous appelons « nombre de cycles annuels complets » N_{CA} , le nombre de périodes de douze mois consécutifs intégralement couvertes par la série temporelle in-situ reconstituée¹⁴.

Pour les deux stations virtuelles considérées, nous obtenons 1 cycle hydrologique entier (TP-063A-Solimoes) et 2 cycles hydrologiques entiers (TP-178A-Jutai).

Indice d'homogénéité de répartition des mesures in-situ reconstituées sur le cycle hydrologique annuel $\mathcal{I}_H$

Cet indice d'homogénéité vise à évaluer si les mesures in-situ reconstituées, au sein de l'horizon altimétrique, couvrent de façon homogène l'ensemble du cycle hydrologique (année calendaire) ou s'il existe une forte disparité de la densité de mesures d'un mois calendaire à un autre.

Pour cela, on considère les mesures in-situ reconstituées disponibles sur l'horizon altimétrique et l'on réalise l'histogramme de leur distribution entre les différents mois de l'année calendaire (cf. histogramme de la figure 5.8).

¹³Nous faisons ici l'hypothèse d'un échantillonnage journalier des mesures in-situ reconstituées et d'une expression en nombre de jours de la durée de l'horizon altimétrique. Le calcul de l'indice peut facilement être généralisé pour une valeur T_{is} de la période d'échantillonnage des mesures in-situ reconstituées.

¹⁴Nous nous permettons de négliger des lacunes occasionnelles d'une durée inférieure ou égale à 15 jours.

L'indice d'homogénéité est défini par l'équation (5.10) ci-dessous :

$$\mathcal{I}_H = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{12} |h_i - \mu_h|}{\frac{22}{12} N_d} \quad (5.10)$$

avec :

h_i Le nombre de mesures in-situ reconstituées disponibles pour le $i^{\text{ème}}$ mois de l'année calendaire (cf. fig. 5.8),

μ_h La moyenne des nombres de mesures in-situ reconstituées disponibles pour chaque mois,

Cet indice vaut 1 (ou 100%) lorsque si les mesures in-situ reconstituées sont parfaitement réparties entre les mois calendaires ($h_i \approx \mu_h$). Il est de l'ordre de 0,5 (ou 50%) si toutes les mesures sont réparties de façon homogène sur six mois calendaires, les six autres mois n'ayant aucune mesure. Il vaut 0 dans le cas extrême où toutes les mesures sont concentrées sur un seul mois calendaire.

Pour les deux stations virtuelles considérées, nous obtenons $\mathcal{I}_H = 97,8\%$ (TP-063A-Solimoes) et $\mathcal{I}_H = 90,3\%$ (TP-178A-Jutai).

Nombre équivalent de cycles annuels $\tilde{N}_{CA}$

L'histogramme de distribution des mesures in-situ reconstituées entre les différents mois calendaires peut être traduit en un histogramme du nombre d'« équivalent mois ». Par exemple, si pour le quatrième mois calendaire (avril), le nombre de mesures in-situ reconstituées disponibles est de 150, alors son « équivalent mois » est de 5 (trente mesures permettent de couvrir l'équivalent d'un mois d'avril complet).

L'histogramme résultant (cf. figure 5.8) permet facilement d'estimer un nombre équivalent de cycles annuels couverts par les mesures in-situ reconstituées (cycle fragmenté).

Nous appelons « nombre équivalent de cycles annuels » $\tilde{N}_{CA}$, la valeur minimale prise par l'histogramme du nombre d'« équivalent mois ». Le nombre équivalent de cycles annuels est toujours supérieur ou égal au nombre de cycles annuels complets (N_{CA}), cette approche permettant de reconstituer des cycles annuels par analyse conjointe de mois non consécutifs. Ce paramètre est particulièrement utile pour juger de la représentativité de séries temporelles in-situ reconstituées présentant de nombreuses lacunes.

Pour les deux stations virtuelles considérées, nous obtenons 7,23 cycles hydrologiques équivalents (TP-063A-Solimoes) et 2,06 cycles hydrologiques équivalents (TP-178A-Jutai).

Nombre de mesures altimétriques appariées M_a et taux d'appariement η_a

Nous appelons « nombre de mesures altimétriques appariées » à une station virtuelle M_a , le nombre de mesures altimétriques pour lesquelles nous disposons d'une valeur in-situ reconstituée simultanée.

Nous appelons « taux d'appariement des mesures altimétriques » à une station virtuelle η_a le rapport entre le nombre de mesures altimétriques appariées et le nombre total de mesures altimétriques.

$$\eta_a = \frac{M_a}{M_{tot}} \quad (5.11)$$

avec :

M_a Le nombre de de mesures altimétriques appariées,

M_{tot} Le nombre total de mesures altimétriques.

Ce taux vaut 1 lorsque la série temporelle in-situ reconstituée couvre l'ensemble de l'horizon altimétrique et est de l'ordre de 0,5 si elle n'en couvre que la moitié.

Pour les deux stations virtuelles considérées, nous obtenons 202 mesures altimétriques appariées (sur 275 issues de TP-063A-Solimoes) et 45 mesures altimétriques appariées (sur 139 issues de TP-178A-Jutai).

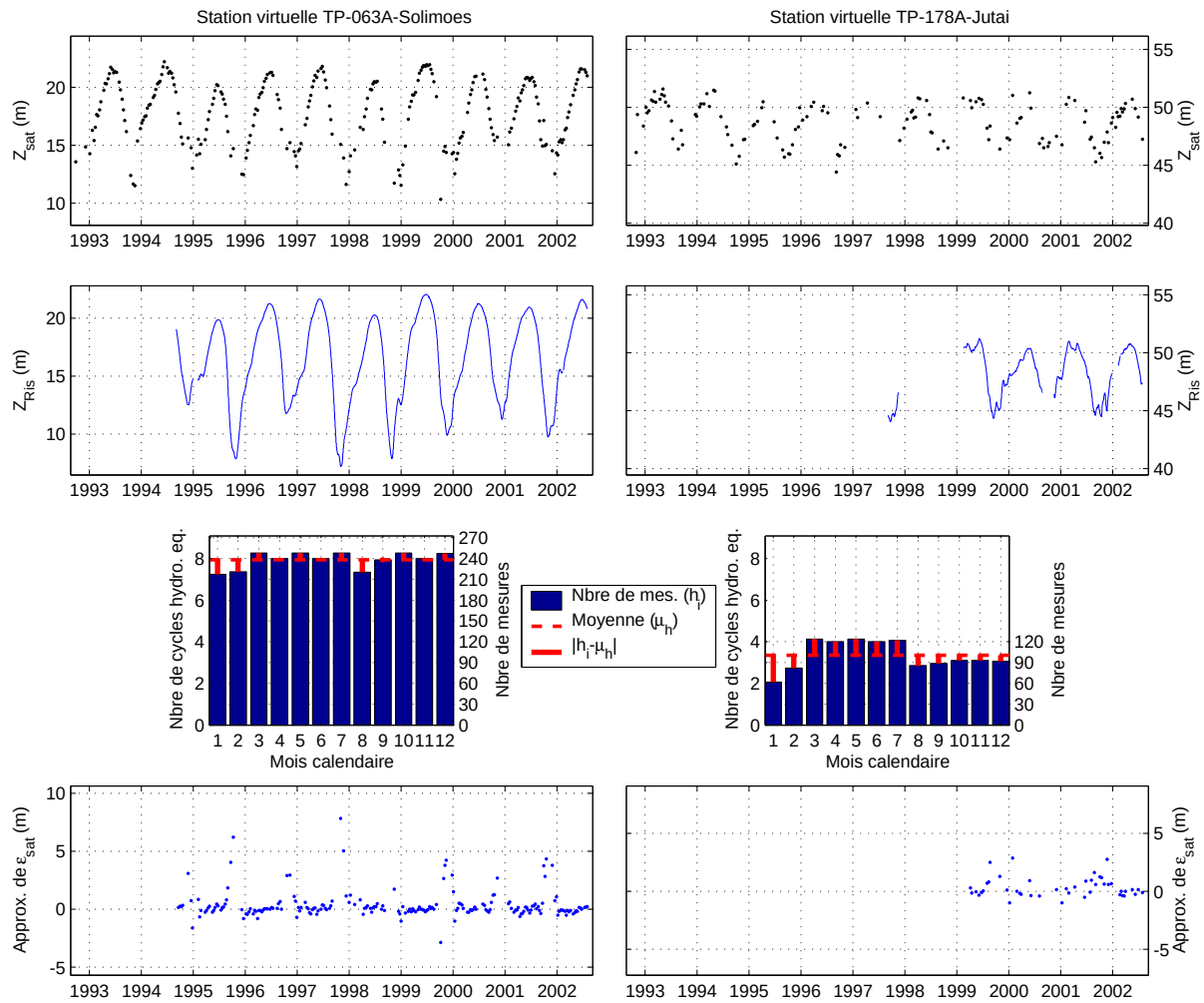


FIG. 5.8: Séries temporelles altimétriques, in-situ reconstituée et de l'erreur pour les stations virtuelles TP-063A-Solimoes (à gauche) et TP-178A-Jutai (à droite). Rangée du haut : séries temporelles altimétriques issues des stations virtuelles. Deuxième rangée : séries temporelles in-situ reconstituées. Troisième rangée : histogrammes de répartition des mesures in-situ reconstituées dans l'année calendaire (le minimum d'un histogramme correspond au nombre équivalent de cycles hydrologiques $\tilde{N}_{CA}$). Dernière rangée : séries temporelles de l'erreur approximée des mesures altimétriques.

	Description	TP-063A-Solimoes	TP-178A-Jutai
η_d	Taux de disponibilité des mesures in-situ reconstituées (%)	78,1	33,0
N_{CA}^1	Nombre de cycles hydrologiques continus	7	2
$\mathcal{I}_H$	Indice d'homogénéité de répartition des mesures in-situ reconstituées dans l'année calendaire (%)	97,8	90,3
$\tilde{N}_{CA}$	Nombre équivalent de cycles hydrologiques annuels	7,23	2,06
M_a	Nombre de mesures altimétriques appariées	202	45
η_a	Taux d'appariement des mes. altimétriques (%)	78,5	32,3
T_{eff}	Période d'échantillonnage effective (jours)	14,04	24,06
η_{eff}	Taux de pertes de mesures altimétriques (%)	29,4	58,8
$\mu_{\tilde{\epsilon}_{Sat}}$	Moyenne de $\tilde{\epsilon}_{Sat}$ (m)	0,36	0,36
$\sigma_{\tilde{\epsilon}_{Sat}}$	Ecart-type de $\tilde{\epsilon}_{Sat}$ (m)	1,22	0,86
$RM\tilde{S}_{\tilde{\epsilon}_{Sat}}$	Valeur RMS de $\tilde{\epsilon}_{Sat}$ (m)	1,27	0,92

¹ Valeurs calculées avec une tolérance de 15 jours de lacunes dans les séries temporelles in-situ reconstituées.

TAB. 5.1: Table des paramètres et indicateurs obtenus pour les deux exemples de stations virtuelles (cf. commentaires au §« Utilisation des paramètres », page 124).

Utilisation des paramètres

La table 5.1 récapitule les valeurs des six paramètres de représentativité hydrologique des séries temporelles in-situ reconstituées pour les deux stations virtuelles utilisées comme exemples. Ces valeurs nous permettent de constater les différences entre les deux séries temporelles in-situ reconstituées pour les deux exemples de stations virtuelles « TP-063A-Solimoes » et « TP-178A-Jutai » :

Tout d'abord, l'indicateur du taux de disponibilité des mesures in-situ reconstituées η_d nous permet de constater que la série temporelle in-situ reconstituée de la station virtuelle « TP-178A-Jutai » dispose de seulement 33% de mesures alors que celle de la station virtuelle « TP-063A-Solimoes » est bien plus fournie et dispose de 78,1% de mesures sur l'horizon des mesures altimétriques.

Les nombres de cycles hydrologiques continus N_{CA} (ou cycles annuels) pour les deux séries temporelles in-situ reconstituées sont très faibles : 1 cycle entier seulement pour la station virtuelle « TP-063A-Solimoes » et 2 cycles entiers pour la station virtuelle « TP-178A-Jutai » (malgré la tolérance de 5 jours de lacunes). Notons que la série temporelle in-situ reconstituée de la station virtuelle « TP-063A-Solimoes » présente un certain nombre de lacunes supérieures à 5 jours qui ne sont pas toutes discernables sur la figure 5.8.

L'indice d'homogénéité de répartition des mesures in-situ reconstituées dans l'année calendaire $\mathcal{I}_H$ permet de constater que les deux séries temporelles reconstituées sont caractérisées par une répartition assez similaire de leurs mesures : 97,8% contre 90,3%, bien que la répartition à la station virtuelle « TP-178A-Jutai » paraisse relativement inégale.

Le nombre de cycles hydrologiques équivalents ($\tilde{N}_{CA}$) permet de mieux caractériser les séries temporelles in-situ reconstituées que son homologue « continu » (N_{CA}) car il révèle des nombres de cycles hydrologiques bien supérieurs (et plus représentatifs d'une analyse visuelle sur les graphes de la figure 5.8) : 7,23 cycles équivalents pour la station virtuelle « TP-063A-Solimoes » et 2,06 cycles équivalents pour la station virtuelle « TP-178A-Jutai ».

Enfin, les nombres et taux de mesures altimétriques appariés pour ces deux exemples de stations virtuelles sont respectivement de 202 mesures (78,5%) pour la station virtuelle « TP-063A-Solimoes » et de 45 mesures (32,3%) pour la station virtuelle « TP-178A-Jutai ».

Ainsi les valeurs des paramètres renseignent sur les éventuels biais que les séries temporelles in-situ reconstituées peuvent induire sur les indicateurs de qualité des mesures altimétriques. Ils peuvent également être utilisés pour écarter les stations virtuelles pour lesquelles ces biais sont jugés excessifs.

Dans la pratique nous avons choisi, pour des raisons liées à l'hydrologie introduites plus haut, d'imposer des seuils pour deux de ces paramètres :

Condition sur $\tilde{N}_{CA}$:

Le nombre équivalent de cycles hydrologiques annuels doit être supérieur ou égal à 2 pour assurer une analyse sur l'équivalent de deux cycles hydrologiques :

$$\tilde{N}_{CA} \geq 2 \quad (5.12)$$

Condition sur M_a :

Les mesures altimétriques appariées doivent couvrir au total (en tenant compte de la période d'échantillonnage théorique du satellite) l'équivalent d'au moins une année complète, soit :

$$M_a \cdot T_{Sat} \geq 365,25 \text{ jours} \quad (5.13)$$

où T_{Sat} est la période d'échantillonnage théorique du satellite (définie au § 2.1.3).

Ainsi, dans le cas de la mission altimétrique Topex/Poseidon, ($T_{Sat} = 10$ jours), il nous faut au moins 36 mesures appariées pour que les indicateurs de qualité de la station virtuelle soient pris en compte dans l'évaluation de la qualité global du produit alti-hydrologique.

Si les conditions (5.12) et (5.13) ne sont pas respectées à la station virtuelle, alors la série temporelle alti-hydrologique correspondante est écartée par la Méthode Standard de la Quantification de la Qualité : elle n'est pas prise en compte pour la suite des analyses et pour la quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques (cf. chapitre 7). Nous dirons alors que la qualité des mesures altimétriques à cette station virtuelle n'est pas quantifiable.

5.4.2 Approximation de la « qualité globale » des mesures altimétriques

La série temporelle de l'erreur approximée est générée par appariement des mesures altimétriques et des mesures in-situ reconstituées et calcul de l'erreur comme illustré sur la figure 5.7. L'analyse de la distribution de l'erreur permet de quantifier les indicateurs de qualité définis au chapitre 2. Les résultats sont présentés dans la table 5.1 pour les deux stations virtuelles nous servant d'exemple.

On constate sur les deux cas précédents que les séries temporelles in-situ reconstituées couvrent de façons très différentes l'horizon des mesures altimétriques, ce qui influence la représentativité des indicateurs de qualité.

5.4.3 Approximation de la « qualité par périodes hydrologiques » des mesures altimétriques

Comme l'illustre la figure 5.7, l'amplitude de l'erreur approximée est liée au cycle hydrologique : elle est plus faible en période de hautes eaux et plus élevée en période de basses eaux. L'erreur de mesure altimétrique semble donc structurée en fonction du niveau réel de l'eau. Afin de mieux représenter cette structure de l'erreur nous proposons d'effectuer un découpage de la dynamique du niveau de l'eau en trois périodes hydrologiques : basses eaux, moyennes eaux et hautes eaux. Ce découpage est opéré de manière à attribuer un nombre égal de mesures pour chacune des trois périodes sur l'ensemble de l'horizon de reconstitution. Ce découpage permet de diviser nos séries temporelles en trois sous-séries temporelles de manière à calculer indépendamment les indicateurs de qualité pour chacune des trois périodes hydrologiques.

Ce processus de découpage en périodes hydrologiques est strictement indépendant des mesures altimétriques : il est élaboré en prenant en compte l'intégralité des mesures disponibles dans la série temporelle in-situ reconstituée (et non sa version appariée)¹⁵.

La figure 5.9 illustre le découpage en trois périodes hydrologiques sur une série temporelle in-situ reconstituée (station virtuelle « TP-063A-Solimoes »).

Exploitation du découpage en trois périodes hydrologiques

Le découpage de la dynamique du niveau des eaux permet de calculer les indicateurs de qualité pour chacune des trois périodes hydrologiques résultantes, en plus des indicateurs de qualité « globaux » calculés sur la période « globale » prenant en compte la série temporelle altimétrique dans son intégralité. Un code à trois couleurs permet d'identifier rapidement l'appartenance d'une mesure à sa période hydrologique : rouge pour la période de basses eaux ; bleu pour la période de moyennes eaux et vert pour la période de hautes eaux

¹⁵Ce découpage est de préférence effectué sur un nombre entier de cycles hydrologiques annuels pour ne pas surreprésenter certaines « saison hydrologiques ».

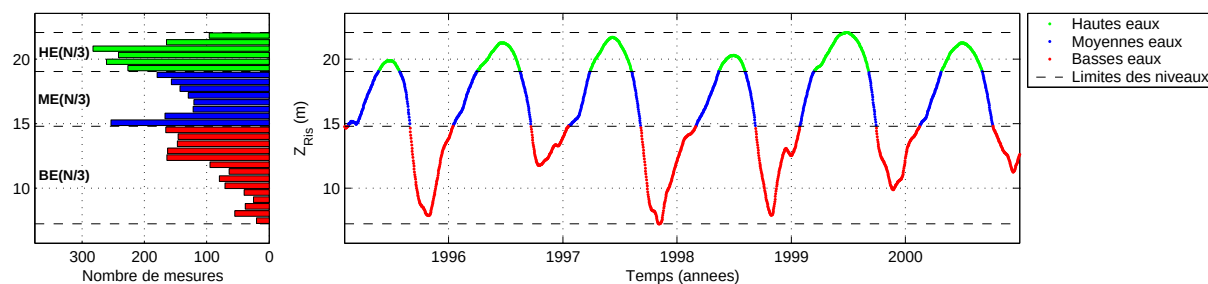


FIG. 5.9: Illustration du découpage en trois périodes hydrologiques de la dynamique de la série temporelle in-situ reconstituée à la station virtuelle « TP-063A-Solimoës » (série temporelle de droite). Le découpage est effectué de manière à ce que les trois périodes contiennent un nombre égal de mesures (à $\pm$ une mesure près), soit $N/3$ mesures in-situ reconstituées par période si la série temporelle contient N mesures. Dans cet exemple, le découpage calculé sur l'horizon de la série temporelle in-situ reconstituée intégrale (mi-1995 à mi-2005) donne 1274 mesures/période (l'horizon temporel du limigramme a été tronqué pour améliorer la lisibilité de la figure). L'histogramme de gauche illustre ce découpage ainsi que la répartition des mesures in-situ reconstituées en fonction du niveau des eaux.

La série temporelle in-situ reconstituée à la station virtuelle est d'assez bonne qualité pour permettre la quantification de l'erreur approximée des mesures altimétriques : elle est caractérisée par un taux de disponibilité de mesures ($\eta_d = 78,2\%$) et une très bonne répartition de celles-ci ($\mathcal{I}_H = 97,9\%$) et le nombre de cycle hydrologiques équivalent est de $\tilde{N}_{CA} = 7,2$. Cette série temporelle in-situ reconstituée permet l'appariement de 202 mesures altimétriques (soit un taux d'appariement de $\eta_a = 78,6\%$) sur un horizon conjoint allant de septembre 1992 à août 2002.

La figure 5.10 illustre l'exploitation du découpage de la dynamique du niveau du cours d'eau et de son code de couleurs à la station virtuelle « TP-063A-Solimoës ». Les deux graphes du haut montrent la corrélation entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées : cette corrélation est forte en période de hautes eaux mais se dégrade en basses eaux pour lesquelles les mesures altimétriques ont tendance à surestimer les mesures in-situ et à présenter une plus forte dispersion.

Le graphique en bas à droite montre la distribution de l'erreur : cette distribution est particulièrement dissymétrique en période de basses eaux.

Le limnigramme du bas montre la distribution de l'erreur dont on voit qu'elle est plus forte en période de basses eaux.

La table 5.2 fournit les valeurs des indicateurs de qualité pour cette même station virtuelle, ainsi que les paramètres de représentativité de la série temporelle in-situ reconstituée. La qualité globale de la série temporelle alti-hydrologique est caractérisée par une valeur RMS de 1,27m ($0,08 \pm 1,22$ m) et une période d'échantillonnage effective de 14,1 jours. Or, on peut constater qu'en période de hautes eaux, l'écart-type est très réduit (0,22m) - ce qui reflète la meilleure précision que peuvent atteindre les mesures altimétriques sur cette station virtuelle - et se dégrade en période de basses eaux (2,07m). De plus, en période de hautes eaux, la période d'échantillonnage effective est très proche de sa valeur optimale (11,6 jours, soit 14,3% de pertes de mesures) alors qu'elle se dégrade en basses eaux (19,0 jours, soit 47,7% de pertes).

Dans cet exemple, il est très clairement montré que le processus de mesure altimétrique donne de meilleurs résultats en périodes de hautes eaux qu'en périodes de basses eaux.

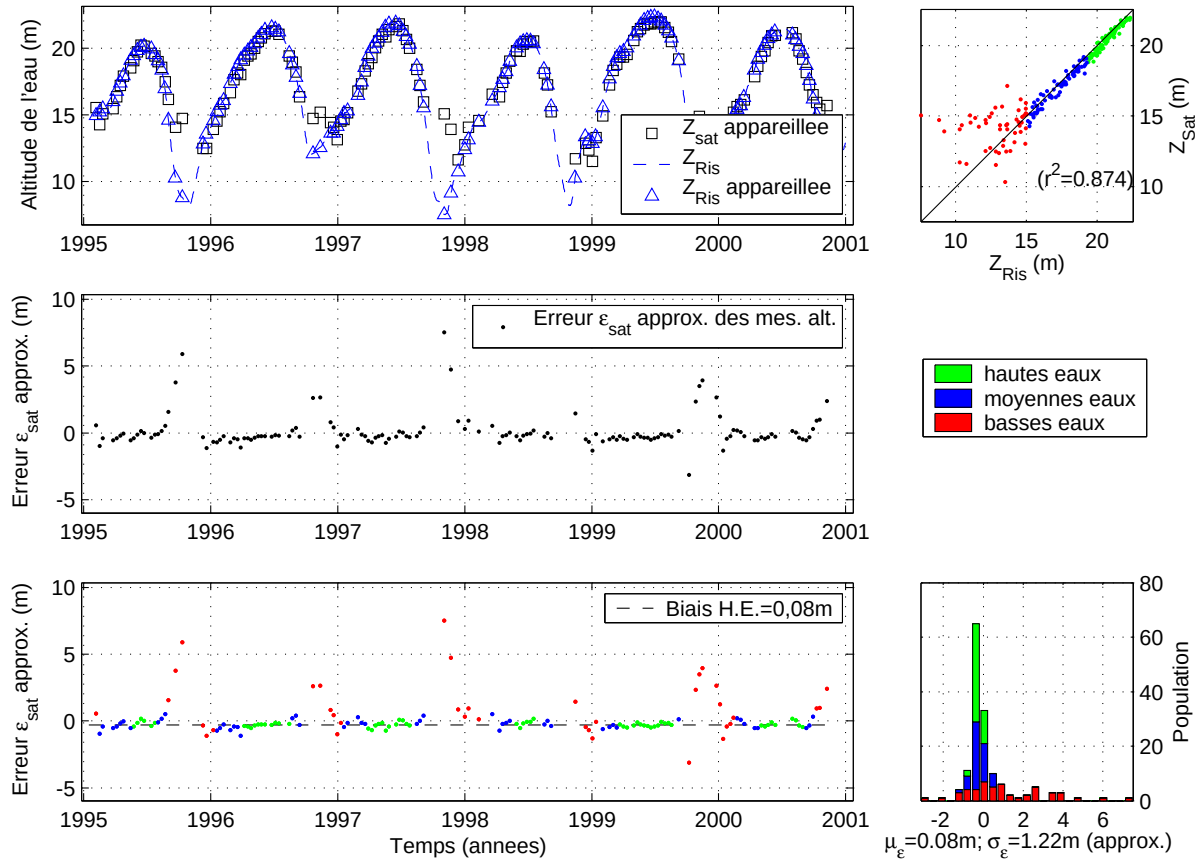


FIG. 5.10: Exploitation du découpage selon les trois périodes hydrologiques pour le calcul des indicateurs de la qualité. Exemple de la série temporelle de l'erreur pour la station virtuelle « TP-063A-Solimoes », Haut gauche : les mesures des deux séries temporelles altimétrique et in-situ. Milieu gauche : série temporelle de l'erreur ε des mesures altimétriques. Bas gauche : La série temporelle de l'erreur peut être représentée en fonction des trois périodes hydrologiques (rouge : basses eaux ; bleu : moyennes eaux ; vert : hautes eaux) afin de mieux comprendre sa structure.

Haut droite : Corrélation entre les mesures altimétriques et mesures in-situ pour chacune des trois périodes hydrologiques. Bas droite : Histogramme de répartition des erreurs pour chacune des trois périodes hydrologiques.

Indicateurs de qualite - station virtuelle « TP-063A-Solimoes »					
Produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-fg3s-fcr2p5s-opp »					
	$RMS_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)
Global	1,27	1,22	0,08	14,1	29,6
Hautes eaux	0,22	0,22	-0,28	11,6	14,3
Moyennes eaux	0,34	0,34	-0,26	13,6	26,8
Basses eaux	2,50	2,07	1,15	19,0	47,7

$\eta_d = 78,2\%$; $\mathcal{I}_H = 97,9\%$; $\tilde{N}_{CA} = 7,2$; $M_a = 202$ ($\eta_a = 78,6\%$)
 Periode : 09/1992 – 08/2002

TAB. 5.2: Exemple d'indicateurs de qualité approximés pour la station virtuelle « TP-063A-Solimoes ». Dans cet exemple, l'erreur RMS globale est de 1,27m ($0,08 \pm 1,22$ m), elle donne une idée de la précision de la série temporelle altimétrique dans son ensemble, alors que les valeurs de RMS par périodes hydrologiques montrent une structuration de l'erreur en fonction du niveau réel du cours d'eau : les mesures altimétriques acquises en périodes de hautes eaux affichent une très bonne précision de $-0,28 \pm 0,22$ m (d'écart-type $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$), alors que les périodes de moyennes eaux et basses eaux sont caractérisées par des valeurs de $-0,26 \pm 0,34$ m et $1,15 \pm 2,07$ m respectivement. Il en va de même pour le biais systématique (μ_{ε}) et la période d'échantillonnage effective (T_{eff}) qui se dégradent à mesure que le niveau réel des eaux décroît.

5.5 Conclusion

La mise en œuvre des trois premières étapes de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques permet d'obtenir les indicateurs de précision de l'erreur approximée des mesures altimétriques. Cette erreur approximée est construite par comparaison entre les mesures altimétriques et les mesures in-situ reconstituées. Les indicateurs de précision approximatifs qui en découlent permettent de mener une première analyse de la qualité des séries temporelles alti-hydrologiques traitées.

La déclinaison des indicateurs de précision pour les trois périodes hydrologiques considérées (hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux) permet en outre une analyse « saisonnière » plus fine de l'erreur des mesures altimétriques.

Indicateurs de précision approximatifs Dans un premier temps, l'application de la méthode aux séries temporelles alti-hydrologiques (Z_{Sat}) permet d'obtenir une approximation des indicateurs de précision recherchés $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$, $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $RMSE_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ par la comparaison des séries temporelles alti-hydrologiques à des séries temporelles in-situ reconstituées (Z_{Ris}) à la station virtuelle à l'aide de stations limnimétriques amont et aval.

Indicateurs d'échantillonnage finaux Le calcul des indicateurs d'échantillonnage n'étant pas impacté par les techniques de reconstitution des valeurs in-situ, c'est leur « version finale » qui est évaluée dès la fin de l'étape 3 de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques. La suite des traitements va donc se concentrer sur l'estimation de la valeur des indicateurs de précision finaux.

Découpage en périodes hydrologiques Le calcul des indicateurs de qualité approximatifs et finaux des séries temporelles alti-hydrologiques est réalisé globalement, mais aussi pour les trois périodes hydrologiques « hautes eaux », « moyennes eaux » et « basses eaux » introduites à la section 5.4.3.

Représentativité des séries temporelles in-situ reconstituées et conditions de recevabilité Nous avons introduit la notion de « représentativité des séries temporelles in-situ reconstituées » et défini six paramètres permettant d'évaluer la représentativité d'une série temporelle in-situ reconstituée : (1) le taux de disponibilité des mesures in-situ reconstituées (η_d), (2) le nombre de cycles hydrologiques continus effectivement disponibles (N_{CA}), (3) un indice d'homogénéité de la répartition des mesures in-situ reconstituées dans l'année calendaire ($\mathcal{I}_H$), (4) le nombre équivalent de cycles hydrologiques annuels disponibles ($\tilde{N}_{CA}$), (5) nombre de mesures altimétriques appariées (M_a) et (6) taux d'appariement des mesures altimétriques aux mesures in-situ reconstituées (η_a).

Nous avons construit à partir de ces paramètres deux tests de recevabilité des comparaisons entre séries temporelles alti-hydrologiques et séries temporelles in-situ reconstituées. Ces tests permettent le cas échéant d'écarter des séries temporelles de l'erreur du calcul des indicateurs de qualité moyens d'un produits alti-hydrologiques (voir chapitre 6, section 6.4.2 et 7).

Vers le calcul des indicateurs de précision finaux Le chapitre 6 expose les trois étapes suivantes qui permettent d'estimer puis de retirer la part d'erreur liée aux mesures in-situ et à la reconstitution des valeurs de niveaux aux stations virtuelles et d'obtenir les indicateurs de précision finaux $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$, $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $\hat{RMSE}_{\varepsilon_{Sat}}$.

Enfin, les résultats de l'étape 3 de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques ont été présentés à diverses reprises pendant la thèse à l'occasion de colloques, sous la forme de présentations orales, de posters et d'actes de colloques, voir [Bercher et al., 2006], [Bercher et Kosuth, 2007] et [Bercher et al., 2007].

Chapitre 6

ESTIMATION FINALE DES INDICATEURS DE QUALITÉ DES MESURES ALTIMÉTRIQUES PAR CORRECTION DES ERREURS INDUITES PAR L'UTILISATION DE SÉRIES TEMPORELLES IN-SITU RECONSTITUÉES

Sommaire

6.1	Introduction	131
6.2	Étape 4 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$	132
6.2.1	Estimation de l'erreur moyenne des mesures in-situ ($\mu_{\varepsilon_{Mis}}$)	132
6.2.1.1	Nivellement topographique du réseau de limnimètres de la Compagnie Nationale du Rhône	132
6.2.1.2	Nivellement altimétrique de grands lacs	132
6.2.1.3	Nivellement altimétrique sur le bassin amazonien	133
6.2.2	Estimation de la variance de l'erreur des mesures in-situ ($\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$)	133
6.3	Étape 5 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ reconstituées $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	135
6.3.1	Quantification de l'erreur de reconstitution par comparaison des valeurs reconstituées aux mesures issues de stations limnimétriques	137
6.3.2	Déterminants géophysiques retenus pour expliquer et modéliser l'erreur de reconstitution	139
6.3.3	Analyse des résultats de quantification de l'erreur de reconstitution	141
6.3.3.1	Analyse des indicateurs de l'erreur de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	141
6.3.3.2	Analyse des relations déterminants-indicateurs	142
6.3.4	Modèles d'estimation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution	145
6.3.4.1	Définition des modèles d'estimation	145
6.3.4.2	Ajustement des modèles par moindres carrés	146
6.3.4.3	Optimisation des modèles	146
6.3.5	Modélisation et estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	147
6.3.5.1	Modélisation et estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$	147
6.3.5.2	Modélisation et estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	149
6.3.6	Synthèse sur la modélisation et l'estimation des indicateurs de précision	152
6.3.6.1	Résultats de quantification de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ aux stations virtuelles	153

6.3.6.2	Modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ dédiés aux trois périodes hydrologiques	156
6.4	Étape 6 : Estimation des indicateurs de précision finaux des mesures altimétriques	159
6.4.1	Précision relative : Estimation et annulation du biais systématique de hautes eaux	159
6.4.1.1	Pourquoi corriger le biais systématique de hautes eaux ?	159
6.4.1.2	Méthode d'identification et de correction du biais systématique . . .	160
6.4.1.3	Exemple applicatif	162
6.4.2	Calcul des indicateurs finaux des mesures altimétriques	162
6.4.2.1	Traitement des possibles cas de rejets	162
6.4.2.2	Application au produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-fg3s-fcr2p5s-opp »	164
6.5	Conclusion	166

6.1 Introduction

Le chapitre 4 a introduit les bases d'une « Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques » reposant sur une confrontation systématique entre les mesures altimétriques et les mesures in-situ reconstituées aux stations virtuelles ; et sur le développement mathématique des indicateurs de précision aboutissant aux équations (4.19).

Le chapitre 5 a abordé les trois premières étapes de cette méthode (cf. § 4.3.1) qui permettent de quantifier l'erreur approximée des mesures altimétriques $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$ et les indicateurs de précision associés $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$, $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $RM\hat{S}_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$.

Le présent chapitre détaille les trois dernières étapes de la méthode (cf. § 4.3.2) consacrées au calcul des indicateurs de qualité finaux par estimation de la part d'erreur imputable aux mesures in-situ et aux séries reconstituées dans les indicateurs approximatés $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$.

Ces indicateurs finaux $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$, $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $RM\hat{S}_{\varepsilon_{Sat}}$ permettent alors d'évaluer au mieux la qualité des seules mesures altimétriques.

Le développement mathématique des erreurs exposé au § 4.2 permet de mettre en lumière les différentes composantes de l'erreur et de décomposer l'expression des indicateurs de précision approximatés en trois parties : l'erreur des mesures altimétriques, l'erreur de reconstitution et l'erreur de mesure in-situ.

Selon les équations (4.19), les indicateurs de précision des mesures altimétriques que nous cherchons à quantifier s'expriment par :

$$\begin{cases} \mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases} \quad (6.1)$$

Le chapitre précédent a permis de quantifier les termes $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$. La formulation des équations (6.1) permet d'envisager l'estimation des indicateurs de précision $\mu_{\varepsilon_{Sat}}$, $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ en s'appuyant sur l'estimation des quatre termes d'erreur, jusque là inconnus, liés aux mesures in-situ ($\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$) et à la technique de reconstitution ($\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$).

Estimation des termes d'erreur de mesure in-situ et d'erreur de reconstitution

Dans le cadre de l'estimation finale des indicateurs de précision des mesures altimétriques, les équations (6.1) et (4.18) peuvent être réécrites afin d'exprimer les indicateurs de précision $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$, $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $RM\hat{S}_{\varepsilon_{Sat}}$ finaux, estimés à partir des termes d'erreur approximée des mesures altimétriques ($\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$), de l'estimation des termes d'erreur de reconstitution ($\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$) et de l'estimation des termes d'erreur de mesure in-situ ($\hat{\mu}_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}}$) :

$$\begin{cases} \hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}} + \hat{\mu}_{\varepsilon_{Mis}} \\ \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}^2 = \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}}^2 \\ RM\hat{S}_{\varepsilon_{Sat}}^2 = \hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}^2 + \frac{N-1}{N}\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}^2 \end{cases} \quad (6.2)$$

Les deux étapes suivantes de la méthode sont consacrées à l'estimation de ces termes d'erreur de mesure in-situ et de reconstitution :

- L'étape 4 de la méthode aborde l'estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$. Ceci est l'objet de la section 6.2.
- L'étape 5 de la méthode aborde l'estimation des indicateurs de précision du processus de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$. Ceci est l'objet de la section 6.3.

Enfin, l'étape 6 conclut la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques par l'estimation des indicateurs de précision finaux des mesures altimétriques. Ceci fait l'objet de la section 6.4.

6.2 Étape 4 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ

$\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$

Estimer les indicateurs de précision des mesures in-situ n'est pas trivial car cela nécessiterait la connaissance exacte du niveau réel des cours d'eau. Bien que cette information n'existe pas, divers travaux ont permis d'estimer les valeurs de l'erreur moyenne ($\mu_{\varepsilon_{Mis}}$) et l'écart-type ($\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$) des mesures in-situ.

Nous présentons ci-dessous successivement l'erreur moyenne (§ 6.2.1) et la variance de l'erreur (§ 6.2.2) des mesures in-situ.

6.2.1 Estimation de l'erreur moyenne des mesures in-situ ($\mu_{\varepsilon_{Mis}}$)

L'incertitude existant sur le nivellement des stations limnimétriques est un obstacle majeur à l'analyse de la précision absolue des mesures altimétriques : le constat d'un écart systématique entre mesures altimétriques et mesures in-situ (ou mesures in-situ reconstituées) ne peut en effet être imputé aux seules mesures altimétriques.

Un nivellement géodésique de haute précision conduit à un biais systématique inférieur à ± 5 cm. C'est par exemple le cas pour des stations limnimétriques du réseau national français rattachées au réseau de nivellement de l'IGN. Toutefois, selon les zones d'étude, le nivellement peut être moins bon (cas du bassin amazonien) ou tout simplement inexistant.

Nous présentons dans les sous-sections suivantes des exemples de précision du nivellement de stations limnimétriques pour quelques lacs et réseaux hydrographiques.

6.2.1.1 Nivellement topographique du réseau de limnimètres de la Compagnie Nationale du Rhône

Le réseau hydrographique de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est basé sur le réseau orthométrique national de haute précision NGF-IGN-69¹ de l'IGN qui prend en compte les variations du géoïde.

Plus précisément, le Nivellement Général de la France est subdivisé en quatre réseaux dont les maillages sont de plus en plus denses : réseau de 1^{er} à réseau de 4^{ème} ordre. Le réseau de 4^{ème} ordre qui concerne notamment le nivellement altimétrique des cours d'eau et des ouvrages hydro-électriques est établi sur 263310 points et affiche une précision de 3,6 mm (écart-type) [IGN, 2008].

Ainsi, nous pouvons estimer que les mesures in-situ du niveau du Rhône, réalisés à l'aide de limnimètres installés par la CNR, sont caractérisées par un biais systématique inférieur au centimètre.

6.2.1.2 Nivellement altimétrique de grands lacs

Le nivellement altimétrique de grands lacs du globe a permis de mener à bien des travaux de quantification de la précision absolue des mesures issues de multiples missions altimétriques en confrontant mesures altimétriques et mesures GPS de haute précision sur des grands lacs [Créaux et Birkett, 2006] (cf. section 1.3.1).

Les mesures d'altimétrie effectuées par GPS, selon la technique employée, peuvent atteindre une très bonne précision verticale de l'ordre du décimètre [Cheng et al., 2008], voire une précision de 2 cm [Treuhart et al., 2001] en mettant à profit la réflexion des signaux GPS.

¹Le NGF (« Nivellement Général de la France ») constitue un réseau de repères altimétriques disséminés sur le territoire français métropolitain, ainsi qu'en Corse. Il est décomposé en deux réseaux : le réseau NGF-IGN-69 pour la France métropolitaine et le réseau NGF-IGN-78 pour la Corse.

6.2.1.3 Nivellement altimétrique sur le bassin amazonien

Comme indiqué dans la section 2.2.3 présentant les données in-situ, nous savons que la plus grande part des nombreuses stations limnimétriques du bassin amazonien ne sont pas nivelées par rapport au réseau national orthométrique brésilien (IBGE). Les mesures de niveaux qui y sont relevées sont exprimées dans un référentiel relatif, le zéro de l'échelle limnimétrique étant à une altitude indéterminée.

Les travaux de [Kosuth et al., 2006] ont permis d'estimer l'altitude du zéro des échelles limnimétriques de 97 stations, par confrontation des mesures in-situ à ces stations aux mesures altimétriques issues de la mission Topex/Poseidon. Les altitudes estimées par ce travail ont été comparées, pour 23 stations limnimétriques, à des relevés GPS bi-fréquence et montrent une précision² de $0,00 \pm 0,55\text{m}$ et des écarts maximum de $[-0,93\text{m}; +0,88\text{m}]$.

Bien que ce travail de nivellement puisse présenter des biais systématiques (imputables notamment aux corrections atmosphériques utilisées, et aux erreurs de géoïde), il permet néanmoins de rattacher ces 98 stations limnimétriques du réseau hydrographique du bassin amazonien à un référentiel altimétrique commun (dont la qualité dépend des mesures de Topex/Poseidon) et apporte une cohérence altimétrique d'ensemble. Nous avons pu vérifier que les mesures aux différentes stations nivelées fournissent des profils de ligne d'eau à un instant donné hydrologiquement cohérentes (cf. figure 5.2).

De ce fait, nous estimons que la précision de ces nivellements est suffisante - vu les distances mises en jeu - pour mettre en œuvre notre technique de reconstitution des séries temporelles in-situ aux stations virtuelles.

Néanmoins, compte tenu du fait que ce nivellement a été obtenu à partir de l'altimètre radar, il ne constitue pas une référence indépendante et nous ne sommes donc pas en condition, sur le réseau hydrographique de l'Amazonie, pour estimer l'erreur absolue des mesures altimétriques.

Les limitations actuelles imposées par le nivellement topographique du bassin amazonien, et l'impossibilité de travailler sur d'autres fleuves de dimensions importantes dotés d'un nivellement de haute précision, nous amènent dans l'état actuel des recherches à quantifier « la précision relative » des mesures altimétriques, obtenue en estimant puis en retranchant un biais systématique (imputable aux mesures in-situ, au processus de reconstitution et au géoïde) entre séries temporelles altimétriques et séries temporelles in-situ reconstituées. La « précision absolue » des mesures altimétriques peut être quantifiée de façon précise sur des grands lacs de référence ([Créaux et Birkett, 2006; Birkett, 2000, 1998; Morris et Gill, 1994a; Alsdorf et al., 2001]). Le présent travail est donc complémentaire des travaux sur les lacs.

Le bilan suivant s'impose :

- les valeurs de $\mu_{\varepsilon_{Sat}}$ pour nos stations virtuelles ne peuvent pas être calculées de façon précise à l'aide de l'équation (4.19) car le terme $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ est inconnu,
- l'estimation du dernier terme inconnu $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ de l'équation (4.19) est donc inutile.

Compte tenu de ces limitations, nous avons développé une méthode d'estimation du biais systématique basé sur la comparaison entre mesures in-situ (reconstituées ou non) et mesures altimétriques en période de hautes eaux. Cette méthode est décrite en détail au § 6.4.1.

6.2.2 Estimation de la variance de l'erreur des mesures in-situ ($\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$)

Sur un réseau hydrographique à nivellement topographique de haute précision et équipé de limnimètres automatiques et précis, on peut raisonnablement considérer que la mesure in-situ constitue une « vérité terrain ».

²Cette notation, pour une variable x , signifie : $\mu_x \pm \sigma_x$.

Il n'en est pas nécessairement de même dans d'autres cas, comme pour le bassin amazonien où la majorité des mesures in-situ sont acquises par des opérateurs effectuant une lecture visuelle de graduations sur des échelles limnimétriques.

Dans l'article [Koblinsky et al., 1993], une importante section est consacrée à la question de la précision des mesures in-situ du bassin amazonien. Il y est présenté les résultats d'une étude de comparaison entre des mesures relevées manuellement et des mesures relevées par des limnimètres en deux stations du Lagoa dos Patos, un lagon du sud du Brésil dont les caractéristiques sont similaires aux grands fleuves du bassin amazonien (long de 300km et relativement étroit (50 ~ 80m), en partie difficile d'accès, suivi par des opérateurs, etc.) : les stations limnimétriques de Arambaré et Rio Grande.

Les résultats de cette étude font état de différences importantes entre les mesures manuelles et les mesures issues des limnimètres : 18% des mesures manuelles relevées à Rio Grande et 29% de mesures relevées à Arambaré sont en dehors de la plage d'incertitude de ± 10 cm. Bien que la majorité des mesures manuelles restantes soient dans une plage de $\pm 2 \sim 4$ cm, on constate tout de même en retirant les mesures en dehors de la plage ± 10 cm, que l'incertitude atteint $\pm 4,3$ cm à Rio Grande et $\pm 4,7$ cm à Arambaré.

En marge de de l'incertitude liée aux relevés par des opérateurs, d'autres problèmes nuisent à la bonne réception des mesures in-situ dont la perte ou dégradation des cahiers qui causent des lacunes parfois importantes dans les séries temporelles in-situ.

La conclusion de [Koblinsky et al., 1993] stipule que ces mesures in-situ ne représentent pas nécessairement la « vérité terrain », l'erreur de mesure manuelle commise par un opérateur sur une échelle limnimétrique étant estimée à ± 10 cm ou plus.

Nous considérerons donc que l'écart-type de l'erreur des mesures in-situ est de 10cm, ce qui paraît raisonnable, soit :

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}} \approx 0,10\text{m}$$

Nota : L'écart-type de l'erreur de mesure in-situ impose une condition limite sur la valeur minimale de l'écart-type de l'erreur approximée des mesures altimétriques $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ lorsque les termes d'erreur altimétrique et de reconstitution tendent vers zéro :

$$\lim_{\substack{\sigma_{\varepsilon_{Rec}} \rightarrow 0 \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}} \rightarrow 0}} \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} = \sigma_{\varepsilon_{Mis}} \quad (6.3)$$

6.3 Étape 5 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ reconstituées $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

Problématique

La Méthode de Reconstitution des Séries Temporelles In-Situ présentée au § 5.2 permet de reconstituer des séries temporelles in-situ en une station virtuelle à partir des mesures in-situ disponibles aux stations limnimétriques amont et aval. Ces séries temporelles reconstituées servent de référence lors du calcul des indicateurs de précision des mesures altimétriques. En raison de sa nature (technique d'interpolation et algorithmique), de l'hydrologie des cours d'eau et de la distance des stations limnimétriques utilisées pour la reconstitution, toute méthode de reconstitution³ introduit inévitablement des erreurs dans l'estimation du niveau in-situ à la station virtuelle, erreurs qui se traduisent par un biais systématique ainsi qu'une composante d'erreur variable assimilable à un « bruit de reconstitution » comme illustré dans la figure 6.1.

L'utilisation de séries temporelles in-situ reconstituées pour quantifier les indicateurs de précision des mesures altimétriques $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$, $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $RM\tilde{S}_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ engendre généralement une surestimation de ces indicateurs (cf. équations (4.19)). En revanche, elle n'a pas d'impact sur les indicateurs d'échantillonnage des séries temporelles altimétriques (T_{eff} et η_{eff}).

Approche proposée

Afin de pouvoir estimer l'erreur de reconstitution que nous introduisons en comparant, à la station virtuelle, la série temporelle altimétrique à la série temporelle in-situ reconstituée au lieu de la série temporelle mesurée, nous proposons l'approche suivante :

(6.3.1) **Quantification de l'erreur de reconstitution sur des stations limnimétriques de test** : les indicateurs de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ de l'erreur de reconstitution sont quantifiés sur un grand nombre de « stations limnimétriques de test » pour lesquelles on compare les valeurs reconstituées aux mesures in-situ.

(6.3.2) **Définition de déterminants géophysiques (variables explicatives)** : on procède ensuite au choix et à la définition de déterminants géophysiques permettant de caractériser au mieux les conditions du processus de reconstitution à la station virtuelle : ces déterminants doivent prendre en compte l'éloignement des stations limnimétriques utilisées pour la reconstitution ainsi que la complexité du signal hydrologique à reconstituer.

(6.3.3) **Analyse des résultats de quantification de l'erreur de reconstitution** : On analyse les relations entre indicateurs d'erreur de reconstitution et déterminants géophysiques. C'est une étape importante pour le choix et la mise en œuvre des modèles d'estimation de l'erreur de reconstitution.

(6.3.4) **Modèles d'estimation de l'erreur de reconstitution** : Cette partie consiste à choisir les modèles retenus pour modéliser et estimer les indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution.

(6.3.5) **Modélisation et estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$** : les résultats de quantification de l'erreur de reconstitution ainsi que les déterminants associés sont utilisés pour construire les modèles d'estimation des indicateurs $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$. Ces modèles seront utilisés pour estimer les valeurs des indicateurs de l'erreur de reconstitution aux stations virtuelles altimétriques.

Synthèse

Le lecteur découvrira dans les sections 6.3.1 à 6.3.5 que :

- (1) la méthode proposée permet *a priori* l'estimation et la modélisation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ aux stations virtuelles, quelle que soit la méthode de reconstitution employée : elle repose sur la quantification de l'erreur de reconstitution sur des stations limnimétriques de test, sur le choix de déterminants géophysiques permettant d'expliquer

³Nota : la démarche présentée dans cette étape 5 est générique et s'applique à toute méthode de reconstitution.

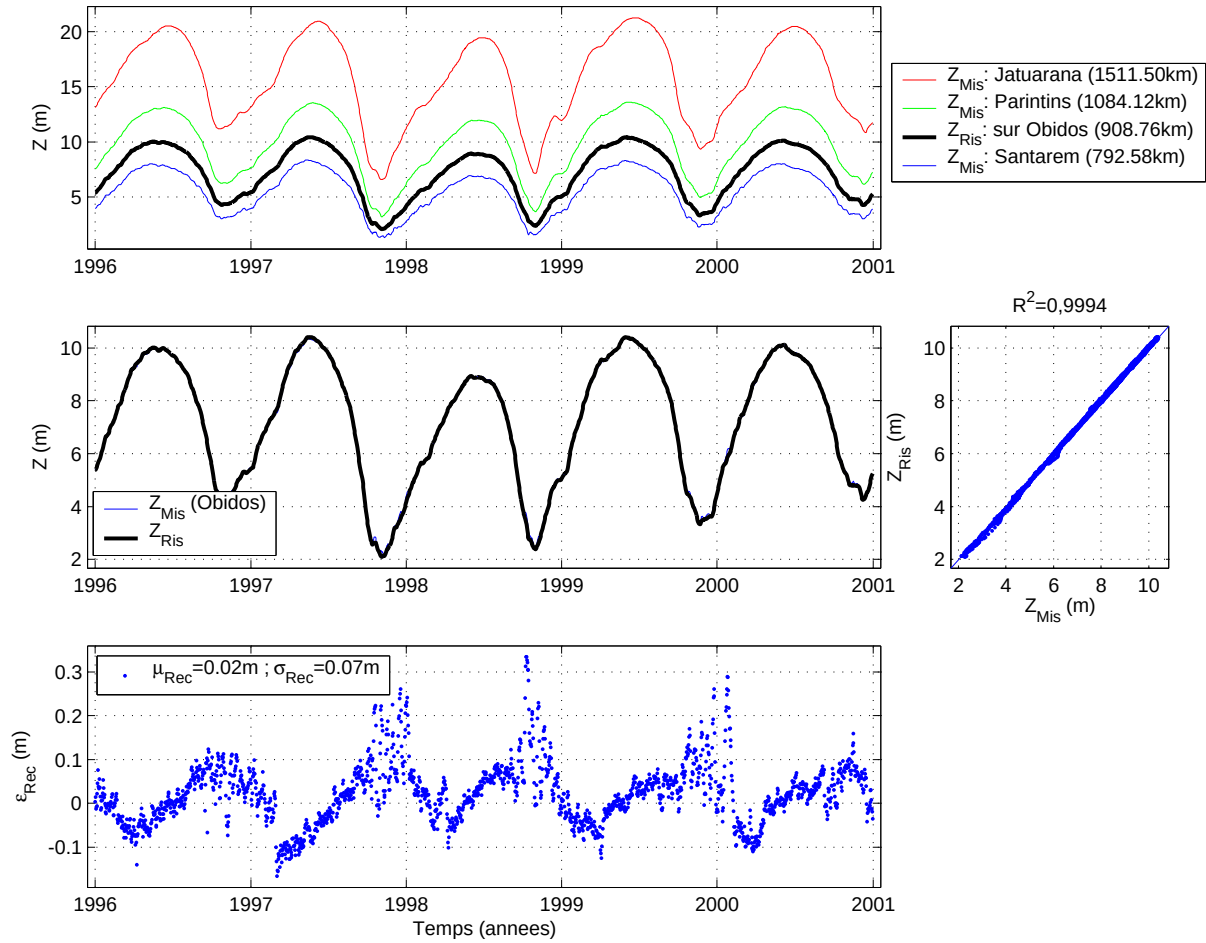


FIG. 6.1: Illustration de l'erreur de reconstitution sur la station limnimétrique d'Obidos située sur le fleuve Amazone. La série temporelle in-situ est reconstituée à partir des stations limnimétriques amont et aval de Jatuarana, Parintins et Santarem (chronogramme du haut). Sur le chronogramme du milieu, les deux séries temporelles mesurée (Z_{Mis} en bleu) et reconstituée (Z_{Ris} en noir) se confondent. L'erreur de reconstitution (série temporelle en bas) est caractérisée par un biais systématique $\mu_{\varepsilon_{Rec}} = 0,02\text{m}$ et un écart-type $\sigma_{\varepsilon_{Rec}} = 0,07\text{m}$. Le graphe de droite illustre la corrélation entre les deux séries temporelles mesurée et reconstituée, cette corrélation est caractérisée par un coefficient $r^2 = 0,9994$.

la variabilité de ces indicateurs et sur la construction de modèles multivariés d'estimation de ces indicateurs, ceci nous oblige à mettre en œuvre une adaptation de la méthode (cf. 6.4.1),

- (2) les modèles d'estimation de la moyenne de l'erreur de reconstitution ($\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$) qui y sont construits ne sont pas de qualité suffisante pour être utilisés dans le cadre de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques,
- (3) les modèles d'estimation de l'écart-type de l'erreur de reconstitution ($\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$) sont d'une qualité suffisante pour être utilisés dans le calcul des indicateurs de précision finaux ($\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $\hat{RMS}_{\varepsilon_{Sat}}$). Toutefois, les estimations de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ sont sujettes à précautions, ce point est abordé au chapitre 7, à la section 7.3.2.1.

La figure 6.9 présente un schéma synthétisant le déroulement des opérations et le cheminement des données nécessaires à l'étape 5 de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques.

6.3.1 Quantification de l'erreur de reconstitution par comparaison des valeurs reconstituées aux mesures issues de stations limnimétriques

La quantification de l'erreur de reconstitution des valeurs in-situ nécessite de comparer en certaines stations limnimétriques les valeurs reconstituées aux valeurs mesurées. C'est ce que nous avons mis en œuvre sur un grand nombre de « stations limnimétriques de test » où nous avons reconstitué les mesures in-situ à l'aide des mesures issues de stations limnimétriques amont et aval.

Si l'on dispose de stations limnimétriques amont et aval, un test de reconstitution est mis en place sur une station limnimétrique de test de la manière suivante :

- on définit de multiples configurations de reconstitution à partir des combinaisons possibles de stations limnimétriques situées à l'amont et/ou à l'aval de la station limnimétrique de test (à l'aide de 1, 2, 3 ou 4 stations limnimétriques amont et aval),
- chaque configuration de reconstitution constitue un test où l'on va reconstituer les valeurs à la station limnimétrique de test afin de les comparer aux mesures in-situ (cf. figure 6.1),
- pour chaque test, on compare la série temporelle reconstituée à la série temporelle mesurée in-situ, ce qui permet de quantifier l'erreur de reconstitution associée à la configuration du test et d'obtenir une réalisation des indicateurs de précision de la reconstitution (le binôme $[\mu_{\varepsilon_{Rec}}, \sigma_{\varepsilon_{Rec}}]$). Ceci est réalisé, pour chaque test, à l'aide des étapes 2 et 3 de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques (voir schéma de la figure 6.2).

La figure 6.2 illustre schématiquement les différentes étapes de traitement nécessaires à la quantification de l'erreur de reconstitution et des indicateurs de précision de reconstitution.

Mise en œuvre : L'exploitation des 98 stations limnimétriques nivelées sur le bassin amazonien nous a permis dans un premier temps de définir de manière relativement grossière 4720 configurations de test sur 76 stations limnimétriques différentes (22 ne présentant pas de configurations exploitables ou suffisamment représentatives).

Critères de sélection basés sur les stations virtuelles : A partir de ces 4720 configurations de test nous pouvons appliquer un ensemble de critères de sélection afin d'éliminer les configurations qui ne reflètent pas les conditions habituelles de reconstitution aux stations virtuelles altimétriques.

Les critères statiques que nous avons appliqués⁴ sont issus d'une analyse menée sur l'ensemble des stations virtuelles que nous utilisons habituellement et permettent de s'assurer que les conditions de reconstitution sont similaires à celles que nous mettons en pratique sur les stations virtuelles dans le cadre de la quantification de l'erreur des mesures altimétriques :

⁴Voir le § 6.3.2 pour la définition des grandeurs **dspp**, **mgd** et **etdn**.

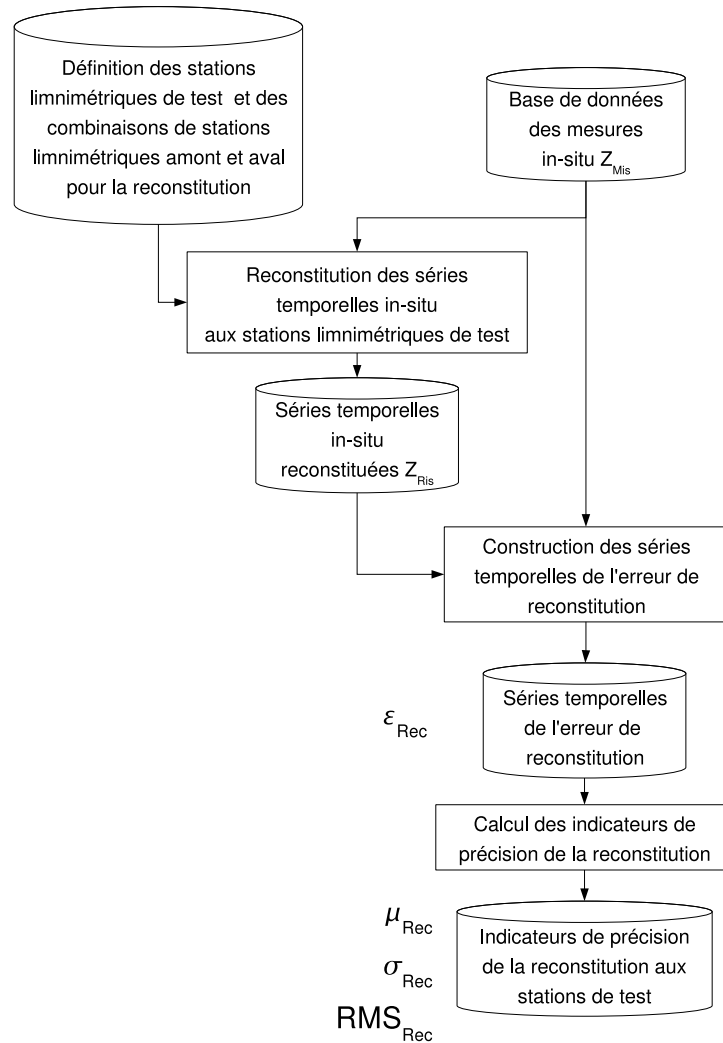


FIG. 6.2: Schéma de quantification de l'erreur de reconstitution des séries temporelles in-situ : Une première étape permet de reconstituer les séries temporelles in-situ aux stations limnimétriques de test ; ces séries temporelles in-situ reconstituées sont ensuite comparées aux séries temporelles mesurées in-situ issues des stations limnimétriques de test afin de construire les séries temporelles de l'erreur de reconstitution ; enfin, nous en déduisons les indicateurs de précision associés à chaque test.

Nb SL	1	2	3	4
Nb de stations virtuelles candidates	77	66	64	62
Nb de stations virtuelles effectives	11	2	2	62

TAB. 6.1: Nombres de stations virtuelles utilisant (Nb SL =) 1, 2, 3 ou 4 stations limnimétriques pour la reconstitution des valeurs de niveaux in-situ, parmi les 77 différentes stations virtuelles définies sur la première orbite de Topex/Poseidon. Il est précisé, pour chaque valeur de Nb SL, le nombre de stations virtuelles candidates à une reconstitution à l'aide de Nb SL stations limnimétriques et le nombre de stations virtuelles que utilisant effectivement Nb SL stations limnimétriques, telles que nous les avons définies et utilisées (cf. § A pour plus de détails sur la définition des stations virtuelles).

- distance de la station limnimétrique de test à la station limnimétrique la plus proche inférieure à 300km (**dspp**),
- moyenne géométrique des distances aux stations limnimétriques utilisées pour la reconstitution inférieure à 450km (**mgd**),
- indicateur de variabilité hydrologique des stations limnimétriques amont et aval utilisées pour la reconstitution inférieure à 2, 5m (**etdn**) (Nota : ce critère ne s'applique que pour les configurations utilisant au moins 2 stations limnimétriques).

L'application de ces critères statiques de sélection sur nos 4720 configurations, nous amène à n'en conserver que 1207.

Sélection des tests les plus représentatifs : Une dernière étape de sélection des combinaisons de test les plus représentatives est nécessaire, elle permet pour chaque station limnimétrique de test, et pour chaque méthode de reconstitution employée (1, 2, 3 ou 4 stations limnimétriques amont et aval), de ne conserver que la combinaison dont les stations limnimétriques amont et aval sont les plus proches (combinaisons dont la somme quadratique des distances à la station limnimétrique de test sont minimales).

L'application de ces critères de sélection aux 1207 configurations de test précédemment sélectionnées conduit à ne retenir que 161 configurations jugées « réalistes ». Au final, ces combinaisons sont mises en œuvre sur 66 stations limnimétriques différentes - soit en moyenne 2, 4 combinaisons par station limnimétrique de test - sur les fleuves Amazone, Branco, Guapore, Ica, Japura, Javari, Jurua, Jutai, Madeira, Negro, Purus, Solimoes et Tarauca du bassin amazonien.

L'analyse des résultats de quantification de l'erreur de reconstitution pour ces 161 configurations de test est présentée plus loin dans ce chapitre et fait l'objet de la section 6.3.3.

6.3.2 Déterminants géophysiques retenus pour expliquer et modéliser l'erreur de reconstitution

Chacune des configurations de reconstitution de test pour laquelle nous avons quantifié l'erreur de reconstitution est associée à un vecteur de déterminants géophysiques qui caractérise les conditions hydrographiques et hydrologiques de la reconstitution.

Ces deux aspects nous permettent de définir des déterminants de deux natures différentes susceptibles d'expliquer statistiquement l'erreur de reconstitution.

Déterminants caractérisant l'éloignement des stations limnimétriques à la station virtuelle

Voici les déterminants qui permettent de prendre en compte l'éloignement du site de reconstitution (station limnimétrique de test ou station virtuelle) aux stations limnimétriques utilisées pour l'interpolation de la ligne d'eau : ils traduisent la difficulté de mener à bien cette interpolation à mesure que ces distances croissent.

dspp : « Distance à la Station limnimétrique la Plus Proche », parmi les N stations limnimétriques employées pour la reconstitution, définie par :

$$dspp = \min_i (|x_{Rec} - x_{SL_i}|)$$

Il est intéressant de remarquer que dans le cas où $Nb\ SL = 1$, le terme $\frac{|\mu_{\varepsilon_{Rec}}|}{dspp}$ est une image de la valeur absolue de la pente du cours d'eau entre la station limnimétrique de test et la station limnimétrique utilisée pour la reconstitution. Afin de connaître le sens de la pente, et finalement de pouvoir correctement mettre en corrélation $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ avec l'information de distance, nous devons décliner **dspp** en une variante signée, nous l'appelons **dsppa**.

dsppa : « **dspp** Algébrique » : distance algébrique à la station limnimétrique la plus proche, parmi les N stations limnimétriques employées pour la reconstitution, définie par : En considérant les différences entre les abscisses curvilignes des stations limnimétriques amont et aval (x_{SL_i}) et l'abscisse curviligne du site de reconstitution (x_{Rec}) :

$$\Delta_{acurv_i} = x_{Rec} - x_{SL_i}$$

le déterminant **dsppa** est défini comme :

$$dsppa = \Delta_{acurv_k}$$

avec k tel que :

$$k = \arg \min_i (|\Delta_{acurv_i}|)$$

mgd : « Moyenne Géométrique des Distances » entre le site de reconstitution et les N stations limnimétriques mises à contribution pour la reconstitution, définie par :

$$mgd = \left[\prod_{i=1}^N |x_{Rec} - x_{SL_i}| \right]^{\frac{1}{N}}$$

avec :

$$\left| \begin{array}{l} x_{Rec} : \text{est l'abscisse curviligne du site de reconstitution} \\ x_{SL_i} : \text{est l'abscisse curviligne de la } i^{\text{ème}} \text{ station limnimétrique} \\ N=1,2,3 \text{ ou } 4 \text{ selon la méthode de reconstitution} \end{array} \right|$$

Notons que lorsque $N = 1$, les deux déterminants **dspp** et **mgd** prennent la même valeur.

De plus, nous savons que reconstituer une série temporelle exactement à l'endroit d'une station limnimétrique induit une erreur de reconstitution nulle (ε_{Rec} est nulle lorsque **dspp** et **mgd** sont nuls) : on exprime ceci par la condition aux limites suivante :

$$\lim_{\min(|x_{Rec} - x_{SL_i}|) \rightarrow 0} \varepsilon_{Rec} = 0 \quad (6.4)$$

Nota : Dans la suite de ce chapitre, le déterminant **dsppa** sera utilisé pour les corrélation avec le déterminant $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ alors que le déterminant **dspp** sera utilisé pour les corrélation avec $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$.

Déterminants caractérisant l'hydrologie locale à la station virtuelle

Ces déterminants permettent de prendre en compte l'hydrologie locale au site de reconstitution : ils traduisent la complexité du signal hydrologique et la difficulté qui en découle à le reconstituer à partir de stations limnimétriques amont et aval quand les variations de niveau sont rapides (i.e. quand les limnigrammes varient de façon asynchrone entre les stations limnimétriques amont et aval).

acurv : « Abscisse Curviligne » du site de reconstitution, est la distance curviligne selon le tracé du cours d'eau entre un point et l'embouchure à l'océan. Dans le cas du bassin amazonien, elle est corrélée à la taille du bassin amont de la station. Plus elle est faible, plus la taille du bassin amont est grande et plus l'hydrogramme est amorti.

etdn : « Ecart-Type des Différences de Niveaux » entre les stations limnimétriques amont et aval les plus proches, défini par :

$$etdn^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M [\Delta Z(i) - \mu_{\Delta Z}]^2$$

avec :

$$\left| \begin{array}{l} \Delta Z = Z_{\text{amont}}(i) - Z_{\text{aval}}(i) \\ \mu_{\Delta Z} = \overline{\Delta Z} = \overline{Z_{\text{amont}}} - \overline{Z_{\text{aval}}} \\ M : \text{le nombre de mesures sur l'horizon conjoint des séries } Z_{\text{amont}} \text{ et } Z_{\text{aval}} \end{array} \right|$$

Notons que lorsque $N = 1$, le déterminant **etdn** est indéfini car une seule station limnimétrique est disponible aux alentours du site de reconstitution.

Notations

Dans le cas général, θ est une matrice de dimensions $N \times 4$ qui contient les déterminants caractérisant N sites de reconstitution (stations virtuelles ou stations limnimétriques de test) dont chaque ligne $\theta(n)$ contient les quatre déterminants d'un site de reconstitution, soit :

$$\theta(i) = [\text{dspp}(i), \text{mgd}(i), \text{acurv}(i), \text{etdn}(i)]$$

6.3.3 Analyse des résultats de quantification de l'erreur de reconstitution

La mise en œuvre du processus de quantification de l'erreur de reconstitution nous a permis de quantifier les indicateurs de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ et d'obtenir les déterminants géophysiques pour 161 configurations de test de reconstitution jugées réalistes (cf. § 6.3.1).

Ces résultats nous permettent de mener une analyse statistique sur les indicateurs de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ (cf. § 6.3.3.1). L'analyse des relations indicateur-déterminant (cf. § 6.3.3.2) consitue la phase préliminaire à la modélisation qui est présentée à la section 6.3.4.

6.3.3.1 Analyse des indicateurs de l'erreur de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

L'analyse des valeurs prises par les indicateurs $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ pour les 161 configurations de test de reconstitution permet d'appréhender l'erreur imputable à notre méthode de reconstitution (cf. chapitre 5, section 5.2 pour la présentation de cette méthode de reconstitution).

La figure 6.3 présente les histogrammes de distribution des indicateurs de précision pour chacune des techniques de reconstitution. La table 6.2 ci-dessous donne, pour la même analyse, les valeurs limites, la moyenne et l'écart-type des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution.

Nb SL	Nbre tests	$\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)				$\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)			
		min	μ	max	σ	min	μ	max	σ
1	66	-24,89	-0,25	24,89	9,52	0,06	1,03	2,91	0,66
2	35	-0,61	0,70	4,81	1,09	0,06	0,47	1,16	0,30
3	33	-1,04	0,23	3,29	0,72	0,07	0,48	1,67	0,34
4	27	-1,30	0,17	3,57	0,81	0,09	0,44	0,85	0,22

TAB. 6.2: Valeurs limites (min et max), moyennes (μ) et écart-types des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution obtenues sur les 161 configurations de test sélectionnées.

$\mu_{\varepsilon_{Rec}}$: Les histogrammes montrent une grande dispersion de l'erreur moyenne de reconstitution lorsqu'une seule station limnimétrique est utilisée (Nb SL = 1). Ceci résulte de manière directe des écarts d'altitude entre deux stations limnimétriques voisines.

Pour les autres techniques de reconstitution (Nb SL > 1), l'erreur moyenne de reconstitution se retrouve très significativement réduite. On vérifie ainsi que l'utilisation de techniques d'interpolation d'ordre ≥ 2 permet d'obtenir de meilleurs résultats de reconstitution, du fait qu'elles prennent en compte la pente du cours d'eau sur lequel on effectue la reconstitution.

En outre, on peut observer une tendance générale à surestimer le niveau moyen des cours d'eau, les valeurs moyennes de l'erreur moyenne de reconstitution étant toujours positives (sauf pour Nb SL = 1 où la valeur moyenne des $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ aurait dû être nulle si l'on avait conservé strictement les configurations de reconstitution réciproques : « comparer A à B » et « comparer B à A »).

$\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$: Le constat que l'on peut dresser pour les résultats de quantification de cet indicateur est similaire à celui de l'erreur moyenne de reconstitution : la qualité de la reconstitution s'améliore nettement lorsque l'on utilise une méthode d'interpolation s'appuyant sur deux stations limnimétriques ou plus : les résultats semblent s'améliorer sensiblement à mesure que l'ordre de l'interpolateur augmente.

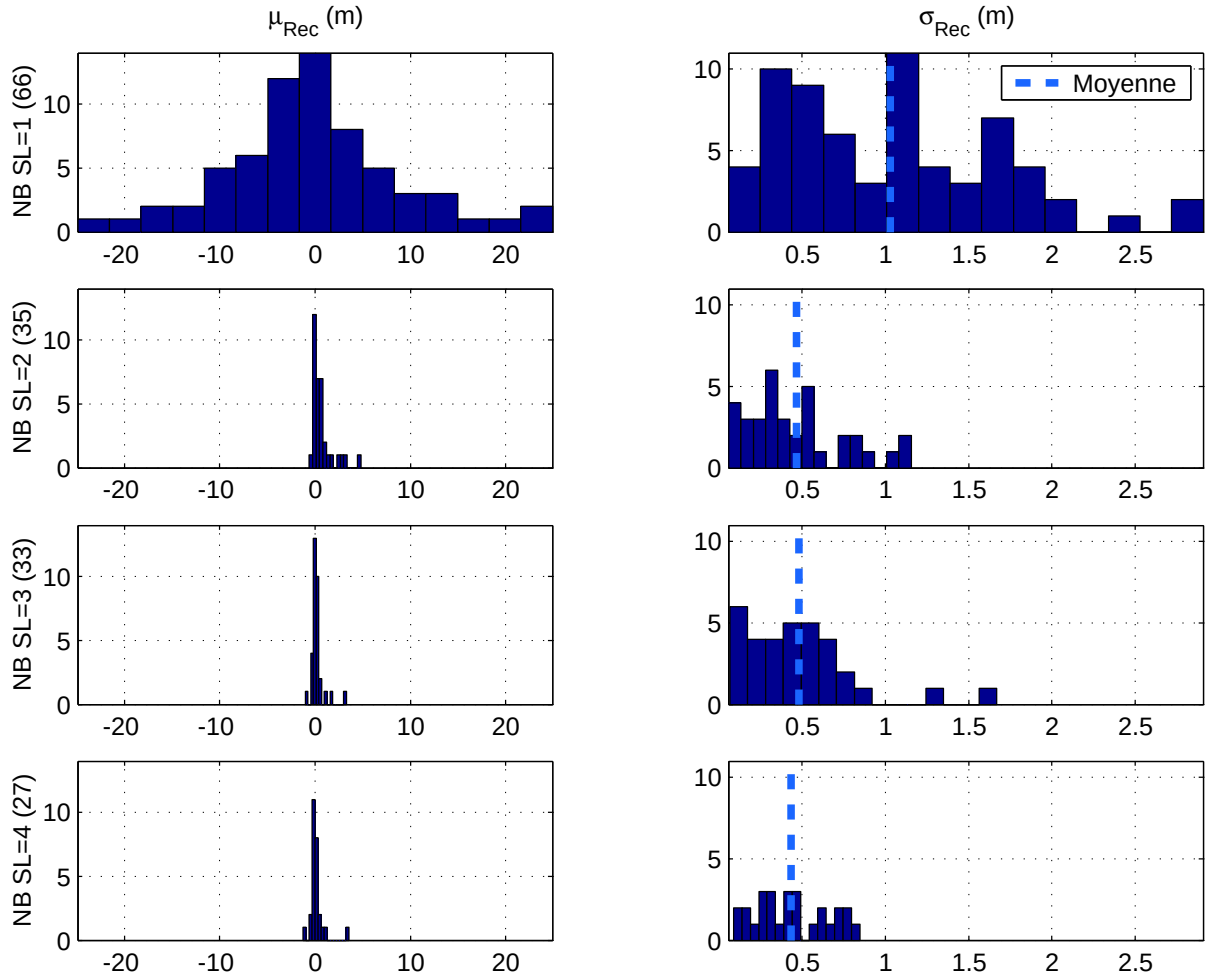


FIG. 6.3: Histogrammes des indicateurs de précision de reconstitution ($\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$) quantifiés sur les stations limnimétriques de test. Les histogrammes de chaque ligne illustrent les résultats obtenus pour chacune des méthodes de reconstitution, s'appuyant respectivement sur les mesures in-situ issues de 1, 2, 3 ou 4 (Nb SL) stations limnimétriques amont et aval. Colonne de gauche : histogrammes des valeurs moyennes de l'erreur de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$; Colonne de droite : écart-types de l'erreur de reconstitution $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$. Le nombre de combinaisons de stations limnimétriques pour chacune des méthodes illustrées est indiqué entre parenthèses (sur la gauche de la colonne de gauche).

6.3.3.2 Analyse des relations déterminants-indicateurs

L'analyse des relations individuelles entre déterminants géophysiques (hydrauliques et hydrologiques) et indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ ou $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$, par le calcul du coefficient de corrélation r^2 , nous permet de quantifier la part de variance d'un indicateur de précision qu'un déterminant permet d'expliquer au travers d'un certain type de relation déterminant-indicateur.

De façon générale, nous employons ici deux types de fonctions reliant l'indicateur y au déterminant x ajustées par moindres carrés :

- des fonctions linéaires contraintes à passer par l'origine : $\hat{y} = a.x$,

- des fonctions de puissance⁵ : $\hat{y} = \alpha \cdot x^\beta$

La figure 6.4 illustre ces deux type de relations entre le déterminant **dspp** et l'indicateur $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$, pour la technique de reconstitution utilisant trois stations limnimétriques (Nb SL = 3).

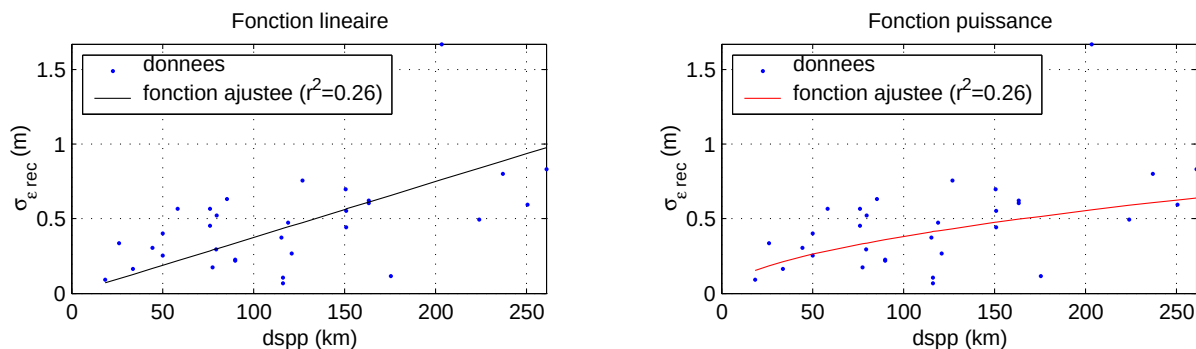


FIG. 6.4: Exemples de fonctions ajustées par moindres carrés : fonction linéaire (à gauche) et fonction puissance (à droite) basées sur le déterminant **dspp** et l'indicateur $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$, pour la technique de reconstitution utilisant les mesures de 3 stations limnimétriques.

Le coefficient de corrélation r^2 est calculé⁶ pour ces deux types de relation entre les valeurs issues de la fonction ajustée $\hat{y}$ et les valeurs y , soit :

- $r^2(\hat{y}, y) = r^2(a \cdot x, y)$ pour les fonctions linéaires, ou plus simplement $r^2(x, y)$ puisque le coefficient r^2 est invariant si x et/ou y est transformé linéairement.
- $r^2(\hat{y}, y) = r^2(\alpha \cdot x^\beta, y)$ pour les fonctions puissance.

Remarque : Du fait que la technique d'ajustement employée pour les fonctions puissance s'appuie sur une transformation logarithme des déterminants et indicateurs, l'établissement de relations entre indicateurs (y) et déterminants (x) ne pourra s'effectuer que si ceux-ci sont positifs et non nuls. Les relations à base de fonctions puissance ne sont donc applicables que pour l'indicateur $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ ainsi que pour tous les déterminants.

La table 6.3 présente les valeurs de r^2 des relations indicateur-déterminant⁷ monovariées obtenues à partir de fonctions linéaires pour $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et de fonctions linéaires et puissance pour $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$, on peut alors commenter ces résultats selon différents points de vue.

Analyse générale

1. Aucun des quatre déterminants ne semble être en mesure d'expliquer la variance des indicateurs de précision de manière constante sur les quatre techniques de reconstitutions,
2. L'indicateur de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ est bien corrélé au déterminant **dsppa** seulement lorsque Nb SL = 1, et est passablement bien corrélé à la plupart des autres déterminants bien que cela se dégrade à mesure que Nb SL augmente.
3. L'indicateur de précision $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ est passablement bien corrélé aux déterminants **dspp** et **acurv**, alors que les corrélations avec les autres déterminants se dégradent à mesure que Nb SL augmente.

⁵Une fonction puissance $y = \alpha \cdot x_1^{a_1} \dots x_n^{a_n}$ peut s'écrire sous la forme d'une fonction « log-linéaire » si x et y sont positifs et non-nuls : $\ln(y) = \ln(\alpha) + a_1 \cdot \ln(x_1) + \dots + a_n \cdot \ln(x_n)$. Cette forme permet d'ajuster une fonction puissance à l'aide des mêmes équations que pour une fonction linéaire. Voir la section 6.3.4.1 pour plus de détails sur l'ajustement de fonctions linéaires et log-linéaires par moindres carrés.

⁶Voir la définition du coefficient de corrélation r^2 au § 2.1.3, page 52, équation (2.5).

⁷Les valeurs de $r^2(X, Y)$ présentées dans ce mémoire ont été l'objet de contrôles systématiques permettant de s'assurer que les valeurs de r^2 entre les deux variables X et Y ne soient pas surrestimées par un artefact statistique ; Ceci est opéré par le calcul de l'indicateur « p-value » qui permet d'estimer la probabilité que les variables X et Y ne soient pas corrélées. Dans nos travaux, les valeurs de p-value sont de l'ordre de 10^{-4} .

Valeurs de r^2 pour différents sous ensembles de configurations de test de reconstitution				
Sous ensembles de configurations de test	Déterminant	$\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ linéaire	$\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ linéaire	$\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ puissance
Nb SL =1 (66)	dsppa	0,74	0,01	-
	dspp	0,00	0,57	0,57
	mgd	-	-	-
	acurv	0,00	0,23	0,23
	etdn	-	-	-
Nb SL =2 (35)	dsppa	0,05	0,00	-
	dspp	0,33	0,28	0,29
	mgd	0,30	0,21	0,22
	acurv	0,30	0,40	0,38
	etdn	0,24	0,31	0,31
Nb SL =3 (33)	dsppa	0,03	0,05	-
	dspp	0,17	0,26	0,26
	mgd	0,14	0,19	0,19
	acurv	0,05	0,49	0,47
	etdn	0,13	0,20	0,19
Nb SL =4 (27)	dsppa	0,04	0,03	-
	dspp	0,09	0,29	0,27
	mgd	0,16	0,05	0,05
	acurv	0,20	0,19	0,18
	etdn	0,05	0,08	0,09

TAB. 6.3: Valeurs du coefficient r^2 pour les relations déterminant-indicateur calculées à partir des résultats de quantification de l'erreur de reconstitution sur les 161 configurations de test. Chaque déterminant est confronté au résultat de l'ajustement de (1) fonctions linéaires pour l'indicateur de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et (2) fonctions linéaires et puissance pour l'indicateur de précision $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$. Ces coefficients sont calculés pour chaque méthode de reconstitution considérée séparément (Nb SL = 1, 2, 3 ou 4).

Analyse par technique de reconstitution

4. La valeur du coefficient de corrélation r^2 établi entre déterminants et indicateurs diminue à mesure que Nb SL augmente.

Vu les valeurs du coefficient de corrélation r^2 observées à la table 6.3, nous pouvons raisonnablement supposer que les modèles multivariés permettent d'expliquer une plus grande part de la variance des indicateurs de précision.

Le regroupement par type de configurations de reconstitution (1, 2, 3 ou 4 stations limnimétriques) sera utilisé pour la modélisation et l'estimation multivariée des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution aux stations virtuelles (cf. § 6.3.4).

6.3.4 Modèles d'estimation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution

L'estimation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution est réalisée à l'aide de modèles multivariés que nous construisons à partir : (1) des 161 réalisations des indicateurs de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ sur des stations limnimétriques de test (vu au § 6.3.1) ; et (2) des déterminants géophysiques θ définis au § 6.3.2 qui caractérisent les conditions dans lesquelles se sont déroulés les 161 tests de reconstitution.

Nos choix se sont arrêtés sur deux types de modèles multivariés (1) « linéaires » et (2) « log-linéaires » à base de fonctions puissance. Leur mise en œuvre s'appuie sur l'analyse des corrélations monovariées présentée à la section 6.3.3.

6.3.4.1 Définition des modèles d'estimation

Nous avons vu au § 6.3.3.2 que les deux types de relations linéaires ou à base de fonctions puissance présentent un intérêt pour l'estimation monovariée des indicateurs de l'erreur de reconstitution ε_{Rec} . Nous avons donc arrêté nos choix sur deux types de modèles multivariés différents :

1. des modèles multivariés linéaires contraints à passer par l'origine (ordonnée à l'origine nulle) de la forme :

$$\mathcal{M}(\theta) = \theta.A = a_0 + a_1.\theta_1 + a_2.\theta_2 + a_3.\theta_3 + a_4.\theta_4 \quad (6.5)$$

Compte tenu de la condition aux limites de l'équation (6.4), nous devons imposer $a_0 = 0$ du fait que l'erreur de reconstitution est nulle lorsque les déterminants **dspp**, **mdg**, **acurv** et **etdn** sont nuls.

2. des modèles multivariés « log-linéaires » à base de fonctions puissance de la forme :

$$\mathcal{M}(\theta) = \alpha.\theta_1^{a_1}.\theta_2^{a_2}.\theta_3^{a_3}.\theta_4^{a_4} \quad (6.6)$$

que l'on peut écrire sous la même forme que l'équation (6.5) à l'aide d'une simple transformation logarithmique :

$$\ln(\mathcal{M}(\theta)) = \ln(\theta).A = a_0 + a_1.\ln(\theta_1) + a_2.\ln(\theta_2) + a_3.\ln(\theta_3) + a_4.\ln(\theta_4) \quad (6.7)$$

Pour ces deux types de modèles, nous avons :

A : $A = [a_0, a_1, a_2, a_3, a_4]$: le vecteur des coefficients du modèle $\mathcal{M}(\theta)$, le coefficient a_0 étant égal à $\ln(\alpha)$ pour les modèles log-linéaires et nul pour les modèles linéaires contraints à passer par l'origine,

θ : $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4] = [\text{dspp}, \text{mdg}, \text{acurv}, \text{etdn}]$: la matrice ($N \times 4$) des vecteurs lignes de déterminants des N stations virtuelles.

6.3.4.2 Ajustement des modèles par moindres carrés

D'une manière générale, l'ajustement par moindres carrés d'un modèle linéaire multivariable paramétrisé par le vecteur A et contraint à passer par l'origine des axes (voir [Neter et al., 1996] et [Myers, 1986]) s'effectue selon l'expression suivante :

$$A = [\theta^T \theta]^{-1} \theta^T Y \quad (6.8)$$

Où :

- θ est une matrice dont l'élément $\theta_{n,i}$ contient la valeur $\theta_i(n)$: le $i^{\text{ème}}$ déterminant de la $n^{\text{ème}}$ station virtuelle,
- Y est le vecteur prenant les valeurs de variable à modéliser, $Y(n)$ étant l'indicateur de la $n^{\text{ème}}$ station virtuelle.

Les deux types de modèles linéaire et log-linéaire introduits précédemment ont été choisis entre autres raisons parce qu'ils permettent un ajustement relativement simple sur les données. Nous avons vu qu'une transformation logarithmique de l'équation (6.6) du modèle log-linéaire permet d'exprimer le logarithme de la variable à estimer en fonction de A et du logarithme des éléments de θ . Cette formulation permet d'ajuster les modèles log-linéaires multivariables selon l'équation (6.8) de la même manière que les modèles linéaires multivariables.

Remarques :

- Les coefficients des modèles non contraints à passer par l'origine des axes seraient calculés à l'aide de l'équation (6.8), mais une première colonne unité doit être ajoutée à la matrice θ , soit $\theta(n) = [1, \text{dspp}(i), \text{mgd}(i), \text{acurv}(i), \text{etdn}(i)]$ pour la $n^{\text{ème}}$ station virtuelle.
- Il est important de rappeler que l'établissement de relations log-linéaires ne peut s'effectuer que lorsque les indicateurs et les déterminants sont positifs et non nuls, ce qui rend impossible la modélisation de $\mu_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ à l'aide de modèles log-linéaires.

6.3.4.3 Optimisation des modèles

Nous avons vu précédemment que les corrélations déterminants-indicateurs sont caractérisées par des valeurs de r^2 variables selon le nombre de stations limnimétriques employées pour la reconstitution ainsi que selon la période hydrologique considérée.

Selon ces mêmes conditions, certains déterminants ne portent pas d'information suffisamment significative pour être pris en compte lors de l'ajustement d'un modèle.

Compte tenu de ces remarques, nous avons mis au point plusieurs optimisations de la forme des modèles permettant de répondre à ces problèmes, elles sont les suivantes :

Modélisations adaptées aux différentes situations de reconstitution

Afin d'optimiser l'estimation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution, il nous a paru indispensable de construire différents modèles adaptés aux différentes situations de reconstitution. En effet, nous disposons de quatre techniques de reconstitution des séries temporelles (selon le nombre $\text{Nb SL} = 1, 2, 3$ ou 4 de stations limnimétriques utilisées), et souhaitons estimer les indicateurs de l'erreur de reconstitution pour les trois périodes hydrologiques de « hautes eaux », « moyennes eaux » et « basses eaux » ainsi que de manière globale, ceci nous amène à construire seize modèles correspondant à ces seize situations de reconstitution.

Les sections suivantes ne présentent la méthode de construction des modèles d'estimation que pour les quatre techniques de reconstitution des séries temporelles en période globale. La méthode, facilement transposable, a également été mise en œuvre pour le cas des trois périodes hydrologiques. Le traitement de ces douze derniers cas fait l'objet de la section 6.3.6.2.

Sélection automatisée des déterminants

Selon les situations de reconstitution (cf. table 6.3) les déterminants géophysiques ne portent pas toujours une information significative (r^2 très faible). Une technique de sélection des variables explicatives analogue aux technique dites de « step-wise descendant » [Hocking, 1976] a été implémentée. Elle permet de préselectionner les déterminants à utiliser pour la construction des modèles en écartant les déterminants qui n'apportent pas une information significative.

Le principe de cette technique, avec θ la matrice de déterminants et Y les valeurs connues de l'indicateur de précision à modéliser, se résume par les étapes suivantes :

1. on calcule, pour chaque vecteur θ_i (vecteur des valeurs du $i^{\text{ème}}$ déterminant pour les N stations limnimétriques de test), la valeur du coefficient $r_i^2(\theta_i, Y)$,
2. on classe les valeurs de r_i^2 par ordre décroissant, on obtient ainsi un vecteur de valeurs de r_k^2 organisé selon le vecteur des indices k ,
3. on sélectionne dans un premier temps le déterminant dont le coefficient r^2 est le plus grand ($r_{k_1}^2$), et on construit un premier modèle que l'on caractérise par son coefficient $r_{\mathcal{M}}^2(Y, \hat{Y})^8$,
4. on utilise un déterminant supplémentaire, le suivant selon la classement des valeurs r_k^2 , en plus de celle(s) précédemment sélectionnée(s) et on construit un nouveau modèle à partir des déterminants sélectionnés. On décide de conserver le nouveau déterminant pour construire le modèle si il permet d'augmenter significativement (+5%) la valeur de $r_{\mathcal{M}}^2(Y, \hat{Y})$ du modèle. On réitère cette l'étape jusqu'à épuisement des déterminants.

Le modèle ainsi obtenu est construit en utilisant seulement les déterminants que l'on juge suffisamment corrélés à l'indicateur que l'on souhaite modéliser. Cette technique évite d'augmenter artificiellement la valeur de $r_{\mathcal{M}}^2$ du modèle final par l'utilisation de déterminants que l'on pourrait assimiler à un bruit.

Sélection du meilleur type de modèle d'estimation pour $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

L'estimation de l'indicateur $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ peut être accomplie aussi bien avec un modèle de type linéaire qu'avec un modèle de type log-linéaire. Le modèle retenu est celui qui est caractérisé par la valeur $r_{\mathcal{M}}^2$ la plus forte.

6.3.5 Modélisation et estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

Cette cinquième et dernière étape pour l'estimation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution est l'occasion de construire des modèles d'estimation selon les deux types de modèles multivariés introduits précédemment et de mettre en œuvre les différentes optimisations proposées.

Les modèles multivariés permettent d'utiliser plusieurs déterminants simultanément, mettant à profit leurs effets conjugués afin de mieux expliquer les indicateurs de précision.

6.3.5.1 Modélisation et estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$

L'analyse des relations déterminants-indicateurs présentée au § 6.3.3.2 a permis de montrer qu'il est pertinent de construire des modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$.

Construction des modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$

Nous avons construit les quatre modèles nécessaires à l'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ pour les quatre techniques de reconstitutions considérées (selon le nombre de stations limnimétriques employées).

⁸Le coefficient r^2 pour un modèle multivariable se calcule à partir des valeurs Y utilisées pour construire le modèle et de leurs estimations $\hat{Y} = \mathcal{M}(\theta_k)$ issues du modèle.

La table 6.4 dresse la liste des paramètres des quatre modèles d'estimation. On y trouve des modèles dont les coefficients r^2 vont de 0,18 (mauvais) à 0,74 (assez bon⁹).

Coefficients des modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$								
Modèle	Nb SV	Type	a_0	a_1 (dsppa)	a_2 (mgd)	a_3 (acurv)	a_4 (etdn)	r^2 modèles
$\mathcal{M}_{1G\mu}(\theta)$	66	lin.	-	0.047449	-	-	-	0.74
$\mathcal{M}_{2G\mu}(\theta)$	35	lin.	-	-	0.002974	0.000157	-	0.46
$\mathcal{M}_{3G\mu}(\theta)$	33	lin.	-	-	0.000807	-	0.099442	0.18
$\mathcal{M}_{4G\mu}(\theta)$	27	lin.	-	-	0.000507	0.000076	-	0.27

Les coefficients a_0 à a_4 sont donnés pour les modèles linéaires de la forme :

$$\mathcal{M}(\theta) = \theta.A = a_0 + a_1.\theta_1 + a_2.\theta_2 + a_3.\theta_3 + a_4.\theta_4$$

Le symbole « - » signifie que la variable est inutilisée/rejetée par l'optimisation du modèle.

TAB. 6.4: Table récapitulative des paramètres et des coefficients r^2 obtenus pour les quatre modèles d'estimation de l'indicateur de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$. Un modèle a été créé pour chacune des techniques de reconstitution. Unité des coefficients : a_1 et a_2 en (m/km) ; a_3 en (km) et a_4 en (m). Notations des modèles : $\mathcal{M}_{2ME\mu}(\theta)$ signifie « modèle d'estimation pour la technique de reconstitution basée sur 2 stations limnimétriques amont et aval, pour la période de moyennes eaux ».

Seul le modèle d'estimation $\mathcal{M}_{1G\mu}(\theta)$, dédié à l'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ lorsque Nb SL = 1, est qualifié par un coefficient r^2 satisfaisant. Les coefficient r^2 des autres modèles laissent supposer qu'ils ne sont pas suffisamment bons pour l'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et le calcul des indicateurs de précision finaux $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $R\hat{M}S_{\varepsilon_{Sat}}$. L'analyse des erreurs résiduelles ci-après nous permettra d'affiner ces hypothèses.

Erreur résiduelle des modèles

L'analyse de l'erreur d'estimation des modèles, ou des résidus des modèles, permet d'appréhender de manière synthétique la qualité des modèles d'estimation en comparant, sur les stations limnimétriques de test, la valeur de l'estimateur $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ à la valeur réelle $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$. L'erreur d'estimation des modèles $\epsilon_{\mathcal{M}}(n)$, associée à la $n^{\text{ème}}$ station limnimétrique de test est calculée comme suit :

$$\epsilon_{\mathcal{M}}(n) = \hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}(n) - \mu_{\varepsilon_{Rec}}(n) = \mathcal{M}(\theta(n)) - \mu_{\varepsilon_{Rec}}(n) \quad (6.9)$$

Les histogrammes de la figure 6.5 montrent la dispersion de l'erreur résiduelle $\epsilon_{\mathcal{M}}$ des quatre modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$.

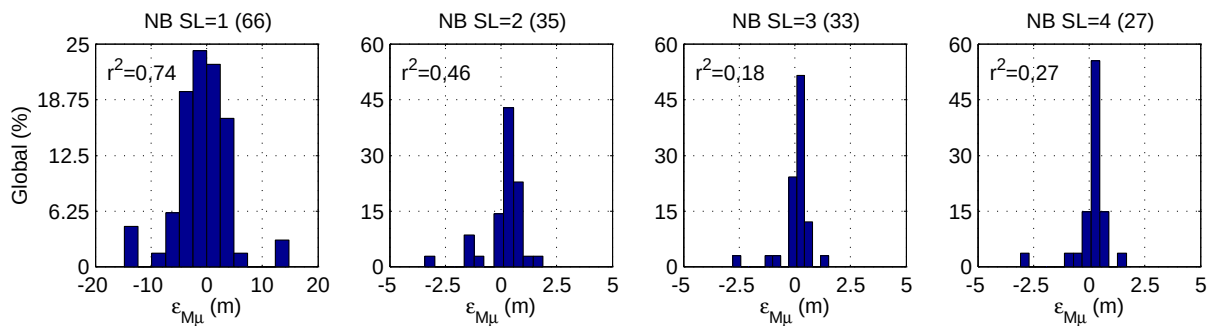


FIG. 6.5: Histogrammes de l'erreur résiduelle ($\epsilon_{\mathcal{M}}$) des quatre modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$.

⁹Qualitatifs de r^2 : $0 < \text{mauvais} < 0,25 < \text{passable} < 0,5 < \text{assez bon} < 0,75 < \text{bon} < 1$.

L'erreur résiduelle du modèle d'estimation dans le cas où $Nb\ SL = 1$ est relativement importante et se situe dans la gamme $-0,72 \pm 4,89m$. La moyenne de l'erreur de reconstitution dans ces cas est une image directe de la dénivelée entre le site de reconstitution et la station limnimétrique utilisée. En plus de l'information sur la distance à la station limnimétrique la plus proche, une information sur la pente locale du cours d'eau serait nécessaire, ce que ne permet pas la structure du modèle.

Les autres modèles sont caractérisés respectivement (de gauche à droite) par une erreur résiduelle de $0,15 \pm 0,92m$ ($Nb\ SL = 2$), $0,07 \pm 0,68m$ ($nbsl = 3$) et $0,10 \pm 0,77m$ ($Nb\ SL = 4$).

L'incertitude sur l'estimateur $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ (dispersion de l'erreur résiduelle) étant plutôt située dans la gamme métrique, nous ne pourrions pas raisonnablement utiliser ces modèles pour l'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et le calcul des indicateurs de précision finaux.

Synthèse sur la modélisation et l'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$

Nous avons vu que les modèles d'estimation de la moyenne de l'erreur de reconstitution sont caractérisés par des coefficients de corrélation r^2 allant de mauvais 0,18 à assez bon 0,74 et que dans tous les cas l'incertitude (dispersion de l'erreur résiduelle) de ces modèles d'estimation est située dans la gamme métrique, ce qui est trop important pour que ces modèles soient utilisés afin de calculer les indicateurs de précision finaux $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $\hat{RMS}_{\varepsilon_{Sat}}$ (cf. équations (6.2)).

La conclusion qui s'impose est donc la suivante :

En l'état actuel des recherches, notre incapacité à modéliser et estimer l'erreur moyenne de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ de manière satisfaisante fait que nous ne sommes pas à même de quantifier la précision absolue des mesures altimétriques.

Cette conclusion va dans le sens de la conclusion de la section 6.2.1.3 sur l'estimation de l'erreur moyenne des mesures in-situ ($\mu_{\varepsilon_{Mis}}$) que nous ne sommes pas à même de quantifier sur le bassin amazonien.

La suite de ce chapitre va se consacrer à la quantification de la précision relative des mesures altimétriques, basée sur l'estimation de l'erreur moyenne constatée en période de hautes eaux.

6.3.5.2 Modélisation et estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

L'analyse des relations déterminants-indicateurs au § 6.3.3.2 a permis de montrer qu'il est pertinent de construire des modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$.

Construction des modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

Nous avons construit les quatre modèles nécessaires à l'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ pour les quatre techniques de reconstitutions considérées (selon le nombre de stations limnimétriques employées). Dans chaque cas, nous avons opté pour le modèle (linéaire ou log-linéaire) caractérisé par le meilleur coefficient r^2 .

La table 6.5 dresse la liste des paramètres des quatre modèles d'estimation. On y trouve des modèles dont les coefficients r^2 vont de 0,57 (passable) à 0,73 (assez bon). La moyenne des r^2 est 0,63 ce qui est passable.

La qualité d'ensemble des modèles d'estimation que nous avons construits est passable, et ceci malgré la sélection des tests de reconstitution et les multiples optimisations appliquées aux modèles, et nous montre que les déterminants géophysiques que nous avons définis ne sont pas suffisants pour estimer de manière très précise l'écart-type de l'erreur de reconstitution.

Coefficients des modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$								
Modèle	Nb SV	Type	a_0	a_1 (dspp)	a_2 (mgd)	a_3 (acurv)	a_4 (etdn)	r^2 modèles
$\mathcal{M}_{1G\sigma}(\theta)$	66	lin.	-	0,006701	-	-	-	0,57
$\mathcal{M}_{2G\sigma}(\theta)$	35	lin.	-	-	-	0,000126	0,148986	0,63
$\mathcal{M}_{3G\sigma}(\theta)$	33	log-lin.	-11,061078	0,665498	-0,848408	1,489576	0,383830	0,73
$\mathcal{M}_{4G\sigma}(\theta)$	27	lin.	-	0,002659	-0,001398	0,000165	0,097822	0,59

Les coefficients a_0 à a_4 sont donnés pour les formes suivantes des modèles :

- Linéaire : $\mathcal{M}(\theta) = \theta.A = a_1.\theta_1 + a_2.\theta_2 + a_3.\theta_3 + a_4.\theta_4$

- Log-linéaire : $\ln(\mathcal{M}(\theta)) = \ln(\theta).A = a_0 + a_1.\ln(\theta_1) + a_2.\ln(\theta_2) + a_3.\ln(\theta_3) + a_4.\ln(\theta_4)$

Le symbole « - » signifie que la variable est inutilisée/rejetée par l'optimisation du modèle.

TAB. 6.5: Table récapitulative des paramètres et des coefficients r^2 obtenus pour les quatre modèles d'estimation de l'indicateur de précision $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$. Un modèle a été créé pour chacune des techniques de reconstitution. Unité des coefficients pour les modèles linéaires : a_1 et a_2 en (m/km) ; a_3 en (km) et a_4 en (m), les coefficients des modèles log-linéaires sont sans unité stable. Notations des modèles : $\mathcal{M}_{2ME\mu}(\theta)$ signifie « modèle d'estimation pour la technique de reconstitution basée sur 2 stations limnimétriques amont et aval, pour la période de moyennes eaux ».

Erreur résiduelle des modèles

L'erreur d'estimation des modèles $\epsilon_{\mathcal{M}}(n)$, associée à la $n^{\text{ème}}$ station limnimétrique de test est calculée comme suit :

$$\epsilon_{\mathcal{M}}(n) = \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}(n) - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}(n) = \mathcal{M}(\theta(n)) - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}(n) \quad (6.10)$$

Les histogrammes de la figure 6.6 montrent la dispersion de l'erreur résiduelle $\epsilon_{\mathcal{M}}$ des quatre modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$.

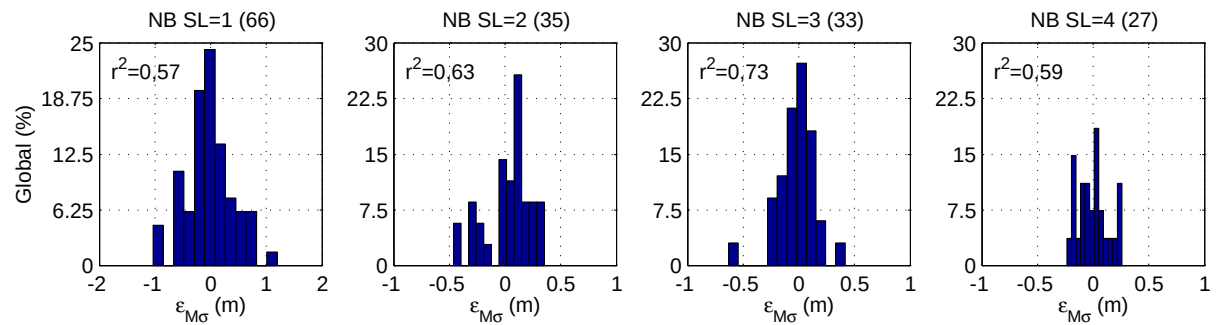


FIG. 6.6: Histogrammes de l'erreur résiduelle ($\epsilon_{\mathcal{M}}$) des quatre modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$.

Dans les cas où $\text{Nb SL} = 1$, les valeurs des erreurs résiduelles sont relativement importantes et se situent globalement dans la gamme $-0,03 \pm 0,44\text{m}$.

Lorsque $\text{Nb SL} > 1$, on peut constater que la quasi intégralité des erreurs résiduelles se situe dans des plages d'incertitude de plus en plus réduites à mesure que Nb SL augmente : $0,03 \pm 0,21\text{m}$, $-0,02 \pm 0,18\text{m}$ et $0,00 \pm 0,14\text{m}$ pour Nb SL=2, 3 et 4 respectivement.

Il est important de remarquer que les ordres de grandeur de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ pour les configurations de test de reconstitution ne sont pas dans la même gamme de valeurs que pour des stations virtuelles : les stations virtuelles étant généralement situées entre deux stations limnimétriques, elles sont globalement plus proches des stations limnimétriques que les stations limnimétriques entre elles. Dans le cas des configurations de test, les distances aux stations limnimétriques mises en jeu sont un peu plus importantes

que dans le cas des stations virtuelles, il en résulte par exemple des déterminant **dspp** et **mgd** de plus grande amplitude, et par conséquent des valeurs de l'estimateur $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ plus importantes.

La figure 6.7, en complément des histogrammes de la figure 6.6, illustre graphiquement les quatre modèles d'estimation. Elle superpose pour les stations limnimétriques de test les valeurs réelles $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ et leurs estimations $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ à partir des déterminants géophysiques représentées en fonction de **dspp**.

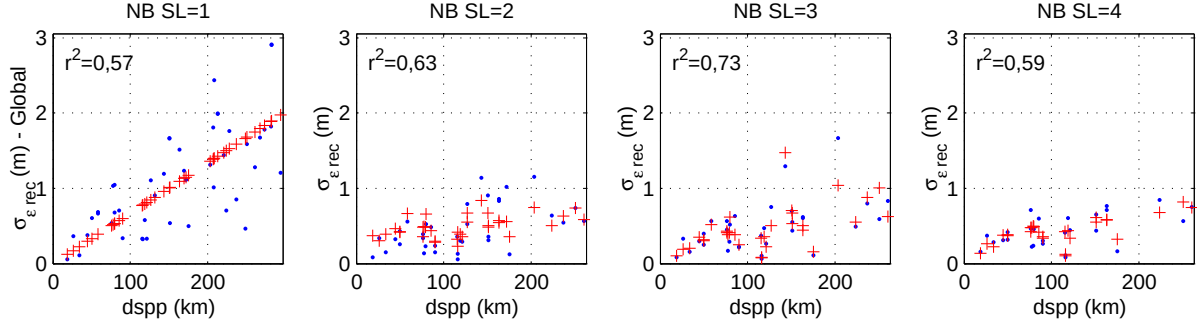


FIG. 6.7: Illustration des valeurs réelles (points bleus) et estimées (croix rouges) de l'indicateur $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ pour les stations limnimétriques de test retenues. Les différences entre valeurs estimées et valeurs réelles permettent de calculer les erreurs résiduelles $\varepsilon_{\mathcal{M}}$ des modèles quatre d'estimation (cf. table 6.5).

Synthèse sur la modélisation et l'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

Au vu de la qualité moyenne des modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ qu'il a été possible de construire, l'exploitation de ces modèles peut engendrer des sous-estimations ou des surestimations des valeurs de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ d'amplitudes plus ou moins importantes. Toutefois l'approche statistique sur un grand nombre de stations virtuelles permettra de moyenner ces erreurs d'estimation.

Nous en tirons la double conclusion (1) qu'il est préférable, dans la mesure du possible, de définir des stations virtuelles utilisant au moins deux stations limnimétriques pour reconstituer les valeurs in-situ ; (2) que les modèles, bien que de qualité moyenne, sont satisfaisants pour notre application : (i) leur application sur les stations virtuelles réduira les erreurs par rapport aux stations limnimétriques de test, (ii) la dispersion par rapport à ces modèles est compensée par leur mise en œuvre sur un grand nombre de stations virtuelles.

Calcul de l'estimateur $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ aux stations virtuelles

A partir des valeurs des déterminants géophysiques caractérisant nos stations virtuelles, nous avons pu estimer les valeurs de l'écart-type de l'erreur de reconstitution par le calcul de son estimateur $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$. Ainsi, pour la $n^{\text{ème}}$ station virtuelle, nous avons :

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}(n) = \mathcal{M}(\theta(n)) \quad (6.11)$$

La table 6.7 (section 6.3.6.1) présente les résultats de quantification de l'estimateur $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ issus des quatre modèles d'estimation (dont les paramètres sont listés à la table 6.5) pour les 77 stations virtuelles du bassin amazonien définies sur la première orbite de Topex/Poseidon.

Possibles invalidités des valeurs de l'estimateur $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$

Nous pouvons rencontrer plusieurs types de problèmes lors du calcul des valeurs de l'indicateur final des mesures altimétriques $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$.

L'équation (6.2) pose :

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}^2 = \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}}^2$$

Nous devons donc *a priori* respecter la condition

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}} \leq [\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6.12)$$

qui nous amènera à accepter ou rejeter la valeur de l'estimateur $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$.

Ainsi, selon les valeurs des estimateurs $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ et de l'écart-type de l'erreur approximée des mesures altimétriques $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$, nous pouvons dire que :

1. dans le cas d'une sous-estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$, nous imputerons à tort une part d'erreur aux mesures altimétriques dans le calcul de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$,
2. dans le cas d'une surestimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$, avec $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}} \leq [\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}}^2]^{\frac{1}{2}}$, nous sous-estimerons l'erreur des mesures altimétriques dans le calcul de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$,
3. dans le cas d'une surestimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$, avec $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}} > [\sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}}^2]^{\frac{1}{2}}$, nous ne serons pas en mesure de calculer $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ et nous écarterons la station virtuelle correspondante de notre processus d'estimation de la qualité.

Ces considérations nous ont amené à définir des conditions de rejets des estimations de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$: la section 6.4.2.1 définit ces conditions qui sont appliquées lors du calcul des indicateurs de précision finaux des mesures altimétriques.

Toutefois, le fait d'estimer $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ sur un grand nombre de stations virtuelles (par exemple 77 pour les produits altimétriques issus de la mission Topex/Poseidon) nous amène, d'un point de vue statistique, à considérer que l'effet conjugué des sous-estimations et des surestimations permet de minimiser la dérive globale des estimations de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$.

Une rapide analyse des quatre modèles d'estimation, basée sur les stations limnimétriques de test, nous permet de valider cette hypothèse et montre¹⁰ que dans 51% des cas, la valeur de l'erreur d'estimation $\epsilon_{\mathcal{M}}$ est de signe négatif (sous-estimation), et de signe positif dans 49% des autres cas (surestimation).

6.3.6 Synthèse sur la modélisation et l'estimation des indicateurs de précision

La méthode proposée dans cette étape 5 permet l'estimation et la modélisation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ aux stations virtuelles, quelle que soit la méthode de reconstitution employée : elle repose sur la quantification de l'erreur de reconstitution sur des stations limnimétriques de test, sur le choix de déterminants géophysiques permettant d'expliquer la variabilité de ces indicateurs et sur la construction de modèles multivariés d'estimation de ces indicateurs.

La figure 6.9 présente un schéma synthétisant le déroulement des opérations et le cheminement des données nécessaires à l'étape 5 de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques.

D'autres approches plus fines seraient possibles, notamment par la définition d'autres déterminants géophysiques qui nécessiterait l'intégration de sources de données très variées, dépassant largement le cadre de cette thèse.

Enfin, il est important de souligner que la classification sous la forme de trois périodes hydrologiques de l'ensemble des mesures altimétriques et in-situ (mesurées ou reconstituées) pour la construction des seize modèles d'estimations¹¹ permet dans un second temps de travailler à une échelle « saisonnière » (au sens hydrologique).

¹⁰Voir également les histogrammes de la figure 6.6

¹¹Voir en section 6.3.6.2 pour un descriptif des douze modèles d'estimations construits pour les trois périodes hydrologiques.

6.3.6.1 Résultats de quantification de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ aux stations virtuelles

La table 6.7 ci-après présente les résultats de quantification des indicateurs de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ aux stations virtuelles que nous avons traitées dans le cadre de cette thèse. Un descriptif complet de ces stations virtuelles est présenté en annexe A.

Nota : La dernière colonne fournissant les valeurs de $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ est donnée à titre purement informatif. Nous avons en effet vu à la section 6.3.5.1 que les modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ ne sont pas suffisamment fiables pour notre application : la valeur de $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ n'est pas utilisée dans les calculs ultérieurs.

Station virtuelle	Nb SL	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)
Stations virtuelles sur l'orbite de Topex/Poseidon (produit alti-hydrologique « CASH »)							
TP-CASH-063A-Negro	2	6,1	8,7	1545,6	0,19	0,22	0,27
TP-CASH-063A-Solimoes	4	51,2	128,6	1562,7	0,38	0,25	0,18
TP-CASH-076A-Demini	1	139,6	139,6	2142,4	1,00	0,94	-6,62
TP-CASH-076A-Negro	4	30,1	146,9	1972,8	1,51	0,35	0,22
TP-CASH-076A-Solimoes	4	51,9	96,4	1786,1	0,41	0,34	0,18
TP-CASH-139A-Amazon	4	22,8	154,8	1106,9	1,02	0,13	0,16
TP-CASH-152A-Amazon	4	72,9	227,0	1438,6	1,03	0,21	0,22
TP-CASH-228A-Amazon	4	25,6	146,6	1058,5	0,50	0,09	0,15
TP-CASH-241A-Branco	3	109,4	154,0	1985,3	1,80	0,51	0,30
TP-CASH-241A-Negro	4	60,2	165,5	1899,7	1,51	0,39	0,23
Stations virtuelles sur l'orbite de ERS-2 et ENVISAT (produits alti-hydrologiques « River & Lake Hydrology »)							
ERS-0893A-Amazone	4	18,2	122,4	927,0	0,50	0,08	0,13
ERS-0850A-Amazone	4	64,4	168,1	1019,8	0,50	0,15	0,16
ERS-0435A-Amazone	1	0,9	0,9	1085,0	1,00	0,01	-0,04
ERS-0392A-Amazone	4	46,2	190,6	1130,4	1,02	0,14	0,18
ERS-0392B-Amazone	4	46,2	190,6	1130,4	1,02	0,14	0,18
ERS-0392C-Amazone	4	46,2	190,6	1130,4	1,02	0,14	0,18
ERS-0979A-Amazone	4	110,4	251,8	1194,6	1,02	0,24	0,22
ERS-0936A-Amazone	4	179,0	276,2	1263,1	1,03	0,40	0,24
ERS-0521A-Amazone	4	206,4	277,8	1290,5	1,03	0,47	0,24
ERS-0063_0478A-Amazone	4	106,5	249,3	1405,0	1,03	0,27	0,23
ERS-0020A-Amazone	4	26,0	172,6	1485,5	1,03	0,17	0,20
ERS-0020B-Amazone	4	26,0	172,6	1485,5	1,03	0,17	0,20
ERS-0607A-Amazone	4	17,3	154,8	1494,2	1,03	0,18	0,19
ERS-00149_0564A-Solimoes	4	45,1	123,6	1587,5	0,38	0,25	0,18
ERS-0693A-Solimoes	4	42,5	85,6	1675,1	0,37	0,31	0,17
ERS-0106A-Solimoes	4	32,5	83,8	1690,1	0,37	0,28	0,17
ERS-0235A-Solimoes	4	41,6	93,9	1764,2	0,41	0,31	0,18
ERS-0650A-Solimoes	4	36,5	93,2	1801,5	0,41	0,30	0,18
ERS-0650B-Solimoes	4	30,2	90,5	1807,8	0,41	0,29	0,18
ERS-0779A-Solimoes	4	25,4	101,5	1863,4	0,59	0,29	0,19
ERS-0779B-Solimoes	4	20,3	96,8	1858,3	0,59	0,28	0,19
ERS-0192A-Solimoes	4	51,1	113,9	1889,1	0,59	0,35	0,20
ERS-0321A-Solimoes	4	1,2	52,5	1955,6	0,59	0,31	0,18
ERS-0321B-Solimoes	4	0,8	46,8	1957,6	0,54	0,31	0,17
ERS-0736A-Solimoes	4	37,2	148,4	1994,0	0,54	0,27	0,23
ERS-0865A-Solimoes	4	96,1	179,0	2053,0	0,54	0,40	0,25
ERS-0278A-Solimoes	4	100,5	181,6	2080,4	0,54	0,41	0,25
ERS-0407_0822A-Solimoes	4	11,0	120,5	2169,9	0,54	0,27	0,23
ERS-0364A-Solimoes	4	75,8	231,4	2256,7	1,28	0,38	0,29
ERS-0951A-Solimoes	4	122,1	247,0	2302,9	1,28	0,48	0,30
ERS-0951B-Solimoes	4	89,1	244,0	2352,6	1,28	0,41	0,30
ERS-0908A-Solimoes	4	33,6	206,8	2408,1	1,28	0,32	0,29
ERS-0493A-Solimoes	4	3,2	119,1	2438,4	1,28	0,37	0,25
ERS-0493B-Solimoes	4	0,0	0,0	2441,7	1,08	0,51	0,19
ERS-0450A-Solimoes	4	69,1	285,0	2510,8	1,08	0,31	0,34
ERS-0035A-Solimoes	4	158,0	338,8	2599,7	1,08	0,48	0,37
ERS-0994A-Solimoes	4	235,7	353,3	2677,3	1,08	0,68	0,38
ERS-0579A-Solimoes	4	218,6	351,8	2719,3	1,08	0,64	0,38

Station virtuelle	Nb SL	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)
ERS-0536A-Solimoies	4	128,3	325,6	2809,6	1,08	0,46	0,38
ERS-0121_0536A-Solimoies	4	98,7	308,1	2839,3	1,08	0,41	0,37
ERS-0665A-Solimoies	3	6,4	92,2	2944,4	0,54	0,14	0,13
ERS-0078A-Solimoies	3	13,1	116,6	2951,1	0,54	0,18	0,15
ERS-0207A-Solimoies	3	119,3	212,6	3057,2	0,54	0,49	0,23
ERS-0207B-Solimoies	3	92,9	212,1	3095,2	0,54	0,43	0,23
ERS-0564A-Negro	1	17,2	17,2	1575,2	1,00	0,12	-0,82
ERS-0149A-Negro	4	29,1	123,2	1587,1	1,27	0,29	0,18
ERS-0106A-Negro	4	107,0	176,4	1665,0	1,27	0,44	0,22
ERS-0693A-Negro	4	107,8	182,8	1731,6	1,27	0,44	0,22
ERS-0650A-Negro	4	86,4	178,6	1753,0	1,27	0,39	0,22
ERS-0192A-Negro	4	40,1	159,5	1879,5	1,51	0,34	0,22
ERS-0235A-Negro	4	60,4	169,4	1899,9	1,51	0,39	0,23
ERS-0736A-Negro	4	42,9	161,4	1960,0	1,51	0,36	0,23
ERS-0779A-Negro	3	4,6	60,0	2007,5	0,75	0,10	0,12
ERS-0278A-Negro	3	53,0	138,3	2055,8	0,75	0,26	0,19
ERS-0321A-Negro	3	122,7	178,2	2125,6	0,75	0,38	0,22
ERS-0822A-Negro	3	137,0	182,1	2139,8	0,75	0,41	0,22
ERS-0865A-Negro	4	44,2	121,3	2208,6	0,77	0,39	0,23
ERS-0364A-Negro	4	24,2	97,5	2228,6	0,77	0,37	0,22
ERS-0407A-Negro	3	13,1	94,0	2299,7	0,51	0,14	0,13
ERS-0908A-Negro	3	35,3	129,3	2322,0	0,51	0,22	0,16
ERS-0607A-Madeira	4	34,0	70,5	1510,1	1,07	0,35	0,15
ERS-0020A-Madeira	4	15,6	63,3	1571,1	0,94	0,30	0,15
ERS-0149A-Madeira	4	34,4	71,6	1618,8	0,94	0,35	0,16
ERS-0693A-Madeira	4	19,4	79,1	1722,7	1,05	0,33	0,17
ERS-0564A-Madeira	4	38,6	93,7	1741,9	1,05	0,36	0,18
ERS-0235A-Madeira	4	32,3	93,8	1823,1	1,05	0,36	0,19
ERS-0106A-Madeira	3	29,7	66,9	1885,1	0,67	0,27	0,12
ERS-0779A-Madeira	4	0,7	44,2	1940,0	0,67	0,33	0,17
ERS-0321_0650A-Madeira	3	115,0	153,1	2055,7	0,93	0,43	0,22
ERS-0321A-Madeira	3	131,9	158,5	2072,6	0,93	0,47	0,22
ERS-0650A-Madeira	3	125,4	161,5	2086,2	0,93	0,45	0,22
ERS-0865A-Madeira	3	27,9	123,3	2183,7	0,93	0,22	0,19
ERS-0407A-Madeira	3	96,7	175,4	2363,4	0,48	0,33	0,19
ERS-0192A-Madeira	3	80,5	168,1	2379,6	0,48	0,30	0,18
ERS-0192B-Madeira	3	59,3	154,7	2400,8	0,48	0,27	0,17
ERS-0192C-Madeira	3	54,4	150,9	2405,7	0,48	0,26	0,17
ERS-0951A-Madeira	3	21,7	113,5	2481,8	0,64	0,21	0,16
ERS-0736A-Madeira	3	67,7	163,2	2527,8	0,64	0,34	0,20
ERS-0493A-Madeira	3	103,3	182,6	2563,4	0,64	0,42	0,21
ERS-0235A-Purus	4	20,1	64,1	1798,7	0,58	0,32	0,17
ERS-0650A-Purus	3	13,3	45,7	1859,2	0,57	0,21	0,09
ERS-0650B-Purus	3	7,9	38,4	1864,5	0,57	0,17	0,09
ERS-0650C-Purus	4	0,9	35,8	1871,5	0,58	0,32	0,16
ERS-0779A-Purus	4	13,0	91,3	1935,5	0,56	0,28	0,19
ERS-0192_0321A-Purus	4	36,9	134,4	2081,2	1,18	0,37	0,23
ERS-0192_0321B-Purus	4	29,0	128,8	2089,2	1,18	0,36	0,22
ERS-0192A-Purus	4	19,8	119,2	2098,4	1,18	0,35	0,22
ERS-0321A-Purus	4	13,8	110,2	2104,4	1,18	0,35	0,22
ERS-0865A-Purus	3	50,3	179,5	2349,7	1,80	0,34	0,32
ERS-0736A-Purus	3	16,5	128,4	2416,6	2,24	0,25	0,33
ERS-0736B-Purus	3	27,1	151,9	2427,1	2,24	0,30	0,34
ERS-0736C-Purus	3	33,6	163,5	2433,7	2,24	0,33	0,35
ERS-0407A-Purus	4	129,7	306,6	2529,7	2,24	0,55	0,35
Stations virtuelles sur l'orbite de Topex/Poseidon (produits altimétriques AVISO et CLS)							
TP-013A-Javari	3	220,2	327,2	3657,7	1,97	1,10	0,46
TP-026A-Javari	3	64,9	286,6	3922,9	1,97	0,61	0,43
TP-026A-Jurua	3	38,8	293,7	4678,6	1,66	0,51	0,40
TP-063A-Guapore	4	94,7	260,3	3375,4	1,61	0,60	0,39
TP-063A-Madeira	4	51,1	124,3	1754,4	1,08	0,36	0,20
TP-063A-Negro	2	6,2	8,7	1545,7	0,19	0,22	0,27
TP-063A-Solimoies	4	49,7	128,6	1561,2	0,38	0,25	0,18

Station virtuelle	Nb SL	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)
TP-063B-Madeira	4	61,4	129,1	1764,7	1,08	0,38	0,20
TP-063B-Solimoes	4	53,0	128,7	1564,5	0,38	0,26	0,18
TP-063C-Madeira	4	75,7	133,2	1779,0	1,08	0,41	0,20
TP-076A-Madeira	4	39,5	130,1	1815,9	1,08	0,33	0,20
TP-076A-Negro	4	30,0	146,8	1972,8	1,51	0,35	0,22
TP-076A-Purus	4	38,7	65,2	1817,3	0,57	0,37	0,17
TP-076A-Solimoes	4	51,8	96,4	1786,1	0,41	0,34	0,18
TP-089A-Ica	3	72,3	166,0	2867,3	2,14	0,67	0,35
TP-089A-Japura	4	161,1	265,4	2712,9	0,79	0,58	0,34
TP-089A-Solimoes	4	45,8	159,2	2892,2	0,63	0,44	0,30
TP-089A-Tarauca	4	36,2	187,7	4092,1	2,46	0,75	0,41
TP-089B-Jurua	4	72,7	370,4	4007,1	1,00	0,44	0,49
TP-089B-Tarauca	4	39,3	190,0	4095,2	2,46	0,76	0,41
TP-089C-Negro	1	62,4	62,4	2729,6	1,00	0,42	2,96
TP-089C-Tarauca	4	48,7	168,0	4215,9	2,46	0,83	0,41
TP-089D-Negro	1	4,8	4,8	2796,8	1,00	0,03	-0,23
TP-089F-Tarauca	4	53,3	159,0	4317,9	1,75	0,80	0,41
TP-089G-Tarauca	4	77,8	165,7	4394,1	1,75	0,87	0,42
TP-089I-Tarauca	4	56,4	157,2	4415,5	1,75	0,83	0,41
TP-102A-Jurua	4	191,0	438,6	3888,8	1,00	0,63	0,52
TP-102A-Purus	4	74,4	219,0	4127,6	1,37	0,71	0,42
TP-102A-Solimoes	4	12,4	131,6	3175,7	0,55	0,43	0,31
TP-102B-Solimoes	4	31,2	233,1	3219,3	0,55	0,34	0,36
TP-139_254A-Guapore	4	22,8	174,7	3815,2	0,48	0,49	0,38
TP-139A-Amazone	4	22,8	154,8	1106,9	1,02	0,13	0,16
TP-152A-Amazone	4	72,9	227,0	1438,6	1,03	0,21	0,22
TP-152A-Branco	1	89,3	89,3	2315,3	1,00	0,60	4,24
TP-152A-Madeira	4	33,9	79,6	1432,4	1,13	0,33	0,15
TP-152B-Branco	1	54,2	54,2	2590,2	1,00	0,36	-2,57
TP-165A-Japura	4	59,6	177,7	2365,4	1,57	0,45	0,27
TP-165A-Negro	4	20,6	100,3	2232,1	0,77	0,36	0,22
TP-165A-Purus	4	80,6	225,3	3989,7	1,37	0,69	0,42
TP-165A-Solimoes	4	97,3	228,6	2344,4	1,28	0,45	0,29
TP-165B-Solimoes	4	97,3	228,6	2344,4	1,28	0,45	0,29
TP-165C-Solimoes	4	97,3	228,6	2344,4	1,28	0,45	0,29
TP-178A-Guapore	4	32,8	240,6	3252,3	1,61	0,45	0,37
TP-178A-Japura	4	181,8	276,6	2741,4	0,79	0,63	0,35
TP-178A-Jurua	4	65,8	339,4	3093,7	1,56	0,36	0,41
TP-178A-Jutai	4	12,2	123,3	2756,1	0,86	0,40	0,27
TP-178A-Madeira	1	32,0	32,0	2698,8	1,00	0,21	1,52
TP-178A-Purus	4	241,6	390,3	3394,0	2,04	0,86	0,46
TP-178A-Solimoes	4	38,0	188,1	2749,0	0,76	0,37	0,30
TP-178A-Uaupes	3	56,9	113,1	2844,5	0,50	0,45	0,14
TP-178C-Jutai	4	29,8	153,7	2773,7	0,86	0,41	0,29
TP-178D-Jutai	4	34,9	159,6	2778,9	0,86	0,41	0,29
TP-178F-Jutai	4	57,8	178,7	2801,7	0,86	0,45	0,30
TP-228A-Amazone	4	25,6	146,6	1058,5	0,50	0,09	0,15
TP-241A-Branco	1	2,5	2,5	2407,1	1,00	0,02	-0,12
TP-241A-Madeira	1	54,0	54,0	2784,9	1,00	0,36	-2,56
TP-241A-Negro	4	60,3	165,5	1899,7	1,51	0,39	0,23
TP-241A-Solimoes	4	10,9	109,3	1967,7	0,54	0,25	0,20
TP-241B-Branco	1	46,1	46,1	2450,6	1,00	0,31	-2,19
TP-241B-Madeira	1	91,6	91,6	2822,5	1,00	0,61	-4,35
TP-241B-Purus	4	42,9	242,0	2443,0	2,24	0,40	0,31
TP-241C-Branco	3	109,4	154,0	1985,4	1,80	0,51	0,30
TP-241C-Purus	4	51,9	253,2	2452,0	2,24	0,41	0,31
TP-241C-Solimoes	4	10,9	109,3	1967,7	0,54	0,25	0,20
TP-241D-Purus	4	63,7	265,4	2463,7	2,24	0,42	0,32
TP-254A-Madeira	4	86,2	216,8	2297,8	0,46	0,35	0,28
TP-254A-Purus	4	96,1	290,1	2496,1	2,24	0,48	0,34
TP-254A-Solimoes	4	0,3	57,7	2180,5	0,71	0,35	0,19
TP-254B-Japura	4	35,1	193,0	2239,5	1,57	0,35	0,27
TP-254B-Purus	4	112,3	299,0	2512,3	2,24	0,51	0,34

Station virtuelle	Nb SL	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)
TP-254B-Solimoies	4	13,2	146,5	2194,1	1,28	0,32	0,24
TP-254C-Japura	4	45,7	200,7	2250,2	1,57	0,37	0,27
TP-254C-Solimoies	4	21,6	165,0	2202,4	1,28	0,32	0,25
TP-254D-Japura	4	64,0	207,6	2268,4	1,57	0,41	0,28
TP-254E-Japura	4	86,5	209,1	2291,0	1,57	0,47	0,28
TP-254F-Japura	4	90,4	196,9	2334,6	1,57	0,50	0,28
TP-254G-Japura	4	76,3	189,3	2348,7	1,57	0,48	0,27

TAB. 6.7: Exemple de valeurs de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ estimées à partir de quatre modèles d'estimation (cf. table 6.5) pour les 77 stations virtuelles définies sur la première orbite de Topex/Poseidon. Les valeurs présentées correspondent uniquement à la période hydrologique « globale », elles sont caractérisées par une valeur moyenne de 0,37m et un écart-type de 0,28m.

Répartition des configurations de reconstitution : 14 ont été reconstituées avec 1 station limnimétrique ; aucune avec 2 stations limnimétriques ; 32 avec 3 stations limnimétriques et 135 avec 4 stations limnimétriques.

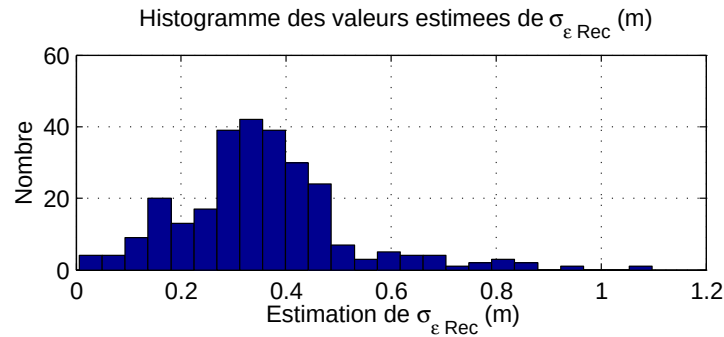


FIG. 6.8: Histogramme des valeurs de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ estimées pour les stations virtuelles.

6.3.6.2 Modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ dédiés aux trois périodes hydrologiques

Le travail de modélisation des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution ($\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$) présenté aux sections 6.3.5.1 et 6.3.5.2 a été transposé à l'estimation des mêmes indicateurs pour chacune des trois périodes hydrologiques hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux introduites au chapitre 5.

La table 6.8 présente les coefficients des modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ dédiés aux trois périodes hydrologiques.

La table 6.9 présente les coefficients des modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ dédiés aux trois périodes hydrologiques.

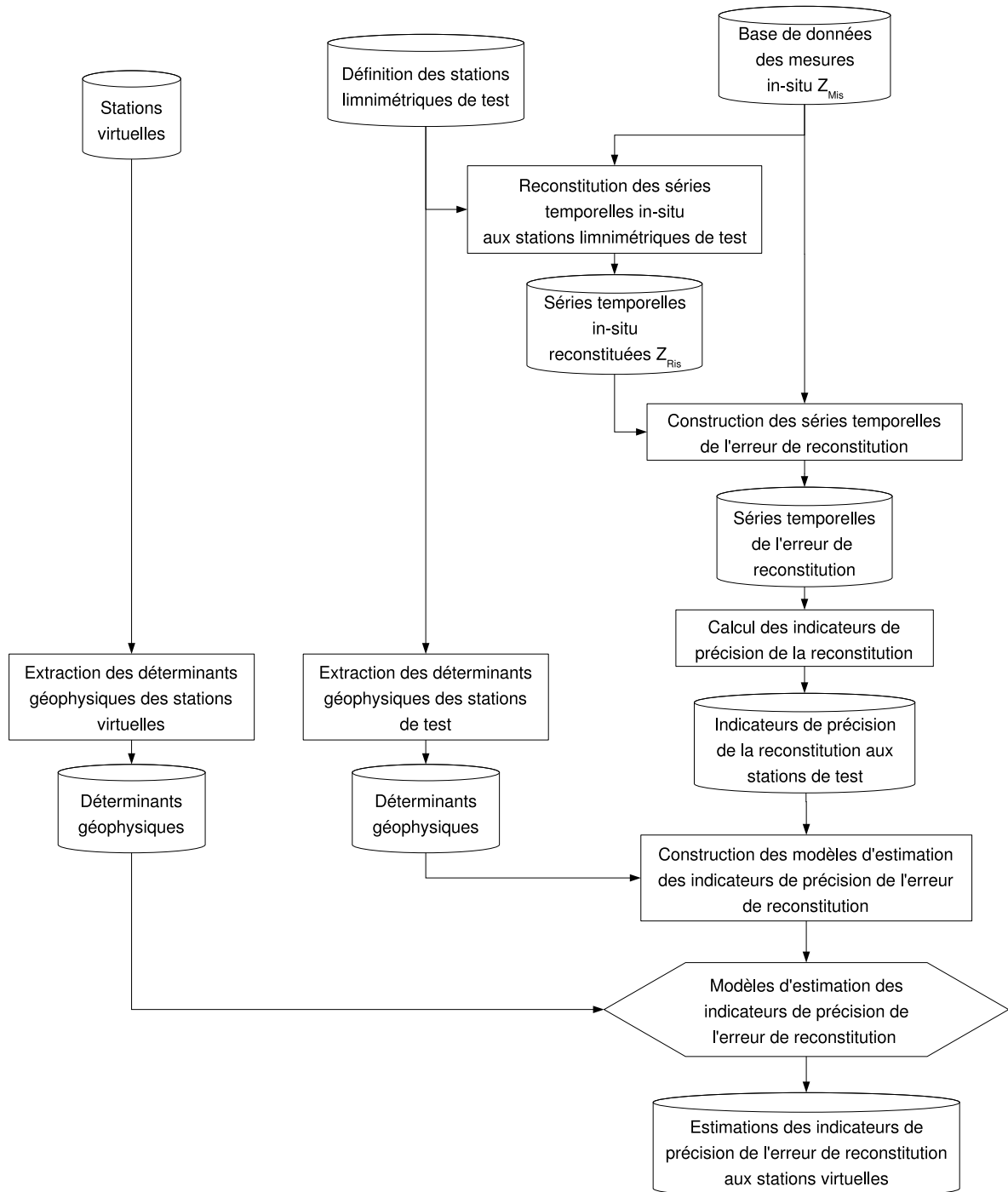


FIG. 6.9: Schéma détaillé de l'étape 5 de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques. L'estimation des indicateurs de précision de reconstitution se déroule en 2 phases parallèles comme l'illustre cette figure : les modèles multivariés sont construits à partir de l'erreur de reconstitution issue des stations limnimétriques de test et de leurs déterminants géophysiques. Les modèles sont ensuite employés en production pour estimer l'écart-type de l'erreur imputable à la méthode de reconstitution des séries temporelles in-situ. Enfin, cette erreur est retranchée par différence quadratique (cf. équation 6.18).

Coefficients des modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ pour les trois périodes hydrologiques								
Modèle	Nb VS	Type	a_0 (dspp)	a_1 (mgd)	a_2 (acurv)	a_3 (etdn)	a_4 modèles	r^2
Hautes eaux								
$\mathcal{M}_{1HE\mu}(\theta)$	66	lin.	-	0.045529	-	-	-	0.74
$\mathcal{M}_{2HE\mu}(\theta)$	35	lin.	-	-	0.002683	0.000199	-	0.45
$\mathcal{M}_{3HE\mu}(\theta)$	33	lin.	-	-	0.000991	-	0.132408	0.25
$\mathcal{M}_{4HE\mu}(\theta)$	27	lin.	-	-	0.000568	0.000079	-	0.27
Moyennes eaux								
$\mathcal{M}_{1ME\mu}(\theta)$	66	lin.	-	0.047446	-	-	-	0.74
$\mathcal{M}_{2ME\mu}(\theta)$	35	lin.	-	-	0.002644	0.000147	0.061142	0.48
$\mathcal{M}_{3ME\mu}(\theta)$	33	lin.	-	-	0.000712	-	0.132405	0.20
$\mathcal{M}_{4ME\mu}(\theta)$	27	lin.	-	-	0.000424	0.000091	-	0.25
Basses eaux								
$\mathcal{M}_{1BE\mu}(\theta)$	66	lin.	-	0.049410	-	-	-	0.73
$\mathcal{M}_{2BE\mu}(\theta)$	35	lin.	-	-	0.003235	0.000113	-	0.42
$\mathcal{M}_{3BE\mu}(\theta)$	33	lin.	-	-	0.000711	-	0.033836	0.07
$\mathcal{M}_{4BE\mu}(\theta)$	27	lin.	-	-	0.000516	0.000058	-	0.24
Les coefficients a_0 à a_4 sont donnés pour les modèles linéaires de la forme :								
$\mathcal{M}(\theta) = \theta.A = a_1.\theta_1 + a_2.\theta_2 + a_3.\theta_3 + a_4.\theta_4$								
Le symbole « - » signifie que la variable est inutilisée/rejetée par l'optimisation du modèle.								

TAB. 6.8: Table récapitulative des paramètres et des coefficients r^2 obtenus pour les douze modèles d'estimation de l'indicateur de précision $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$. Un modèle a été créé pour chacune des trois périodes hydrologiques (hautes, moyennes et basses eaux) et par technique de reconstitution. Unité des coefficients : a_1 et a_2 en (m/km); à a_3 en (km) et a_4 en (m). Notations des modèles : $\mathcal{M}_{2ME\mu}(\theta)$ signifie « modèle d'estimation pour la technique de reconstitution basée sur 2 stations limnimétriques amont et aval, pour la période de moyennes eaux ».

Coefficients des modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ pour les trois périodes hydrologiques								
Modèle	Type	a_0	a_1 (dspp)	a_2 (mgd)	a_3 (acurv)	a_4 (etdn)	a_4 modèles	r^2
Hautes eaux								
$\mathcal{M}_{1HE\sigma}(\theta)$	66	log-lin.	-11,734459	0,869839	0,873343	-	-	0,58
$\mathcal{M}_{2HE\sigma}(\theta)$	35	log-lin.	-12,017949	-	-	1,323714	0,776567	0,66
$\mathcal{M}_{3HE\sigma}(\theta)$	33	log-lin.	-12,593842	-	-0,042071	1,441354	0,742605	0,74
$\mathcal{M}_{4HE\sigma}(\theta)$	27	log-lin.	-10,442903	-	-	1,142830	0,505999	0,72
Moyennes eaux								
$\mathcal{M}_{1ME\sigma}(\theta)$	66	lin.	-	0,006661	-	-	-	0,51
$\mathcal{M}_{2ME\sigma}(\theta)$	35	lin.	-	-	-	0,000113	0,137918	0,54
$\mathcal{M}_{3ME\sigma}(\theta)$	33	log-lin.	-10,594465	0,741929	-0,934270	1,429141	0,420651	0,67
$\mathcal{M}_{4ME\sigma}(\theta)$	27	lin.	-	0,002170	-0,001165	0,000165	0,095420	0,47
Basses eaux								
$\mathcal{M}_{1BE\sigma}(\theta)$	66	log-lin.	-3,796178	0,682632	-	-	-	0,26
$\mathcal{M}_{2BE\sigma}(\theta)$	35	lin.	-	0,000932	-	0,000098	0,104542	0,35
$\mathcal{M}_{3BE\sigma}(\theta)$	33	lin.	-	0,003002	-0,002132	0,000203	0,103251	0,36
$\mathcal{M}_{4BE\sigma}(\theta)$	27	lin.	-	0,003963	-0,001716	0,000214	-	0,48
Les coefficients a_0 à a_4 sont donnés pour les formes suivantes des modèles :								
- Linéaire : $\mathcal{M}(\theta) = \theta.A = a_1.\theta_1 + a_2.\theta_2 + a_3.\theta_3 + a_4.\theta_4$								
- Log-linéaire : $\ln(\mathcal{M}(\theta)) = \ln(\theta).A = a_0 + a_1.\ln(\theta_1) + a_2.\ln(\theta_2) + a_3.\ln(\theta_3) + a_4.\ln(\theta_4)$								

TAB. 6.9: Table récapitulative des paramètres et des coefficients r^2 obtenus pour les douze modèles d'estimation de l'indicateur de précision $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$. Un modèle a été créé pour chacune des trois périodes hydrologiques (hautes, moyennes et basses eaux) et par technique de reconstitution. Unité des coefficients : a_1 et a_2 en (m/km); à a_3 en (km) et a_4 en (m). Notations des modèles : $\mathcal{M}_{2ME\mu}(\theta)$ signifie « modèle d'estimation pour la technique de reconstitution basée sur 2 stations limnimétriques amont et aval, pour la période de moyennes eaux ».

6.4 Étape 6 : Estimation des indicateurs de précision finaux des mesures altimétriques

Nous avons vu au cours de ce chapitre 6 que plusieurs limitations nous empêchent de pouvoir estimer l'erreur moyenne des mesures altimétriques ($\mu_{\varepsilon_{Sat}}$).

- Premièrement, les stations limnimétriques des grands fleuves du bassin amazonien sur lesquels nous appliquons cette méthode ne sont pas nivelées en haute précision¹², ce qui présente une première difficulté pour quantifier l'erreur moyenne des mesures in-situ $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$.
- Deuxièmement, la méthode de reconstitution des valeurs in-situ introduit une erreur de reconstitution dont nous ne sommes pas en mesure pour le moment d'estimer correctement la moyenne $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$.

Puisque la quantification de l'erreur moyenne des mesures altimétriques dépend mathématiquement de ces deux termes $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ (cf. équation (4.19)), nous ne sommes pas en mesure de quantifier la précision absolue des mesures altimétriques et nous nous consacrons uniquement à la quantification de l'erreur relative sur les fleuves.

Dans la section 6.4.1 suivante, nous proposons une adaptation de la méthode permettant de quantifier la « précision relative » des séries temporelles alti-hydrologiques. Cette méthode se base sur l'estimation la plus réaliste possible du biais systématique existant entre une série temporelle alti-hydrologique et une série temporelle in-situ reconstituée. L'expérience montre que ce biais systématique est dans la plupart des cas facilement identifiable pendant la période des hautes eaux : nous avons donc défini un « estimateur du biais systématique de hautes eaux » et une méthode permettant de le quantifier.

6.4.1 Précision relative : Estimation et annulation du biais systématique de hautes eaux

6.4.1.1 Pourquoi corriger le biais systématique de hautes eaux ?

Nous avons présenté à la section 1.3, quelques études consacrées à l'étude de la précision absolue des mesures d'altimétrie radar sur les plans d'eau par comparaison directe entre ces mesures et les mesures in-situ de rivières [Kosuth et al., 2006], [Birkett et al., 2002] et de lacs [Morris et Gill, 1994b] (mesures de GeoSAT sur le lac Tchad), [Coe et Birkett, 2005] (mesures de Topex/Poseidon sur le lac Tchad) et [Créaux et Birkett, 2006] (mesures de Topex/Poseidon sur quelques grands lacs nord-américains et africains). De telles configurations où l'on dispose de mesures in-situ à proximité immédiate de la trace du satellite s'avèrent extrêmement rares pour les cours d'eau.

De plus, ces comparaisons directes mettent le plus souvent en lumière un biais systématique entre série temporelle altimétrique et série temporelle mesurée in-situ (cf. figure 6.10). Ces biais systématiques (cf. § 4.2.1) proviennent non seulement d'erreurs systématiques dans le calcul des séries temporelles altimétriques (positionnement du satellite (orbite), algorithme de tracking/retracking, corrections du range, modèle de géoïde), mais également d'erreurs possibles dans le nivellement des stations limnimétriques in-situ.

Il en résulte une grande difficulté à quantifier la précision absolue des mesures altimétriques sur les cours d'eau¹³, ce qui nous oblige dans l'état actuel de la métrologie à travailler sur la quantification de la précision relative et pour cela, à estimer puis retrancher, sans chercher à l'imputer aux unes ou aux autres, le biais systématique entre séries temporelles altimétriques et séries temporelles in-situ reconstituées.

¹²Le seul nivellement disponible s'appuie sur l'altimétrie radar [Kosuth et al., 2006] et de ce fait ne représente pas une référence indépendante.

¹³Pour traiter correctement ce problème, il serait nécessaire d'implanter un nombre significatif de stations limnimétriques de référence sous les traces des satellites, dotées à la fois d'un nivellement géodésique de haute précision et de surfaces en eau suffisamment grandes pour que la mesure altimétrique soit interprétable.

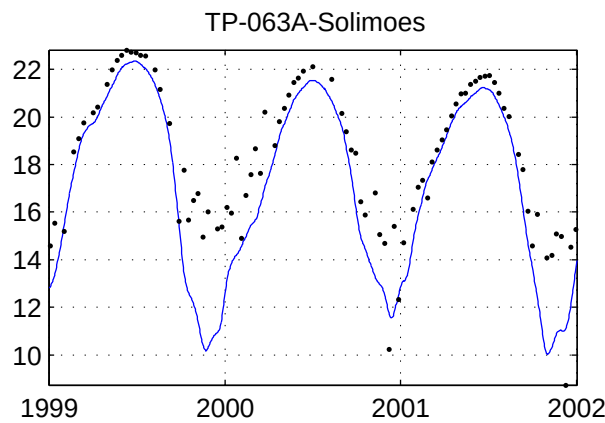


FIG. 6.10: Illustration du biais systématique entre une série temporelle alti-hydrologique (trace 63 de Topex/Poseidon) et une série temporelle mesurée in-situ (Manaus) à la confluence entre les fleuve Solimões et Negro.

Origines du biais systématique entre les mesures altimétriques et les mesures in-situ

Les erreurs systématiques (ou biais systématiques) des mesures altimétriques, des mesures in-situ reconstituées et des mesures in-situ sont issues de sources très variées que nous avons identifiées et regroupées en trois groupes : elles peuvent être liées aux spécificités des missions et produits altimétriques (notées SAT), des données in-situ (notées IS) et de la Méthode de Reconstitution des Séries Temporelles In-Situ (notées REC) :

SAT Les plus « anciennes » missions altimétriques sont connues pour avoir des orbites moins précises que les missions les plus récentes, ce qui génère localement des biais systématiques.

SAT L'algorithme de tracking/retracking utilisé peut amener à des biais systématiques, par exemple dans le cas d'un relief environnant prononcé.

SAT Selon les produits altimétriques, certaines corrections de célérité - notamment les corrections de troposphère sèche et humide - sont absentes ou imparfaites pour les surfaces émergées. L'absence des corrections troposphériques entraîne une sous-estimation systématique du niveau du plan d'eau.

SAT Le modèle de géoïde utilisé dans les produits alti-hydrologiques est une approximation de la réalité, il engendre nécessairement un biais local.

REC Comme nous l'avons vu précédemment, la méthode de reconstitution d'une série temporelle in-situ à la station virtuelle introduit un biais systématique qui contribue au biais global de l'erreur (par exemple l'interpolation linéaire entre deux stations limnimétriques entraîne une surestimation du niveau des eaux).

IS Le nivellement des stations limnimétriques in-situ n'est pas parfait et introduit un biais.

L'identification et la correction du biais systématique entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées va permettre de regrouper sous une même constante les diverses sources d'erreur systématiques, de les éliminer et d'obtenir des indicateurs de précision plus représentatifs des phénomènes inhérents au processus de mesure du niveau des cours d'eau par altimétrie satellitaire radar au cours du cycle hydrologique.

6.4.1.2 Méthode d'identification et de correction du biais systématique

Il est facile de mesurer, pour une grande majorité des stations virtuelles, que la corrélation entre mesures altimétriques et in-situ en période de hautes eaux est très bonne, voire excellente (cf fig. 5.10 ou

6.12, en haut à droite) alors qu'elle se dégrade fortement lorsque le niveau des eaux diminue (période de basses eaux). Ce phénomène s'explique, à mesure que le niveau de l'eau diminue, par la réduction de la surface en eau réfléchissante et l'apparition de surfaces émergées/humides perturbantes dans l'empreinte radar et par l'encaissement de la surface d'eau dans son lit.

Nous avons décidé de nous appuyer sur la corrélation des mesures altimétriques et in-situ en période de hautes eaux afin de quantifier et d'éliminer l'erreur moyenne constatée entre les deux types de mesures pendant cette période.

La méthode de correction du biais systématique constaté en période de hautes eaux s'appuie sur le découpage de la dynamique du niveau réel du cours d'eau, présenté au §5.4.3. Ce découpage permet de regrouper les mesures (altimétriques, in-situ ou d'erreur) en trois périodes hydrologiques (basses eaux, moyennes eaux et hautes eaux) et de les manipuler aisément. Nous l'utilisons ici de manière à calculer le niveau moyen des séries temporelles altimétrique Z_{Sat} et in-situ Z_{Ris} (aux mêmes dates) pour la période de hautes eaux, quantifier le biais systématique et corriger la série temporelle altimétrique.

Nous définissons le biais en période de hautes eaux $\Delta \overline{Z_{HE}}$ comme étant la différence des valeurs moyennes des deux séries temporelles Z_{Sat} et Z_{Ris} pendant cette période :

$$\Delta \overline{Z_{HE}} = \overline{Z_{SatHE}} - \overline{Z_{RisHE}} \quad (6.13)$$

avec :

$\overline{Z_{SatHE}}$ le niveau moyen de la série temporelle altimétrique Z_{Sat} en période de hautes eaux

$\overline{Z_{RisHE}}$ le niveau moyen de la série temporelle in-situ reconstituée Z_{Ris} aux mêmes dates en période de hautes eaux

Nous définissons la série temporelle alti-hydrologique corrigée (Z_{SatC}) :

$$\begin{aligned} Z_{SatC} &= Z_{Sat} - \Delta \overline{Z_{HE}} \\ &= Z_{Sat} - (\overline{Z_{SatHE}} - \overline{Z_{RisHE}}) \end{aligned} \quad (6.14)$$

On vérifie que :

$$\begin{aligned} \overline{Z_{SatCHE}} &= \overline{Z_{SatHE}} - (\overline{Z_{SatHE}} - \overline{Z_{RisHE}}) \\ &= \overline{Z_{RisHE}} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Les valeurs moyennes des deux séries temporelles Z_{SatC} et Z_{Ris} pendant les périodes de hautes eaux sont égales. La figure 6.11 illustre le résultat de la correction du biais systématique en période de hautes eaux.

Une fois le biais systématique de hautes eaux ainsi corrigé, on peut définir la série temporelle de l'erreur corrigée :

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_{satC} &= Z_{SatC} - Z_{Ris} \\ &= Z_{Sat} - (\overline{Z_{SatHE}} - \overline{Z_{RisHE}}) - Z_{Ris} = \tilde{\varepsilon}_{Sat} - \Delta \overline{Z_{HE}} \\ &= (Z_{Sat} - \overline{Z_{SatHE}}) - (Z_{Ris} - \overline{Z_{RisHE}}) \end{aligned} \quad (6.16)$$

Cette correction a donc pour effet de centrer sur zéro les séries temporelles de l'erreur sur la période de hautes eaux et de se placer dans un référentiel altimétrique relatif.

La quantification de la précision relative des mesures altimétriques est réalisée dans un référentiel altimétrique relatif, où les biais systématiques en hautes eaux entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées sont annulés. On quantifie ainsi la précision relative des mesures altimétriques et non pas leur précision absolue.

L'estimateur de la moyenne de l'erreur que nous notons $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ est défini comme :

$$\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}} = \frac{1}{N} \sum_{i=n}^N \tilde{\varepsilon}_{sat_C}(n) = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} - \Delta \overline{Z_{HE}} \quad (6.17)$$

Notons bien que l'erreur $\tilde{\varepsilon}_{sat_C}$ est différente de l'erreur approximée centrée :

$$\tilde{\varepsilon}_{Sat}(n) - \Delta \overline{Z_{HE}} \neq \tilde{\varepsilon}_{Sat}(n) - \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}(n)}$$

C'est à dire que même après correction du biais $\Delta \overline{Z_{HE}}$, la valeur prise par $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ est a priori non nulle. Elle est égale à un biais résiduel lié à une incohérence interne à la série temporelle altimétrique, due principalement aux dégradations subies par les mesures altimétriques acquises pendant les périodes de moyennes eaux et de basses eaux.

6.4.1.3 Exemple applicatif

Pour exemple, la série temporelle alti-hydrologique issue de la station virtuelle « TP-063A-Solimoes » présente avant correction du biais de hautes eaux une erreur moyenne de 0,51m par rapport à la série temporelle in-situ reconstituée (cf. table 5.2 ou 6.10). Après correction du biais constaté en période de hautes eaux, soit $\Delta \overline{Z_{HE}} = 0,10\text{m}$, l'erreur moyenne est réduite à 0,41m (cf. table 6.10).

Cet exemple de série temporelle altimétrique corrigé du biais constaté en période de hautes eaux est illustré à la figure 6.11, il reprend l'exemple précédemment illustré par les figures 5.7 et 5.10 du chapitre 5 (pages 119 et 127).

6.4.2 Calcul des indicateurs finaux des mesures altimétriques

La correction des indicateurs de précision issues des stations virtuelles altimétriques s'effectue à l'aide des équations (4.14) et (4.18). Cependant, compte tenu du fait que nous ne pouvons pas quantifier la variance de l'erreur imputable à la reconstitution $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2$, nous substituons cet indicateur à son estimation $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}^2$, soit pour chaque station virtuelle altimétrique :

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}} = [\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6.18)$$

$$RMS_{\varepsilon_{Sat}} = \left[\frac{N-1}{N} \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}^2 + \hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.19)$$

Avec :

$\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ l'erreur moyenne des mesures altimétriques après correction du biais constaté en période de hautes eaux.

N le nombre de mesures altimétriques de la station virtuelle.

6.4.2.1 Traitement des possibles cas de rejets

Les estimations de l'écart-type de l'erreur de reconstitution ($\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$) fournies par les différents modèles peuvent nous amener à deux incohérences qui nous obligent à rejeter les stations virtuelles concernées :

Rejet 0 : La série temporelle in-situ reconstituée employée pour la comparaison à la série temporelle alti-hydrologique ne respecte pas l'une ou l'autre (ou les deux) conditions (5.12) et (5.13) présentées au chapitre 5, section 5.4.1.

Rejet 1 : La valeur estimée de l'écart-type de l'erreur de reconstitution ($\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$) est plus grande que l'erreur totale approximée ($\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$), le calcul des indicateurs corrigés est alors impossible à réaliser (cf. équations équation 6.18) et nous oblige à rejeter la station virtuelle concernée.

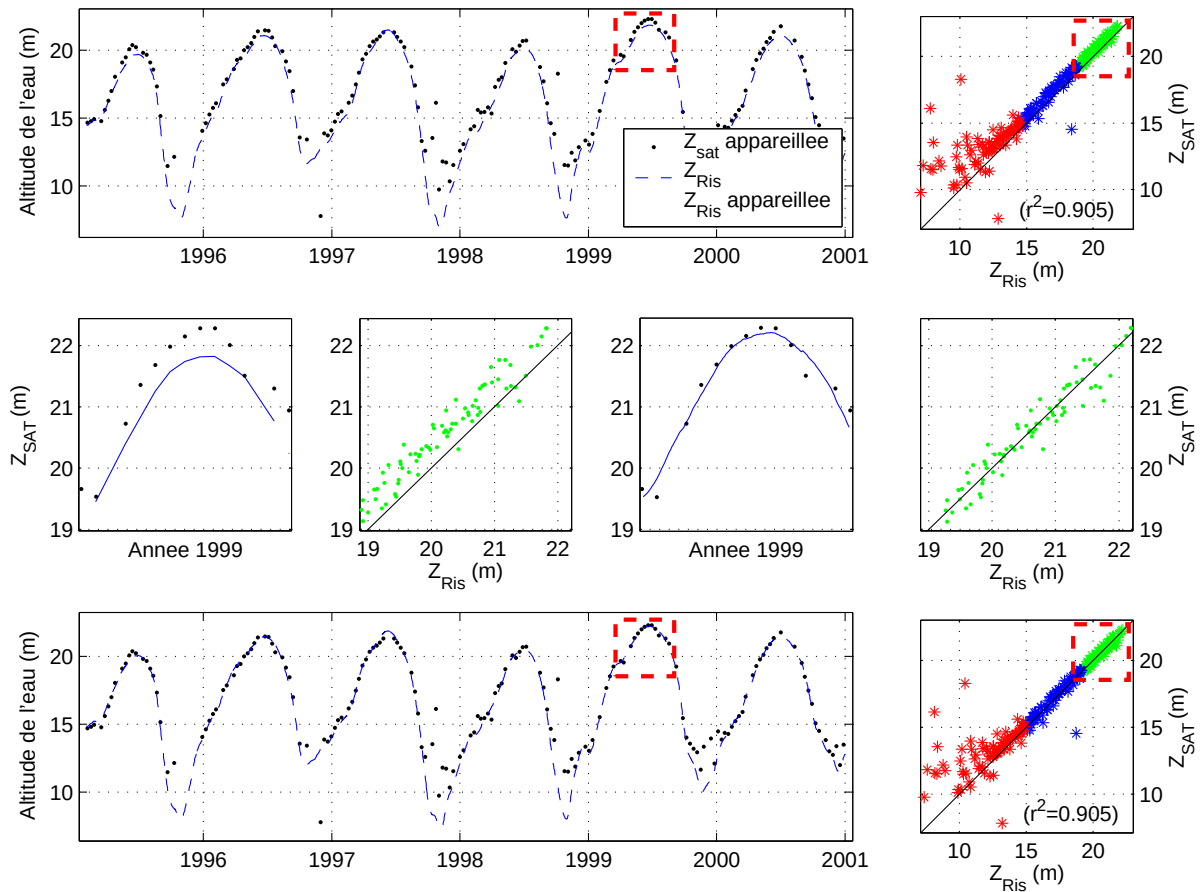


FIG. 6.11: Détail du processus de correction du biais systématique de hautes eaux entre une série temporelle alti-hydrologique et une série temporelle in-situ reconstituée pour la station virtuelle « TP-063A-Solimoès ». Haut gauche : les deux séries temporelles altimétrique et in-situ reconstituée. L'erreur des mesures est variable dans le temps : elle est corrélée aux variations du cycle hydrologique. La corrélation entre les mesures altimétriques et les mesures in-situ est meilleure lorsque le niveau des eaux est maximal (haut droite). Rangée du milieu, de gauche à droite : 1. zoom sur la période de hautes eaux de l'année 1999, le biais systématique apparaît nettement ; 2. zoom sur la droite de corrélation où le biais s'observe nettement ; 3. zoom sur la période de hautes eaux de l'année 1999, le biais systématique a été ajouté à la série temporelle in-situ reconstituée afin de faire correspondre au mieux les deux séries temporelles ; 4. zoom sur la droite de corrélation : les mesures sont parfaitement ajustées. Les lignes noires en diagonale illustrent les droites de corrélation idéales.

Rejet 2 : La valeur de l'erreur RMS corrigée ($\hat{RMS}_{\varepsilon_{Sat}}$) est plus grande que son homologue approximée ($RMS_{\varepsilon_{Sat}}$), la station virtuelle associée concernée est rejetée. Ceci peut se produire dans les cas où la correction du biais constaté en période de hautes eaux a engendré une erreur moyenne plus grande que l'erreur moyenne sans correction.

Le chapitre 7 présente les indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques que nous avons traités à l'aide de notre méthode. Les indicateurs de précision approximatifs moyens sont calculés à partir de toutes les stations virtuelles disponibles, alors que les indicateurs de précision finaux moyens ne sont calculés qu'à partir des stations virtuelles non-rejetées.

Notons que le calcul des indicateurs de valeurs RMS dépendant du bon déroulement de la correction des valeurs d'écart-type de l'erreur des mesures altimétriques, tout cas de rejet de type 1 rend impossible le calcul des valeurs RMS qui en dépendent. De plus, puisque l'erreur moyenne estimée des mesures altimétriques $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ est utilisée pour estimer les valeurs RMS, les rejets de type 2 sont également conditionnés par le bon déroulement du processus d'estimation du biais systématique en périodes de hautes eaux.

D'autre part, les estimations de l'écart-type de l'erreur de reconstitution ne pouvant être exactes, deux incohérences indétectables en phase de production - et contre laquelle nous ne pouvons rien - vont apparaître :

- la valeur de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ est surestimée, mais elle est inférieure à l'écart-type de l'erreur totale approximée : $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}} \leq \sigma_{\varepsilon_{Sat}}$, l'erreur des mesures altimétriques est alors sous-estimée,
- la valeur de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ est sous-estimée, et l'erreur des mesures altimétriques est surestimée.

Ces deux sources d'erreur dans la correction des indicateurs de précision sont impossibles à détecter, les indicateurs de précision sont donc corrigés avec l'estimation de l'écart-type de l'erreur de reconstitution. Les indicateurs corrigés des stations virtuelles sont utilisés pour l'analyse de la « qualité altimétrique » et les comparaisons de performances entre produits alti-hydrologiques au chapitre 7.

Notons, comme nous l'avons déjà remarqué au § 6.3.5.2 (page 151), que les effets des surestimations et sous-estimations des indicateurs vont se minimiser mutuellement lorsque nous considérerons la qualité globale (ou moyenne) des produits alti-hydrologiques par une analyse statistique sur un grand nombre de stations virtuelles.

6.4.2.2 Application au produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-fg3s-fcr2p5s-opp »

Après avoir corrigé les indicateurs de précision, revenons sur l'exemple de la station virtuelle altimétrique « TP-063A-Solimoes », précédemment illustrée par la figure 5.10 et la table 5.2, à la page 127.

Correction du biais constaté en périodes de hautes eaux La figure 6.12 présente une série temporelle de l'erreur pour laquelle le biais systématique a été retiré (l'erreur moyenne en périodes de hautes eaux est nulle, les points verts sont centrés sur l'axe des temps).

Rappelons qu'étant données les incertitudes sur le nivellement de l'Amazonie obtenu par altimétrie radar et interpolation entre les traces [Kosuth et al., 2006] le biais systématique entre séries temporelles alti-hydrologiques et séries temporelles in-situ reconstituées ne peut être imputé aux seules mesures altimétriques.

Nous identifions donc le biais en période de hautes eaux pour ramener les deux séries temporelles dans un même référentiel (celui des mesures altimétriques) relatif (i.e. différent du référentiel absolu d'une constante inconnue).

Correction des effets de la mesure et de la reconstitution des séries temporelles in-situ La table 6.10 présente les indicateurs de précision corrigés et non corrigés :

- l'erreur moyenne constatée en périodes de hautes eaux est de 0,08m ($\overline{Z_{SatHE}} = \overline{Z_{RisHE}} + 0,08m$),

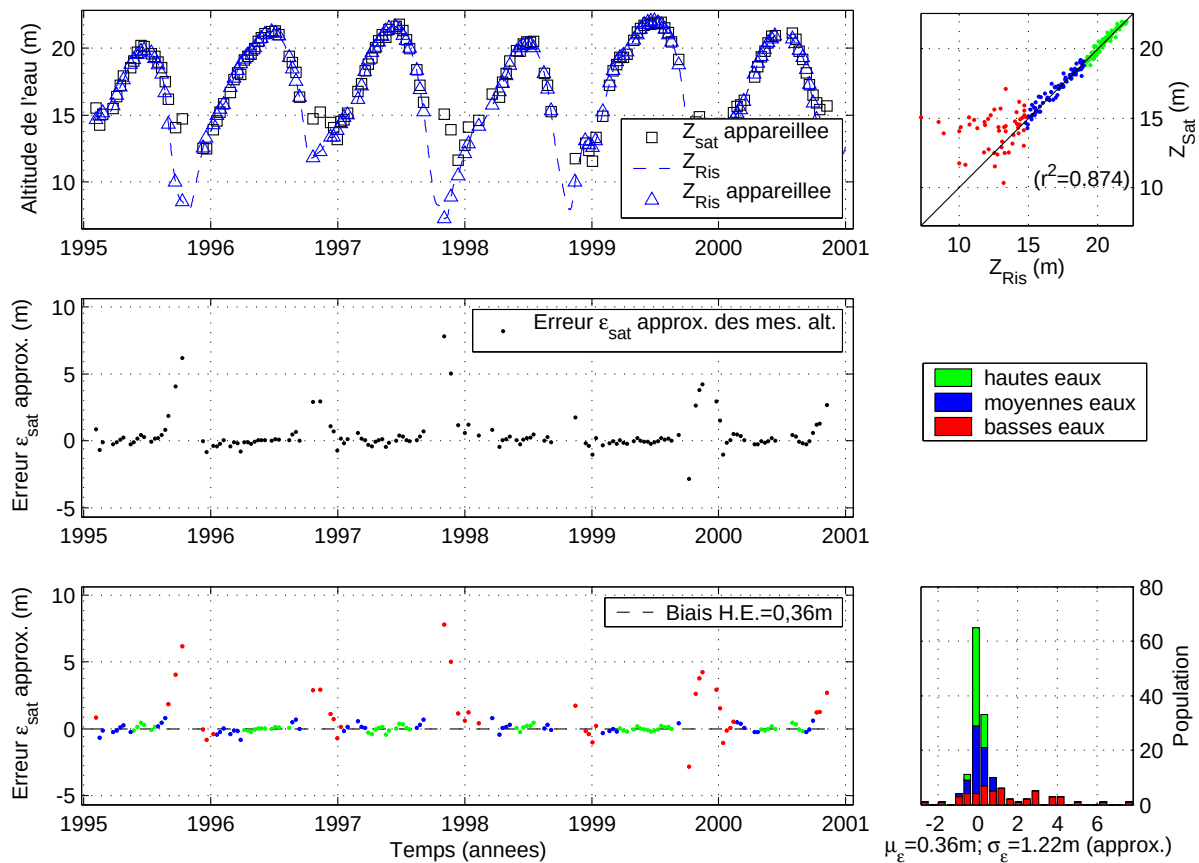


FIG. 6.12: Illustration de la correction du biais constaté en période de hautes eaux. Cet exemple reprend les séries temporelles de la figure 5.10 (page 127) issues de la station virtuelle « TP-063A-Solimoes », Haut gauche : les mesures des deux séries temporelles altimétrique et in-situ reconstituée (corrigée du biais de hautes eaux). Milieu gauche : série temporelle de l'erreur ε des mesures altimétriques. Bas gauche : Les erreurs en période de hautes eaux sont centrées sur l'origine des ordonnées.

Haut droite : Corrélation entre les mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées pour chacune des trois périodes hydrologiques. Bas droite : Histogramme de répartition des erreurs pour chacune des trois périodes hydrologiques.

Indicateurs de qualité - station virtuelle « TP-063A-Solimoes »									
Produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$RMS_{\varepsilon_{Sat}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ (m)	T_{eff} (jours)	N_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)
Global	1,24	1,19	0,36	14,1	29,6	1,27	1,22	0,08	0,24
Hautes eaux	0,19	0,19	0,00	11,6	14,3	0,22	0,22	-0,28	0,08
Moyennes eaux	0,29	0,29	0,02	13,6	26,8	0,34	0,34	-0,26	0,25
Basses eaux	2,49	2,05	1,43	19,0	47,7	2,50	2,07	1,15	0,31

$\eta_d = 78,2\%$; $\mathcal{I}_H = 97,9\%$; $N_{CA} = 7,2$; $M_a = 202$ ($\eta_a = 78,6\%$)
 Periode : 09/1992 – 08/2002
 Correction biais hautes eaux appliquée $\Delta\bar{Z}_{HE} = 0,10\text{m}$; $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Mis}} = 0,10\text{m}$

TAB. 6.10: Exemple d'indicateurs de qualité corrigés du biais constaté en période de hautes eaux et de l'erreur de dispersion imputable à la Méthode de Reconstitution des Séries Temporelles In-Situ.

- l'écart-type de l'erreur globale imputable à la Méthode de Reconstitution des Séries Temporelles In-Situ est estimé à 0,24m La correction en utilisant l'équation (4.19) réduit de 3cm l'écart-type de l'erreur des mesures altimétriques,
- la valeur RMS corrigée bénéficie des deux corrections de l'erreur moyenne et de la dispersion, elle est réduite de 3cm après correction alors que l'erreur moyenne après correction du biais de hautes eaux augmente de 0,28m.

Les estimations et les corrections qui en découlent pour les trois périodes hydrologiques sont également présentées dans la table 6.10.

Bilan global Finalement, on estime que la série temporelle alti-hydrologique issue du produit altimétrique AVISO par extraction depuis la station virtuelle « TP-063A-Solimoes » permet d'obtenir des mesures du niveau du fleuve Solimões avec une précision RMS globale de 1,24m ($0,36 \pm 1,19$ m) à raison d'une mesure tous les 14,1 jours en moyenne (29,6% de pertes).

Ces performances peuvent atteindre en périodes de hautes eaux une précision RMS de 0,19m ($0,00 \pm 0,19$ m) à raison d'une mesure tous les 11,6 jours (14,3% de pertes) et se dégradent en les périodes de basses eaux jusqu'à une précision RMS de 2,49m ($1,43 \pm 2,05$ m) à raison d'une mesure tous les 19 jours (47,7% de pertes).

6.5 Conclusion

La mise en œuvre des trois dernières étapes de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques permet d'obtenir les indicateurs de précision finaux de l'erreur approximée des mesures altimétriques.

Démarche générale

La démarche générale proposée consiste en l'estimation des termes inconnus des équations (4.19) qui concernent les moyennes et les écart-types des erreurs des mesures in-situ et de reconstitution des valeurs in-situ, les indicateurs $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$ d'une part et $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ d'autre part.

L'estimation des indicateurs liés à l'erreur de mesure in-situ $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$ se base sur la qualité du nivellement topographique du réseau de stations limnimétriques considéré et de la qualité des moyens de mesures qu'ils soient mécaniques ou manuels.

L'estimation des indicateurs liés à l'erreur de reconstitution $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ est basée sur la quantification de l'erreur de reconstitution sur des sites de test (stations limnimétriques de test), la modélisation de cette erreur ou de ses indicateurs et l'exploitation des modèles d'estimation pour fournir les estimateurs $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$.

Cas du bassin amazonien

Dans le cas du bassin amazonien, deux problèmes majeurs nous empêchent de mettre en œuvre la démarche générale résumée ci-dessus :

1. Le nivellement topographique du réseau de stations limnimétriques du bassin amazonien est quasi inexistant. Nous avons donc du utiliser les résultats de [Kosuth et al., 2006], basés sur l'altimétrie radar, pour niveller les stations limnimétriques. Ce nivellement ne permet pas de placer les stations limnimétriques dans le référentiel altimétrique absolu, mais permet de placer les stations limnimétriques dans un référentiel commun d'une qualité suffisante qui permet de reconstituer les séries temporelles in-situ pour les stations virtuelles.
2. Les travaux présentés en section 6.3.5.1 montrent que les estimations de l'indicateur $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ ne sont pas d'une qualité suffisante pour pouvoir en dériver les indicateurs de précision finaux des mesures altimétriques.

Ces deux points font que nous ne sommes pas en mesure d'estimer l'erreur moyenne des mesures altimétriques. La quantification de la précision absolue des mesures altimétriques est alors impossible à réaliser.

Précision relative

Compte tenu de l'impossibilité de quantifier la précision absolue, nous proposons une approche alternative permettant de quantifier la précision relative des mesures altimétriques. Elle se base sur la quantification du biais systématique constaté sur les périodes de hautes eaux pour laquelle nous avons vérifié que les mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées sont très bien corrélées.

En annulant ce biais, nous plaçons les mesures altimétriques et in-situ reconstituées dans un référentiel relatif. Bien que l'on ne soit pas à même de quantifier la précision absolue des mesures altimétriques, cette approche permet néanmoins de quantifier la précision relative (RMS) d'une série temporelle alti-hydrologique qui est une image de la cohérence de la série temporelle alti-hydrologique : on retranche le biais systématique de hautes eaux à toute la série temporelle, mais les mesures acquises en périodes de moyennes eaux et basses eaux peuvent toujours présenter des erreurs qui sont intrinsèques à l'altimétrie radar (tracking ou retracking, corrections, orbite, géoïde, etc.) et notamment liées aux difficultés d'acquisition des mesures selon les saisons hydrologiques.

Ainsi, la quantification de la précision relative des séries temporelles alti-hydrologiques permet de dresser un bilan global des performances de chacun des produits alti-hydrologiques et de mener de nombreuses analyses comparatives, objet des chapitres 7 et 8 suivants.

Troisième partie

APPLICATIONS DE LA MÉTHODE STANDARD DE QUANTIFICATION DE LA QUALITÉ DES PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES

Chapitre 7

QUANTIFICATION DE LA QUALITÉ DE DIFFÉRENTS PRODUITS ALTI-HYDROLOGIQUES

Sommaire

7.1	Introduction	172
7.2	Les différents produits alti-hydrologiques utilisés	172
7.2.1	Produits alti-hydrologiques « prêts à l'emploi »	172
7.2.2	Produits alti-hydrologiques dérivés des produits altimétriques	174
7.2.3	Liste des produits alti-hydrologiques utilisés	176
7.3	Approche statistique de la qualité des produits alti-hydrologiques	177
7.3.1	Les stations virtuelles définies sur le bassin amazonien	177
7.3.2	Critères de sélection des stations virtuelles et séries temporelles alti-hydrologiques	182
7.3.3	Représentations de la qualité d'un produit alti-hydrologique	183
7.4	Quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques	186
7.4.1	CASH (Topex/Poseidon)	188
7.4.2	River & Lake Hydrology/ENVISAT	190
7.4.3	River & Lake Hydrology/ERS-2	192
7.4.4	[~Birkett 2002] (Topex/Poseidon)	194
7.4.5	AVISO/M-GDR/Ocean (Topex/Poseidon)	196
7.4.6	CLS/ENVISAT-L2/Ice1 (Topex/Poseidon)	198
7.4.7	CLS/ENVISAT-L2/Ice2 (Topex/Poseidon)	200
7.4.8	CLS/ENVISAT-L2/Ocean (Topex/Poseidon)	202
7.4.9	CLS/ENVISAT-L2/SeaIce (Topex/Poseidon)	204
7.4.10	CLS/ENVISAT-L2/clsmix (Topex/Poseidon)	206
7.4.11	Table récapitulative des indicateurs de qualité moyens des 46 produits alti-hydrologiques traités	208
7.5	Comparaison des produits et des procédures de fenêtrage, de retracking et de filtrage automatique	210
7.5.1	Comparaison des performances des chaînes de filtrage automatique	210
7.5.2	Comparaison des performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique	212
7.5.3	Comparaison des performances de différentes méthodes de fenêtrage géographique	214
7.5.4	Comparaison de la qualité de 10 produits alti-hydrologiques	216
7.6	Conclusion générale sur la méthode standard de quantification de la qualité	224

7.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la quantification de la qualité de différents produits alti-hydrologiques sur un nombre important de stations virtuelles du bassin amazonien (i.e. sur un nombre important de séries temporelles altimétriques).

Ce travail de quantification massive permet de combler le manque actuel en la matière¹ et ouvre de nouvelles perspectives pour l'évaluation par les hydrologues du degré d'utilisabilité de l'altimétrie satellitaire radar pour le suivi du niveau des cours d'eau.

La quantification de la qualité des mesures altimétriques et la comparaison entre produits alti-hydrologiques sur des ensembles statistiquement significatifs, à l'aide d'une méthode standard, sont les points fondamentaux de cette thèse. Ceci permet à la communauté « amont » de comparer les différents produits altimétriques entre eux et ainsi de quantifier les gains apportés par de nouveaux procédés ou de nouvelles méthodes. Ceci permet aux utilisateurs de la communauté « aval » qui souhaitent introduire les mesures altimétriques du niveau des cours d'eau dans leurs travaux (modèles, estimations de débit, volumes, etc.), de disposer d'une information, jusqu'alors absente, sur la qualité de ces mesures.

Nota : *La mise en page de ce chapitre laisse volontairement apparaître des zones vierges en bas de pages dans les sections présentant les résultats de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques. Ceci est fait afin de respecter une mise en page homogène présentant sur deux pages voisines d'une part les figure et table et d'autre part les commentaires d'analyse.*

7.2 Les différents produits alti-hydrologiques utilisés

Cette section récapitule la liste des produits alti-hydrologiques dont nous avons pu quantifier la qualité à l'aide de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques.

À l'heure actuelle, à notre connaissance, seuls quelques produits alti-hydrologiques ont été développés et distribués dont CASH, River & Lake Hydrology et HydroWeb. Dans le cadre de cette thèse, nous avons analysé les deux premiers (CASH et River & Lake Hydrology) ainsi qu'un grand nombre de produits alti-hydrologiques que nous avons générés à partir des produits altimétriques existants.

Nous avons pour cela développé une chaîne modulaire de génération de produits alti-hydrologiques à partir de produits altimétriques, chaîne que nous présentons au § 7.2.2. Les modules (déjà introduits au chapitre 3) correspondent à des opérations de fenêtrage, sélection et filtrage des mesures altimétriques. Comme nous allons le voir plus bas (§ 7.2.2), nous avons volontairement mis en œuvre plusieurs variantes de cette chaîne de génération (différents ordonnancements de modules) de manière à montrer les qualités et défauts des produits alti-hydrologiques résultants.

Ceci nous permet de mieux appréhender les gains de qualité obtenus par différentes méthodes de fenêtrage, sélection et filtrage des mesures altimétriques.

7.2.1 Produits alti-hydrologiques « prêts à l'emploi »

Comme nous l'avons déjà dit, les produits alti-hydrologiques sont peu nombreux, mais ils ont l'avantage d'être des produits optimisés pour les applications en hydrologie, nous pourrions donc (et nous devons) les utiliser tels quels. Cette démarche nous permettra de confronter les résultats publiés en rapport avec ces produits à ceux que la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques permet d'obtenir. L'importance d'une méthode standard, encore une fois, est fondamentale car elle permet à quiconque de quantifier dans un référentiel de qualité commun les performances de produits alti-hydrologiques de tous horizons.

Voici dans les sous-sections suivantes les produits alti-hydrologiques dont nous avons quantifié des mesures altimétriques.

¹Où généralement quelques exemples choisis sont mis en avant.

7.2.1.1 Produit alti-hydrologique « CASH »

Ce produit a été généré dans le cadre du projet « CASH », il est disponible gratuitement sur le site web du projet². Les séries temporelles altimétriques sont fournies sous forme de fichier NetCDF (voir § 2.3.2, page 66).

7.2.1.2 Produits alti-hydrologiques « River & Lake Hydrology »

Le produit alti-hydrologique est issu d'un travail de retracking mené par l'équipe de De Montfort University (équipe E.A.P.R.S.) dans le cadre du projet River & Lake. Ce produit est constitué de deux variantes selon que les séries temporelles alti-hydrologiques sont dérivées des mesures altimétriques de la mission ERS-2 ou bien de la mission ENVISAT. Les valeurs de range sont estimées à partir des formes d'onde de ces deux missions altimétriques à l'aide d'un système expert équipé d'une douzaine d'algorithmes de retracking spécialisés.

Dans le cadre d'un projet d'analyse de la qualité du produit « River & Lake Hydrology », un partenariat s'est organisé entre l'ESA, De Montfort University (équipe E.A.P.R.S.) et le Cemagref (UMR TETIS). A notre demande, l'équipe de De Montfort University a construit des séries temporelles alti-hydrologiques sur 50 stations virtuelles du bassin amazonien (parmi 93 que nous avons définies³). Les séries temporelles alti-hydrologiques résultantes nous ont été fournies sous la forme ASCII du produit « River & Lake Hydrology » [RLH, 2006].

7.2.1.3 Produit alti-hydrologique « [~Birkett 2002] »

Charon Birkett et al. ont publié dans [Birkett et al., 2002] les résultats de comparaison directe entre des séries temporelles alti-hydrologiques issues de 34 stations virtuelles définies aux intersections entre les traces de Topex/Poseidon et quelques fleuves, lacs et zones d'inondations du bassin amazonien et des « séries temporelles in-situ modifiées » construites à partir de la station limnimétrique la plus proche de la trace. Parmi ces stations virtuelles, 14 sont positionnées sur des cours d'eau (cf. § A.3), les 20 restantes principalement sur des zones d'inondation.

Les séries temporelles alti-hydrologiques générés par [Birkett et al., 2002] sont issues du produit altimétrique AVISO/M-GDR auquel est appliqué un filtrage spécifique non précisé (probablement en partie par expertise).

Chaque série temporelle in-situ modifiée est construite à partir de la série temporelle de la station limnimétrique la plus proche de la trace, à laquelle est appliqué (1) un décalage vertical arbitraire de manière à minimiser l'écart en hautes eaux (similaire à la correction de hautes eaux présentée au chapitre 6); (2) un décalage temporel (ou déphasage) mis en œuvre de manière à minimiser l'erreur RMS.

Le produit alti-hydrologique de [Birkett et al., 2002] n'étant pas disponible, nous l'avons « reconstruit » à partir du même produit altimétrique (AVISO/M-GDR) afin de comparer notre Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques à la méthode employée par Birkett et al. pour quantifier la précision (RMS seulement) des mesures altimétriques de Topex/Poseidon sur quelques stations virtuelles du bassin amazonien.

Nous avons généré ce produit au plus proche de celui généré par [Birkett et al., 2002] (méthode non décrite), en utilisant :

- le même produit altimétrique source que celui employé par [Birkett et al., 2002] : AVISO/M-GDR (Topex/Poseidon),

²http://ocean.cls.fr/html/cash/donnees/access_fr.html

³Il est à noter que la moitié environ des 93 stations virtuelles définies n'ont pas permis de générer de séries temporelles « exploitables » : la raison donnée par l'équipe de De Montfort University est que les fenêtres d'extraction géographiques étaient trop étroites. Ce fait nous semble surprenant car la fréquence des mesures le long de la trace pour ces deux missions est de 20Hz (300m d'espacement entre deux mesures environ, soit deux fois mieux que Topex/Poseidon pour des fenêtres géographiques de stations virtuelles de largeurs similaires).

- le fenêtrage des stations virtuelles fourni dans l'article [Birkett et al., 2002],
- la meilleure chaîne de filtrage des séries temporelles altimétriques (cf. § 7.5.1).

Ce produit alti-hydrologique est noté [~Birkett 2002] dans la suite de ce chapitre.

7.2.2 Produits alti-hydrologiques dérivés des produits altimétriques

7.2.2.1 Les produits altimétriques

Les produits alti-hydrologiques que nous avons construits à l'aide de notre chaîne modulaire sont issus de six produits altimétriques (les cinq premiers sont décrits en détail au chapitre 2) :

- Le produit altimétrique « AVISO/M-GDR » issu de la mission altimétrique Topex/Poseidon.
- Quatre produits altimétriques « CLS » issus du retracking des formes d'ondes de Topex/Poseidon à l'aide du segment sol de la mission ENVISAT disposant de quatre algorithmes de retracking : Ice1, Ice2, Ocean et SeaIce.
- Un sixième produit altimétrique, variante du produit altimétrique CLS, que nous avons construit en rassemblant dans une même série temporelle les mesures altimétriques issues des quatre algorithmes de retracking. Ce produit hybride est décrit ci-dessous.

Génération du produit altimétrique hybride « CLS - Topex/Poseidon - clsmix »

Le produit altimétrique fourni par CLS met en œuvre quatre algorithmes de retracking différents sur les mêmes échos radar. Les quatre valeurs de range interprétées par ces quatre algorithmes sont stockées dans le même enregistrement altimétrique, et exploitent les mêmes variables de géoréférencement, de corrections du range, d'altitude (orbite), etc.

L'homogénéité des traitements des mesures altimétriques issues de ces quatre algorithmes permet de travailler dans un système de référence commun à ces quatre jeux de données.

Cette particularité du produit altimétrique fourni par CLS nous permet de dériver un 5^{ème} jeu de données à partir de la fusion de ces quatre jeux de données originaux. Les intérêts d'une telle fusion sont multiples, et permettent notamment :

- d'augmenter les chances d'obtenir au moins une mesure altimétrique individuelle par passage du satellite, améliorant ainsi la période d'échantillonnage effective,
- d'améliorer éventuellement la qualité globale des séries temporelles alti-hydrologiques car le processus de sélection d'une mesure par passage du satellite est effectué sur un nombre de mesures théoriquement quatre fois plus grand.

La fusion des données des quatre algorithmes de retracking intervient à l'amont de la chaîne de génération des produits alti-hydrologiques, et donc nécessairement avant de procéder à la « sélection d'une mesure par passage ». La fusion des séries temporelles est relativement simple : pour chacune des stations virtuelles, les séries temporelles sont concaténées, le résultat de la concaténation est enfin trié par ordre chronologique des mesures de manière à obtenir une série temporelle tout à fait ordinaire, elles sont donc pleinement exploitables pour la suite des traitements. Le fait que de multiples mesures altimétriques individuelles soient acquises aux mêmes dates n'a pas d'incidence sur la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques et ses différents modules de traitement.

7.2.2.2 Génération de produits alti-hydrologiques à partir de produits altimétriques

La chaîne modulaire de génération des produits alti-hydrologiques à partir de produits altimétriques est illustrée dans la figure 7.1.

La séquence des modules permet de réaliser un fenêtrage géographique des données [module 1], un filtrage des mesures jugées non pertinentes (sur des critères portant sur l'état des variables qui accompagnent chaque mesure altimétrique individuelle, au sein des enregistrements altimétriques) [module 2],

la sélection d'une mesure représentative par passage du satellite [module 3] et des filtrages complémentaires de nature statistique [module 4 à 6].

Nous avons créé sept variantes de cette chaîne modulaire en modifiant l'agencement des modules 3 à 6 comme illustré dans la figure 7.1. Nous pouvons ainsi, pour un même produit altimétrique, générer sept produits alti-hydrologiques.

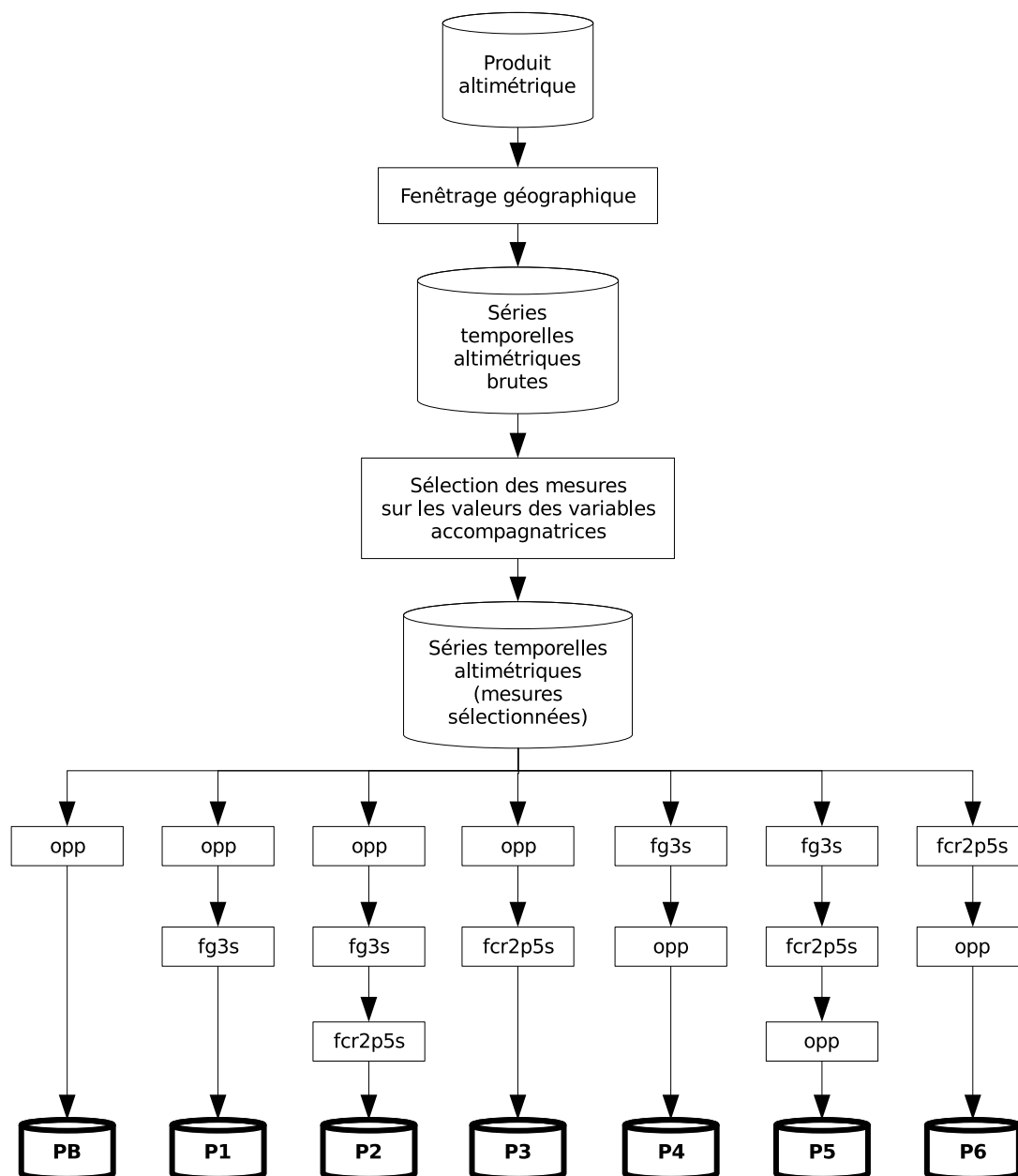


FIG. 7.1: Schéma des différentes chaînes de génération des produits alti-hydrologiques mises en œuvre sur les produits altimétriques AVISO et CLS.

Produits alti-hydrologiques « PB » : Générés en appliquant seulement l'étape (indispensable) de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite, ils permettent d'obtenir des séries temporelles potentiellement utilisables pour des applications en hydrologie. Nom de la chaîne de génération : "opp" (de l'acronyme anglais « One Per Passage »).

Produits alti-hydrologiques « P1 » : Générés en appliquant l'étape de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite, suivi d'un filtrage global (à $K = 3$). Nom de la chaîne de génération : "opp-fg3s".

Produits alti-hydrologiques « P2 » : Générés en appliquant l'étape de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite, suivi d'un filtrage global (à $K = 3$) et d'un filtrage calendaire récursif à $K = 2, 5$. Nom de la chaîne de génération : "opp-fg3s-fcr2p5".

Produits alti-hydrologiques « P3 » : Générés en appliquant l'étape de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite, suivi d'un filtrage calendaire récursif à $K = 2, 5$. Nom de la chaîne de génération : "opp-fcr2p5".

Produits alti-hydrologiques « P4 » : Générés en reprenant les étapes appliquées au produit alti-hydrologique « P1 » où le processus de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite a été déplacé en fin de chaîne. Nom de la chaîne de génération : "fg3s-opp".

Produits alti-hydrologiques « P5 » : Générés en reprenant les étapes appliquées au produit alti-hydrologique « P2 » où le processus de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite a été déplacé en fin de chaîne. Nom de la chaîne de génération : "fg3s-fcr2p5-opp".

Produits alti-hydrologiques « P6 » : Générés en reprenant les étapes appliquées au produit alti-hydrologique « P3 » où le processus de sélection d'une mesure représentative par passage du satellite a été déplacé en fin de chaîne. Nom de la chaîne de génération : "fcr2p5-opp".

L'ensemble de ces combinaisons permet d'obtenir 42 produits alti-hydrologiques différents construits à partir de six 6 produits altimétriques et de 7 variantes de la chaîne modulaire de génération des produits alti-hydrologiques. Ces 42 produits alti-hydrologiques exploités sur 77 stations virtuelles nous permettent de construire 3234 séries temporelles alti-hydrologiques.

7.2.3 Liste des produits alti-hydrologiques utilisés

À titre de référence, la table 7.1 présente de façon synthétique la liste de tous les produits alti-hydrologiques dont nous avons quantifié la qualité des mesures ainsi que le nombre de séries temporelles alti-hydrologiques fournies (f) ou générées (g) :

Fournisseur ou Nom	Tracker/ Retracker	Mission	Nb Prd ¹	Chaîne « produit alti-hydrologique »								Total VS	Nb ST ²
				n.c.	PB	P1	P2	P3	P4	P5	P6		
Birkett2002	Ocean	T/P	1	-	-	-	-	-	-	✓	-	14	14 (g)
CASH	Mélange	T/P	1	✓	-	-	-	-	-	-	-	10	10 (f)
River & Lake	Mélange	Envisat	1	✓	-	-	-	-	-	-	-	42	42 (f)
River & Lake	Mélange	ERS-2	1	✓	-	-	-	-	-	-	-	43	43 (f)
AVISO	Ocean	T/P	7	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	77	539 (g)
CLS	Ice1	T/P	7	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	77	539 (g)
CLS	Ice2	T/P	7	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	77	539 (g)
CLS	Ocean	T/P	7	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	77	539 (g)
CLS	SeaIce	T/P	7	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	77	539 (g)
CLS	Mélange	T/P	7	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	77	539 (g)
¹ Nombre de produits alti-hydrologiques												Total	3343
² Nombre de séries temporelles alti-hydrologiques													

¹ Nombre de produits alti-hydrologiques

² Nombre de séries temporelles alti-hydrologiques

TAB. 7.1: Liste des produits alti-hydrologiques traités dans ce chapitre.

7.3 Approche statistique de la qualité des produits alti-hydrologiques par analyse sur un grand nombre de stations virtuelles

La quantification de la qualité globale d'un produit alti-hydrologique nécessite la quantification de la qualité des séries temporelles alti-hydrologiques sur un nombre statistiquement significatif de stations virtuelles.

Dans cette section, nous dressons la liste des stations virtuelles que nous avons définies sur le bassin amazonien, orbite par orbite (cf. § 7.3.1), nous détaillons les critères de sélection des stations virtuelles et séries temporelles alti-hydrologiques (cf. § 7.3.2) servant à l'analyse de la qualité des produits alti-hydrologiques et nous présentons les représentations graphiques qui permettent d'appréhender de manière simplifiée la qualité globale associée à un produit alti-hydrologique (cf. § 7.3.3).

7.3.1 Les stations virtuelles définies sur le bassin amazonien

De façon générale, les stations virtuelles ont été définies à toutes les intersections entre traces et cours d'eau : ceci nous a fourni 181 stations virtuelles (50 pour ERS-2/ENVISAT, 77 pour Topex/Poseidon et 10 spécifiques au produit CASH).

7.3.1.1 Stations virtuelles de la thèse sur la première orbite de Topex/Poseidon (TPa/J1/J2)

La figure 7.2 donne un aperçu de la répartition des 77 stations virtuelles que nous avons définies aux intersections entre les principaux fleuves du bassin amazonien et les traces de l'orbite TPa/J1/J2⁴. Ces stations virtuelles concernent les missions altimétriques Topex/Poseidon, sur sa première orbite (septembre 1993 à août 2002), Jason-1 et Jason-2 lancé dernièrement en juin 2008.

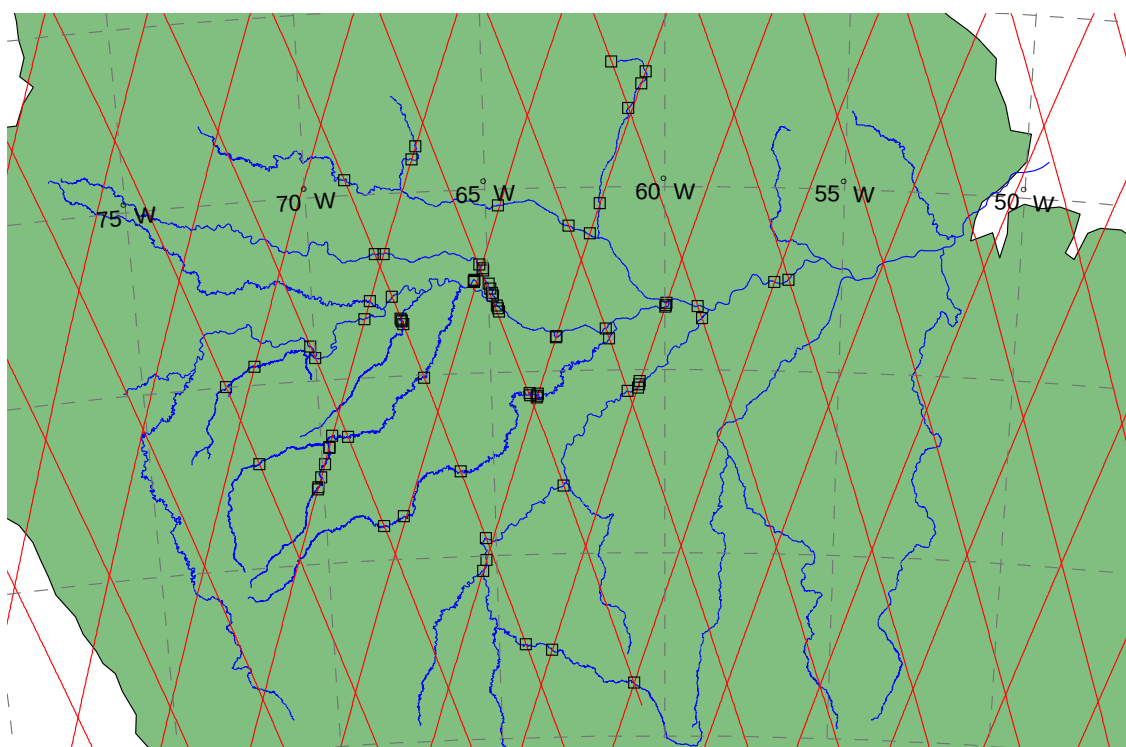


FIG. 7.2: Carte des 77 stations virtuelles (carrés noirs) définies dans le cadre de la thèse sur les principaux fleuves du bassin amazonien aux intersections avec les traces (traits rouges) de l'orbite à 10 jours de Topex/Poseidon (première orbite), Jason-1 et Jason-2 (Projection cylindrique équidistante).

⁴Ces intersections correspondent à des configurations où la continuité hydraulique du cours d'eau (pas de chutes) et la présence de stations limnimétriques amont et aval nivelées permettent d'envisager la reconstitution de la série temporelle in-situ à la station virtuelle.

Le détail complet (coordonnées géographiques, abscisse curviligne, caractéristiques morphologiques, codes des stations limnimétriques amont et aval, etc.) des 77 stations virtuelles définies dans le cadre de la thèse est donné en annexe A.5, page 282.

7.3.1.2 Stations virtuelles du produit CASH

La figure 7.3 donne un aperçu de la répartition des 10 stations virtuelles définies dans le cadre du projet CASH, sur le bassin amazonien, aux intersections entre quelques grands fleuves et les traces de l'orbite TPa/J1/J2⁵.

Certaines de ces stations virtuelles correspondent aux mêmes intersections que les stations virtuelles définies dans le cadre de cette thèse (cf. § A.5) et que celles de [Birkett et al., 2002]. La table 7.2 permet d'établir la correspondance entre ces stations virtuelles. Au total, neuf stations virtuelles du projet CASH correspondent à des stations virtuelles « Thèse ».

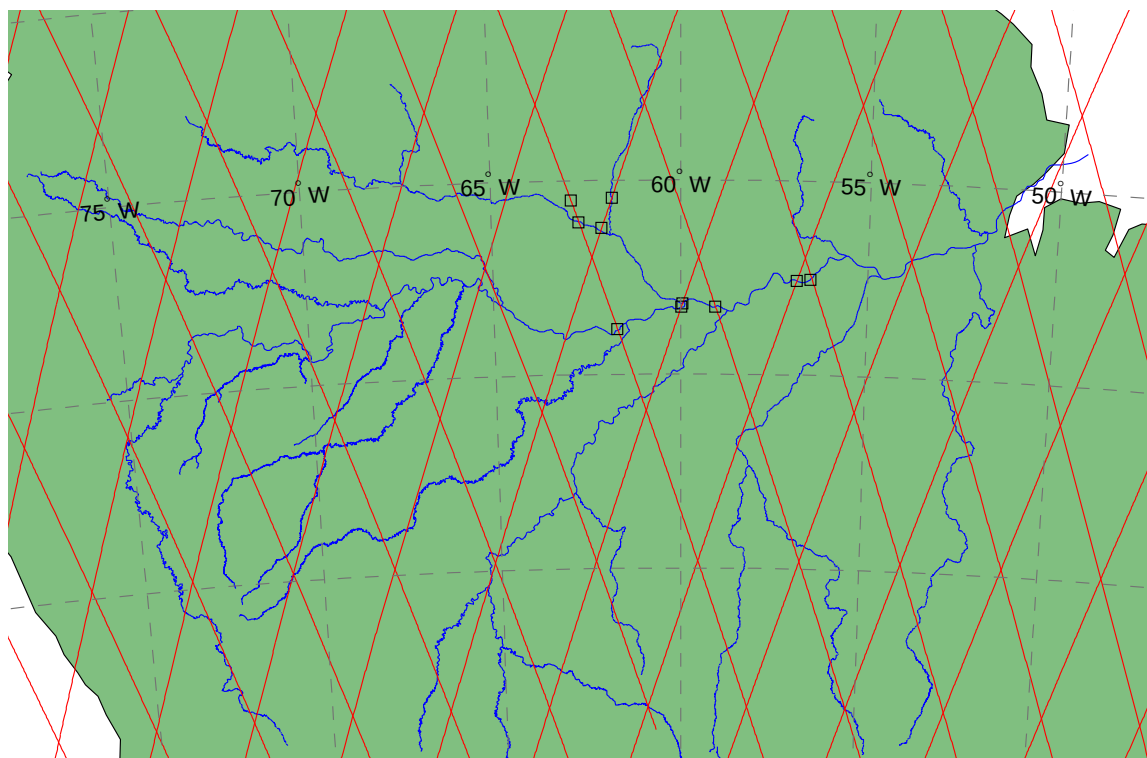


FIG. 7.3: Carte des 10 stations virtuelles (carrés noirs) du projet CASH définies sur quelques grands fleuves du bassin amazonien aux intersections avec les traces (traits rouges) de l'orbite à 10 jours de Topex/Poseidon (première orbite), Jason-1 et Jason-2 (Projection cylindrique équidistante).

Le détail complet (coordonnées géographiques, abscisse curviligne, caractéristiques morphologiques, codes des stations limnimétriques amont et aval, etc.) des 10 stations virtuelles définies dans le cadre du projet CASH est donné en annexe A.2, page 278.

7.3.1.3 Stations virtuelles du produit River & Lake Hydrology

La figure 7.4 donne un aperçu de la répartition des 93 stations virtuelles définies par le Cemagref pour l'extraction des produits alti-hydrologiques du projet « River & Lake Hydrology » sur le bassin

⁵Deux autres stations virtuelles du projet CASH sur le bassin amazonien n'ont pu être utilisées en raison de l'impossibilité de reconstituer les séries temporelles in-situ : l'une proche de l'embouchure et soumise à la marée océanique, l'autre sur une rivière sur laquelle on ne dispose pas de données in-situ.

amazonien, aux intersections entre les principaux fleuves et les traces de l'orbite ERS-2 à 35 jours⁶.

Les figures 7.5 et 7.6 donnent un aperçu des 42 et 43 stations virtuelles effectivement traitées par De Montfort University respectivement sur les produits alti-hydrologiques RLH/ENVISAT et RLH/ERS-2.

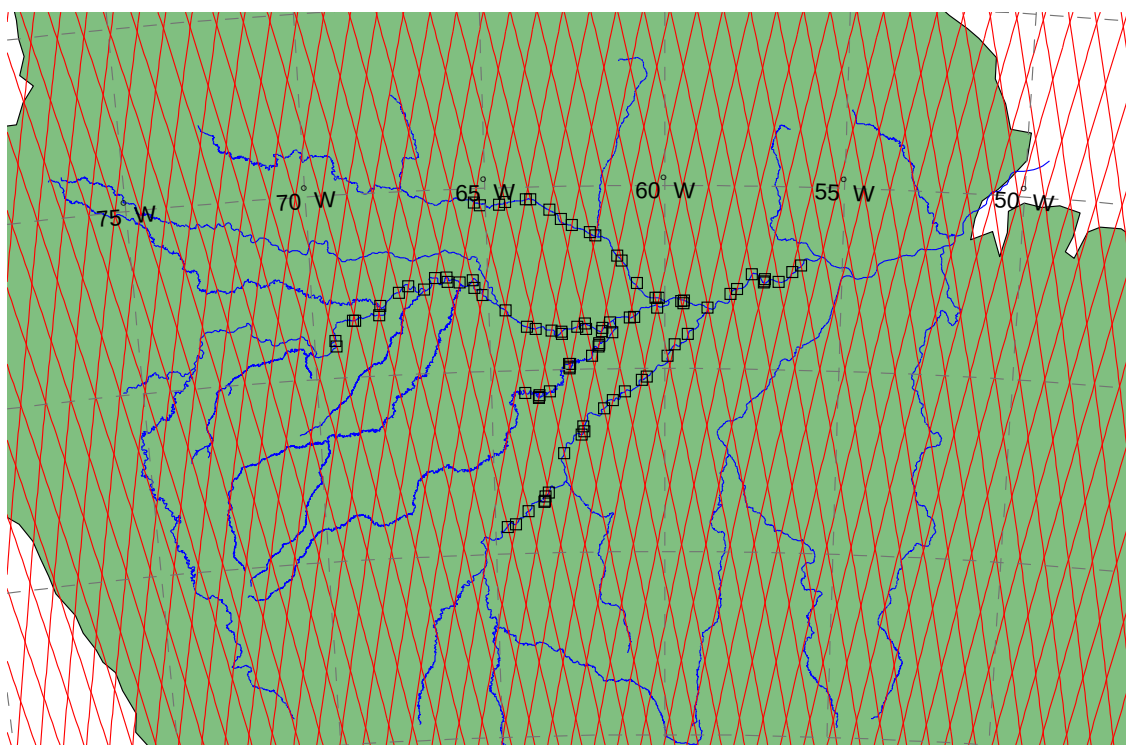


FIG. 7.4: Carte des 93 stations virtuelles (carrés noirs) définies sur quelques grands fleuves du bassin amazonien pour l'extraction des produits alti-hydrologiques « River & Lake Hydrology » aux intersections avec les traces (traits rouges) de l'orbite à 35 jours de ERS-2 et ENVISAT (Projection cylindrique équidistante).

Nota : De Montfort University n'a pas pu générer des séries temporelles alti-hydrologiques pour l'ensemble de ces stations virtuelles : 42 d'entre elles ont permis l'extraction de séries temporelles pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT (cf. carte 7.5) et 43 pour le produit alti-hydrologique RLH/ERS-2 (cf. carte 7.6). L'ensemble des séries temporelles alti-hydrologiques fournies par De Montfort University couvre ainsi 50 stations virtuelles différentes parmi les 93 initialement demandées.

Le détail complet (coordonnées géographiques, abscisse curviligne, caractéristiques morphologiques, codes des stations limnimétriques amont et aval, etc.) des 93 stations virtuelles définies dans le cadre du partenariat avec De Montfort University pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology est donné en annexe A.4, page 279.

⁶Ces intersections correspondent à des configurations où la continuité hydraulique du cours d'eau (pas de chutes) et la présence de stations limnimétriques amont et aval nivelées permettent d'envisager la reconstitution de la série temporelle in-situ à la station virtuelle. Leur nombre a volontairement été limité à une centaine (93 exactement).

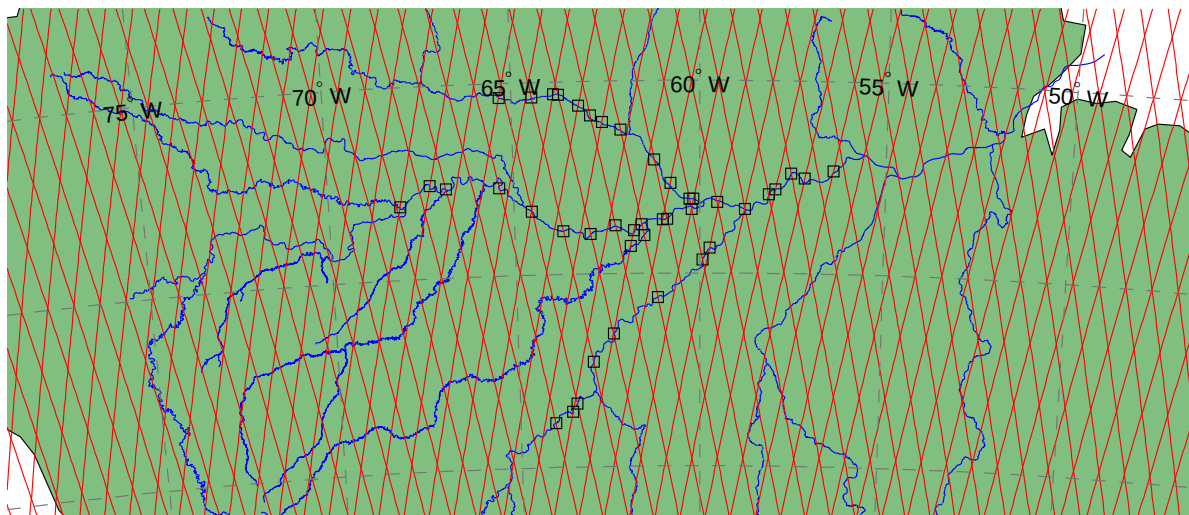


FIG. 7.5: Carte des 42 stations virtuelles ENVISAT (carrés noirs) définies sur quelques grands fleuves du bassin amazonien pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT aux intersections avec les traces (traits rouges) de l'orbite à 35 jours de ERS-2 et ENVISAT (Projection cylindrique équidistante).

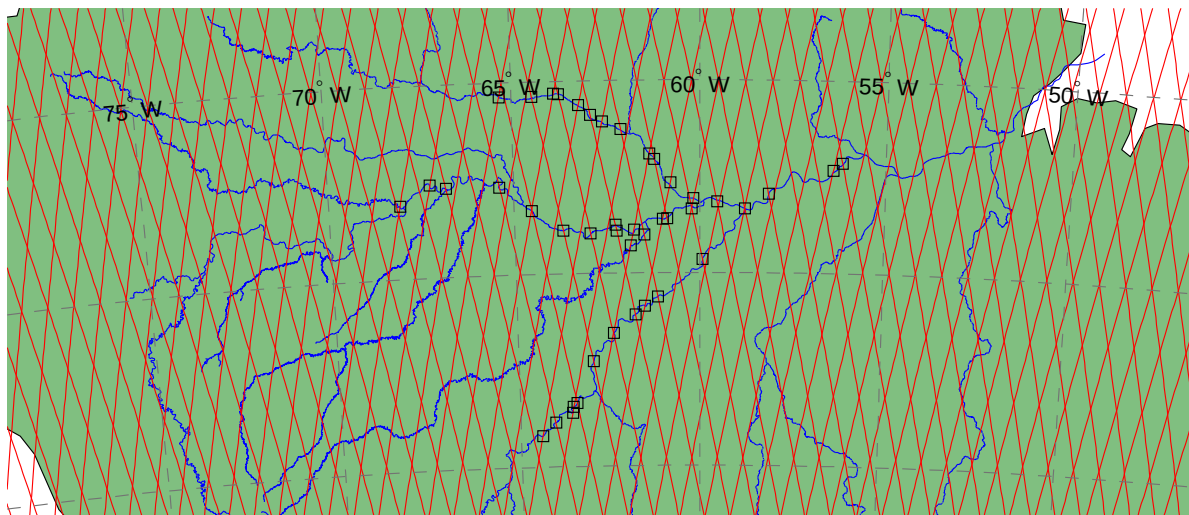


FIG. 7.6: Carte des 43 stations virtuelles ERS-2 (carrés noirs) définies sur quelques grands fleuves du bassin amazonien pour le produit alti-hydrologique RLH/ERS-2 aux intersections avec les traces de (traits rouges) de l'orbite à 35 jours de ERS-2 et ENVISAT (Projection cylindrique équidistante).

7.3.1.4 Stations virtuelles définies par [Birkett et al., 2002]

La figure 7.7 donne un aperçu de la répartition des 14 stations virtuelles définies par Birkett et al. dans [Birkett et al., 2002], aux intersections entre les principaux fleuves du bassin amazonien et les traces de l'orbite TPa/J1/J2⁷.

Certaines de ces stations virtuelles sont définies aux mêmes intersections que les stations virtuelles définies dans le cadre de cette thèse (cf. § A.5) et que celles du projet CASH. La table 7.2 permet d'établir la correspondance toutes ces stations virtuelles.

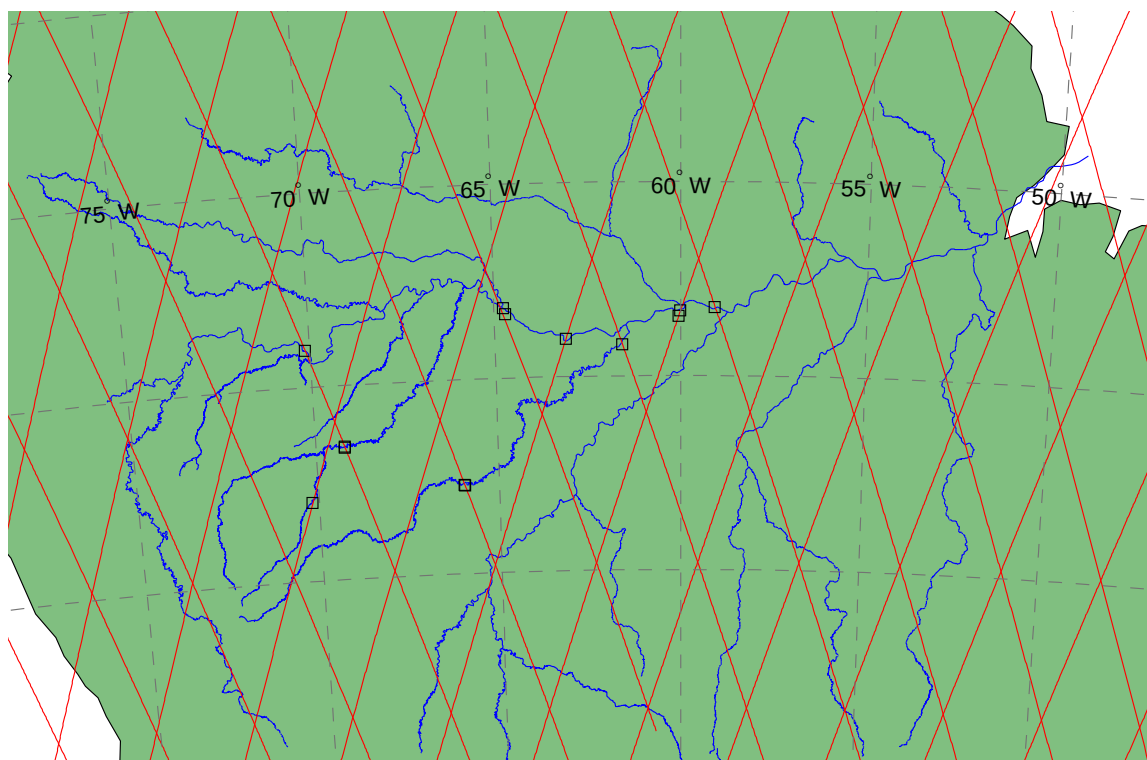


FIG. 7.7: Carte des 14 stations virtuelles (carrés noirs) définies par [Birkett et al., 2002] sur quelques fleuves du bassin amazonien aux intersections avec les traces (traits rouges) de l'orbite à 10 jours de Topex/Poseidon (première orbite), Jason-1 et Jason-2 (Projection cylindrique équidistante).

Le détail complet (coordonnées géographiques, abscisse curviligne, caractéristiques morphologiques, codes des stations limnimétriques amont et aval, etc.) des 14 stations virtuelles définies par [Birkett et al., 2002] est donné en annexe A.3, page 278.

Table de correspondance entre les stations virtuelles sur la première orbite de Topex/Poseidon

La table 7.2 présente la liste des correspondances entre les stations virtuelles de la thèse, du projet CASH et de [Birkett et al., 2002] (cours d'eau seulement).

Au final, les nombres de correspondances suivantes sont validées :

- Thèse $\leftarrow 9 \rightarrow$ CASH
- Thèse $\leftarrow 11 \rightarrow$ [Birkett et al., 2002]
- CASH $\leftarrow 3 \rightarrow$ [Birkett et al., 2002]

⁷Vingt autres stations virtuelles définies par Birkett et al. correspondent à des zones d'inondation : nous ne les avons pas retenues dans le cadre de cette étude.

Stations virtuelles de la Thèse	Stations virtuelles du projet CASH	Stations virtuelles de [Birkett et al., 2002]
TP-139A-Amazon	TP-CASH-139A-Amazon	-
TP-152A-Amazon	TP-CASH-152A-Amazon	TPA-152A-Amazon-Bir ¹
TP-228A-Amazon	TP-CASH-228A-Amazon	-
TP-241C-Branco	TP-CASH-241A-Branco	-
TP-102A-Jurua	-	TPA-102A-Jurua-Bir ¹
TP-063A-Negro	TP-CASH-063A-Negro	TPA-063A-Negro-Bir ²
TP-076A-Negro	TP-CASH-076A-Negro	-
TP-241A-Negro	TP-CASH-241A-Negro	-
TP-076A-Purus	-	TPA-076A-Purus-Bir ¹
TP-076A-Purus	-	TPA-076B-Purus-Bir
TP-178A-Purus	-	TPA-178B-Purus-Bir ¹
TP-063B-Solimoes	TP-CASH-063A-Solimoes	TPA-063B-Solimoes-Bir ²
TP-076A-Solimoes	TP-CASH-076A-Solimoes	-
TP-102B-Solimoes	-	TPA-102A-Solimoes-Bir
TP-241A-Solimoes	-	TPA-241A-Solimoes-Bir ¹
TP-254A-Solimoes	-	TPA-254B-Solimoes-Bir ³
TP-254C-Solimoes	-	TPA-254A-Solimoes-Bir
TP-089I-Tarauaca	-	TPA-089A-Embira-Bir ¹

¹ Stations virtuelles incluant quelques kilomètres des zones inondables.
² Stations virtuelles incluant de grandes zones inondables.
³ Stations virtuelles incluant un lac.

TAB. 7.2: Table de correspondance entre les stations virtuelles de la thèse avec les stations virtuelles du projet CASH et les stations virtuelles de [Birkett et al., 2002].

7.3.2 Critères de sélection des stations virtuelles et séries temporelles alti-hydrologiques

Pour être pris en compte dans les calculs de qualité du produit alti-hydrologique, les stations virtuelles et les séries temporelles alti-hydrologiques correspondantes doivent vérifier quatre conditions que nous présentons ci-dessous.

7.3.2.1 Critères de sélection des stations virtuelles : longueur et fiabilité des séries temporelles in-situ reconstituées

Nous posons deux conditions pour la prise en compte d'une station virtuelle, la première sur la longueur de la série temporelle in-situ reconstituée, la seconde sur sa fiabilité :

Condition 1 : Nous devons être en mesure de reconstituer la série temporelle in-situ sur un horizon temporel significatif, que nous avons fixé au tiers de la durée de la mission sur l'orbite considérée. Pour cela, la reconstitution doit s'appuyer sur des stations limnimétriques couvrant au minimum trois quart de la durée de la mission.

Condition 2 : La série temporelle in-situ reconstituée doit présenter une précision suffisante. Nous avons pour cela fixé un seuil de 0,6m sur les valeurs de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$. Ce critère revient à considérer que si l'écart-type de l'erreur de reconstitution dépasse ce seuil, la station virtuelle n'est pas suffisamment fiable pour une évaluation de la qualité des mesures altimétriques.

Deux éléments ont été pris en considération pour fixer cette valeur seuil à 0,6m : (1) ce seuil correspond à peu près à « la moyenne plus un écart-type » de l'ensemble des estimations de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ sur 181 stations virtuelles (cf. histogramme 6.8) et (2) il permet de garder un nombre statistiquement significatif de stations virtuelles pour chacun des produits alti-hydrologiques tout en restant dans une gamme de valeurs hydrologiquement acceptables,

Si l'une de ces conditions n'est pas respectée, la station virtuelle est écartée du processus de quantification de la qualité.

7.3.2.2 Critères de prise en compte des séries temporelles alti-hydrologiques : représentativité du cycle hydrologique et nombre minimal de mesures altimétriques appariées aux mesures in-situ reconstituées

Les deux conditions pour la prise en compte d'une série temporelle alti-hydrologique ont été posées au chapitre 5 (cf. § 5.4.1), nous les rappelons ici brièvement :

Condition 3 (cf. éq. (5.12)) : Elle porte sur une durée minimum de la série temporelle in-situ reconstituée (exprimée en nombre équivalent de cycles hydrologiques annuels) sur l'horizon conjoint entre les deux séries temporelles (alti-hydrologique et in-situ reconstituée). Cette durée minimum a été fixée à 2 équivalents de cycles hydrologiques. Ce critère garantit à minima une analyse de la qualité du produit alti-hydrologique sur l'équivalent de 2 cycles hydrologiques complets.

Condition 4 (cf. éq. (5.13)) : Elle porte sur un nombre minimum de mesures altimétriques disponibles pour l'analyse de la qualité du produit alti-hydrologique. Ce nombre minimum a été fixé de façon à couvrir l'équivalent d'une année complète d'acquisition, soit $N_{min} = 365,25 \text{ jours} / T_{Sat}$. Ce critère garantit l'analyse de la qualité sur un nombre significatif de mesures.

Si l'une de ces deux conditions n'est respectée, la série temporelle alti-hydrologique est écartée et ses indicateurs de qualité ne sont pas comptabilisés dans l'analyse de la qualité globale du produit alti-hydrologique auquel elle appartient.

7.3.2.3 Mise en œuvre des critères

La table 7.3 présente pour chacun des produits alti-hydrologiques que nous avons traités le nombre initial de stations virtuelles, le nombre de stations virtuelles et/ou séries temporelles alti-hydrologiques rejetées par application des critères 1, 2, 3 et 4 et le nombre final de stations virtuelles (équivalent séries temporelles alti-hydrologiques) utilisées pour l'analyse de la qualité.

7.3.3 Représentations de la qualité d'un produit alti-hydrologique

La quantification de la qualité d'un produit alti-hydrologique sur un grand nombre de stations virtuelles mobilise un important volume de résultats ce qui rend difficile leur lecture d'ensemble. Pour palier à cela, nous proposons une représentation graphique synthétique de la qualité globale des produits alti-hydrologiques, au sens « altimétrique », à l'aide des deux indicateurs suivants :

- la valeur RMS estimée de l'erreur ($R\hat{M}S_{\varepsilon_{Sat}}$) : permet de rendre de compte à la fois de l'erreur systématique⁸ et de la dispersion des mesures altimétriques,
- le taux de pertes de mesures (η_{eff}) : permet de rendre compte de la capacité des algorithmes de tracking/retracking à acquérir les mesures. Ce taux est calculé en comparant la période d'échantillonnage effective (T_{eff}) des séries temporelles à la périodicité de passage sur site du satellite (T_{Sat}).

La représentation graphique de $R\hat{M}S_{\varepsilon_{Sat}}$ en fonction de η_{eff} permet d'avoir un aperçu rapide de la qualité globale d'un produit alti-hydrologique : le point de coordonnées $[R\hat{M}S_{\varepsilon_{Sat}}(n), \eta_{eff}(n)]$ représente les résultats obtenus par la $n^{\text{ème}}$ station virtuelle. Ainsi, la qualité du produit alti-hydrologique est meilleure lorsque le nuage de points est proche de l'origine des axes, elle est moins bonne lorsque le nuage de points en est loin.

La figure 7.8 fournit un exemple de cette représentation graphique qui sera utilisée dans la suite de ce chapitre pour rendre compte de la qualité d'un produit alti-hydrologique.

⁸Une fois les mesures altimétriques de hautes eaux et les mesures in-situ reconstituées de hautes eaux ajustées par translation.

Produit	Tracker	Chaîne	Mission	Nb SV initial	Rejets par critères			Nb SV final
					1&2	3	4	
CASH	mixture	n.c.	T/P	10	-1	-	-	9
River & Lake	expert	n.c.	Envisat	42	-1	-	-	41
River & Lake	expert	n.c.	ERS-2	43	-1	-	-	42
[~Birkett 2002]	ocean	fg3s-fcr2p5s-opp	T/P	14	-5	-	-	9
AVISO	ocean	opp	T/P	77	-16	-	-1	60
AVISO	ocean	opp-fg3s	T/P	77	-16	-	-1	60
AVISO	ocean	opp-fg3s-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-1	60
AVISO	ocean	opp-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-1	60
AVISO	ocean	fg3s-opp	T/P	77	-16	-	-1	60
AVISO	ocean	fg3s-fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-1	60
AVISO	ocean	fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-1	60
CLS	clsmix	opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	clsmix	opp-fg3s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	clsmix	opp-fg3s-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	clsmix	opp-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	clsmix	fg3s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	clsmix	fg3s-fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	clsmix	fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice1	opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice1	opp-fg3s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice1	opp-fg3s-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice1	opp-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice1	fg3s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice1	fg3s-fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice1	fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice2	opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice2	opp-fg3s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice2	opp-fg3s-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice2	opp-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice2	fg3s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice2	fg3s-fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ice2	fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ocean	opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ocean	opp-fg3s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ocean	opp-fg3s-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ocean	opp-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ocean	fg3s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ocean	fg3s-fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	ocean	fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	seaice	opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	seaice	opp-fg3s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	seaice	opp-fg3s-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	seaice	opp-fcr2p5s	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	seaice	fg3s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	seaice	fg3s-fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61
CLS	seaice	fcr2p5s-opp	T/P	77	-16	-	-	61

TAB. 7.3: Nombre de stations virtuelles et/ou séries temporelles alti-hydrologiques écartées de l'analyse globale de la qualité des produits alti-hydrologiques, par application des critères présentés à la section 7.3.2. Par ailleurs, sur les 50 stations virtuelles demandées pour le produit River & Lake Hydrology, seules 42 et 43 nous ont été fournies sans qu'il soit possible de savoir pour quelle raisons les produits alti-hydrologiques n'ont pu être déterminés sur la cinquantaine de stations virtuelles manquantes.

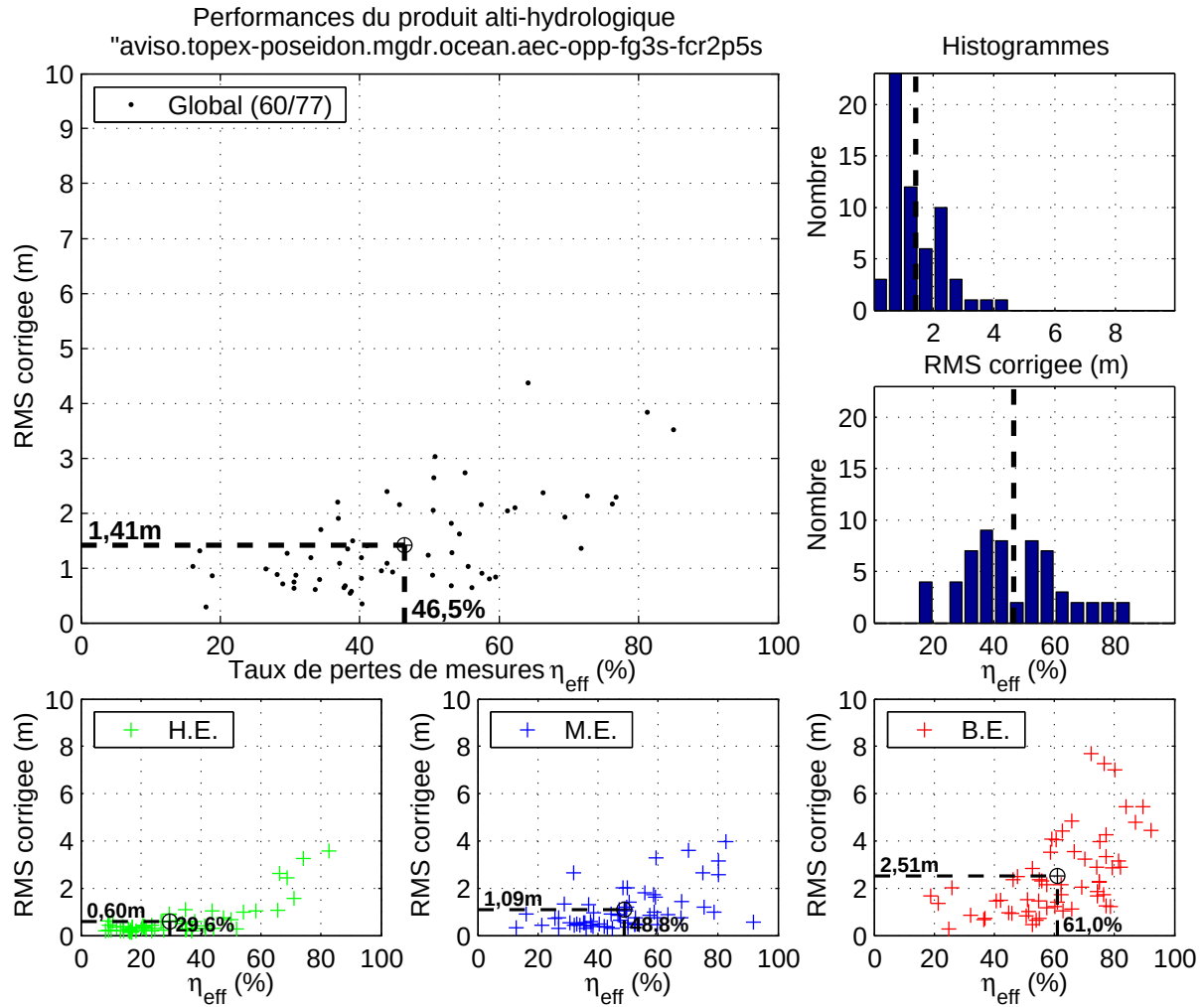


FIG. 7.8: Exemple de représentation graphique synthétique de la qualité du produit alti-hydrologique AVISO/M-GDR/aec-opp-fg3s-fcr2p5s (Topex/Poseidon) pour les 77 stations virtuelles définies par la première orbite de Topex/Poseidon sur le bassin amazonien ("aec-opp-fg3s-fcr2p5s" signifie que les étapes suivantes ont été appliquées au produit altimétrique AVISO/M-GDR : "critères de sélection AVISO" - "une mesure par passage" - "filtrage global ($K = 3$)" - "filtrage calendaire, variante récurrente $K = 2, 5$; $\Delta T/2 = 15$ jours").

Sur tous les graphiques $R\hat{M}S_\varepsilon = f(\eta_{\text{eff}})$: Chaque point représente la qualité d'une série temporelle alti-hydrologique (extraite du produit alti-hydrologique sur une des stations virtuelles). Cette qualité est exprimée en ordonnées par la précision de mesure ($R\hat{M}S_\varepsilon$, notée « RMS corrigée » sur les graphes) et en abscisses par le taux de pertes (η_{eff} , un taux de pertes de 50% indique que en moyenne on obtient une mesure valide pour deux passages du satellite).

Les figures inférieures présentent la même analyse pour les périodes de hautes eaux (vert), moyennes eaux (bleu) et basses eaux (rouge).

Les histogrammes sur la droite illustrent la distribution des grandeurs $R\hat{M}S_\varepsilon$ et η_{eff} pour la période globale.

Ainsi, pour ce produit alti-hydrologique issu de données Topex/Poseidon, le taux de pertes moyen est de 46,5% ($T_{\text{eff}} = 21,5$ jours) et l'erreur moyenne (RMS) est de 1,41m. On note que la qualité du produit alti-hydrologique est nettement meilleure en hautes eaux (29,6% ; 0,60m) qu'en basses eaux (61,0% ; 2,51m).

7.4 Quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques

Dans cette section, nous appliquons la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques à 46 produits alti-hydrologiques différents :

- 3 produits alti-hydrologiques disponibles issus de projets : CASH, River & Lake Hydrology/ENVI-SAT et River & Lake Hydrology/ERS-2,
- 1 produit alti-hydrologique reconstitué à partir des informations disponibles dans l'article [Birkett et al., 2002] : [~Birkett 2002],
- 6 groupes de 7 produits alti-hydrologiques chacun construits dans le cadre de cette thèse : un groupe correspond à un produit altimétrique et à un (re)tracker auxquels sont appliqués 7 chaînes différentes de filtrage automatiques (cf. section 7.2.2). Les indicateurs de qualité moyens obtenus par chacun des produits alti-hydrologiques du groupe sont présentés dans une même table, et le meilleur produit alti-hydrologique du groupe fait l'objet d'une analyse plus détaillée illustrée par une figure de type $R\hat{M}S_{\varepsilon_{Sat}} = f(\eta_{\text{eff}})$ et une table présentant la moyenne des indicateurs de qualité.

L'intégralité des 46 figures et tables illustrant la qualité de tous les produits alti-hydrologiques générés dans le cadre de la thèse sont présentés en annexe B (page 290).

Enfin, la table récapitulative 7.20 permettra au lecteur de prendre aisément connaissance de l'ensemble des résultats. La comparaison de la qualité de ces produits alti-hydrologiques fait l'objet de la section 7.5.

Nota : *La prochaine page a été laissée vierge de manière à permettre la présentation des résultats de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques sur deux pages voisines : d'une part les commentaires d'analyse (pages de gauche) et d'autre part les figure et table (pages de droite).*

7.4.1 CASH (Topex/Poseidon)

Le produit alti-hydrologique du projet CASH propose des séries temporelles alti-hydrologiques prêtes à l'emploi sur 89 stations virtuelles réparties sur plusieurs grands bassins hydrologiques du globe. Parmi ces 89 stations virtuelles, seules 10 sont établies sur des fleuves du bassin amazonien, dont une pour laquelle nous ne sommes pas en mesure de reconstituer la série temporelle in-situ reconstituée. Notre évaluation de la qualité du produit alti-hydrologique a donc été menée sur 9 stations virtuelles.

Ce produit alti-hydrologique est issu du travail de retracking des mesures altimétriques de Topex/Poseidon mené par l'équipe de CLS pour le projet CASH. Ce produit est dérivé du produit altimétrique « CLS- Topex/Poseidon- ENVISAT/L2 » et intègre les valeurs de range estimées par les quatre algorithmes de retracking (Ocean, Ice1, iceB et SeaIce) implémentés dans le segment sol de la mission ENVISAT. On peut donc supposer que ce produit tente de tirer le meilleur de ces quatre retrackers.

Notons que le produit altimétrique « CLS mixé » construit dans le cadre de cette thèse intègre lui aussi les valeurs de range estimées par les quatre algorithmes de retracking. Le produit CASH sur 10 stations virtuelles s'apparente donc à un sous-ensemble du produit CLS mixé dont nous analysons plus loin la qualité.

Analyse des indicateurs de qualité

Après la mise en œuvre de notre méthode sur les 9 séries temporelles alti-hydrologiques de ce produit, nous trouvons en moyenne sur l'ensemble de ces stations virtuelles, une précision RMS de 1,15m ($0,40 \pm 1,06$ m).

Le taux de pertes moyen de mesures altimétriques du produit est de 28,3% et donne une période d'échantillonnage effective de 13,9 jours.

Le jeu des 9 séries temporelles in-situ reconstituées présente les caractéristiques moyennes suivantes (cf. chapitre 5, page 120) :

- un « nombre équivalent moyen de cycles hydrologiques annuels » ($\tilde{N}_{CA}$) de 8,0 années,
- un taux de disponibilité η_d de 87,6%,

Sa représentativité hydrologique est bonne⁹.

La figure 7.9 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 9 stations virtuelles. La table 7.4 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

Ce produit alti-hydrologique étant construit à partir des mesures de Topex/Poseidon, certaines de ces stations virtuelles sont définies sur les mêmes intersections trace/fleuve que les stations virtuelles des produits alti-hydrologiques générés dans le cadre de cette thèse (cf. 7.4).

Nous pourrions donc comparer sur un même jeu de stations virtuelles les indicateurs de qualité respectifs de ces produits alti-hydrologiques (cf. 7.5.4.2).

⁹La représentativité hydrologique d'un jeu de séries temporelles in-situ reconstituées utilisé pour évaluer la qualité d'un produit alti-hydrologique est caractérisée à partir de la moins bonne valeur des deux indicateurs :

- η_d : taux de disponibilité : 50% < acceptable < 75% < bon < 90% < excellent
- $\tilde{N}_{CA}$: nombre équivalent moyen de cycles hydrologiques annuels : 2 < acceptable < 5 < bon < 8 < excellent



TAB. 7.4: Table des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique CASH.

7.4.2 River & Lake Hydrology/ENVISAT

Le produit alti-hydrologique du projet River & Lake propose des séries temporelles alti-hydrologiques issues de la mission ENVISAT sur des stations virtuelles de lacs et cours d'eau de différents continents.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons demandé au projet River & Lake les séries temporelles alti-hydrologiques sur 93 stations virtuelles définies sur les fleuves du bassin amazonien Amazone, Solimões, Negro, Madeira et Purus. L'équipe de De Montfort University en charge du projet River & Lake nous a fourni les séries temporelles alti-hydrologiques sur 42 de ces 93 stations virtuelles initialement demandées (cf. § 7.2.1.2).

Parmi ces 42 stations virtuelles, une seule n'a pas pu faire l'objet d'une reconstitution de la série temporelle in-situ reconstituée. Notre évaluation de la qualité du produit alti-hydrologique a donc été menée sur 41 stations virtuelles.

Nota : Nous rappelons que la période d'échantillonnage théorique (T_{Sat}) de la mission altimétrique ENVISAT est de 35 jours, soit 3,5 fois celle de Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2.

Analyse des indicateurs de qualité

Après la mise en œuvre de notre méthode sur les 41 séries temporelles alti-hydrologiques retenues, nous trouvons en moyenne sur l'ensemble de ces stations virtuelles, une précision RMS de 0,77m ($0,15 \pm 0,71$ m).

Le taux de pertes moyen de mesures altimétriques du produit est de 13,8% et donne une période d'échantillonnage effective de 41,6 jours.

Le jeu des 41 séries temporelles in-situ reconstituées présente les caractéristiques moyennes suivantes (cf. chapitre 5, page 120) :

- un « nombre équivalent moyen de cycles hydrologiques annuels » ($\tilde{N}_{CA}$) de 3,6 années,
- un taux de disponibilité η_d de 89,3%,

Sa représentativité hydrologique est acceptable (cf. note en bas de page 188).

La figure 7.10 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 41 stations virtuelles. La table 7.5 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

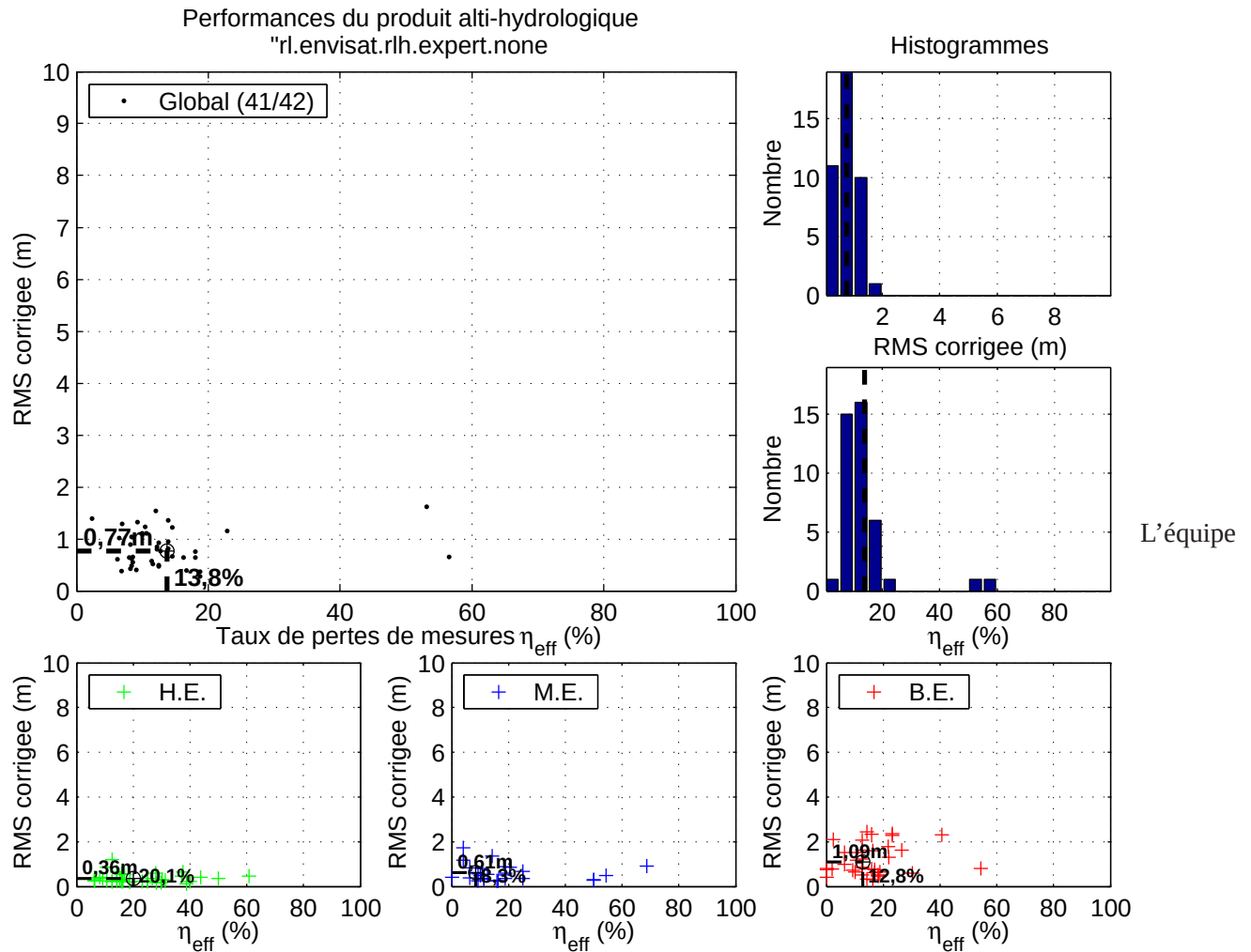


FIG. 7.10: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ENVISAT.

de De Montfort University en charge du projet River & Lake nous a fourni les séries temporelles alti-hydrologiques sur 43 de ces 93 stations virtuelles initialement demandées (cf. § 7.2.1.2).

**Indicateurs de qualité moyens aux 41 stations virtuelles du
produit alti-hydrologique « River and Lake/rlh/expert/none »**

	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\overline{RMS}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\overline{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	0,77	0,71	0,15	41,6	13,8	0,82	0,77	1,04	0,31
Hautes eaux	0,36	0,36	-0,00	45,6	20,1	0,38	0,39	0,90	0,13
Moyennes eaux	0,61	0,52	0,07	41,3	8,3	0,64	0,58	0,96	0,30
Basses eaux	1,09	0,87	0,39	41,2	12,8	1,12	0,93	1,29	0,38

$\overline{\eta_d} = 89,3\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 94,7\%$; $\tilde{N}_{CA} = 3,6$; $\overline{M_a} = 43,5$ ($\overline{\eta_a} = 93,6\%$)

TAB. 7.5: Table des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ENVISAT.

7.4.3 River & Lake Hydrology/ERS-2

Le produit alti-hydrologique du projet River & Lake propose des séries temporelles alti-hydrologiques issues de la mission ERS-2 sur des stations virtuelles de lacs et cours d'eau de différents continents.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons demandé au projet River & Lake les séries temporelles alti-hydrologiques sur 93 stations virtuelles définies sur les fleuves du bassin amazonien Amazone, Solimões, Negro, Madeira et Purus. L'équipe de De Montfort University en charge du projet River & Lake nous a fourni les séries temporelles alti-hydrologiques sur 43 de ces 93 stations virtuelles initialement demandées (cf. § 7.2.1.2).

Parmi ces 43 stations virtuelles, une seule n'a pas pu faire l'objet d'une reconstitution de la série temporelle in-situ reconstituée. Notre évaluation de la qualité du produit alti-hydrologique a donc été menée sur 42 stations virtuelles.

Nota : Nous rappelons que la période d'échantillonnage théorique (T_{Sat}) de la mission altimétrique ENVISAT est de 35 jours, soit 3,5 fois celle de Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2.

Analyse des indicateurs de qualité

Après la mise en œuvre de notre méthode sur les 42 séries temporelles alti-hydrologiques retenues, nous trouvons en moyenne sur l'ensemble de ces stations virtuelles, une précision RMS de 0,86m ($0,14 \pm 0,80$ m).

Le taux de pertes moyen de mesures altimétriques du produit est de 11,0% et donne une période d'échantillonnage effective de 40,3 jours.

Le jeu des 42 séries temporelles in-situ reconstituées présente les caractéristiques moyennes suivantes (cf. chapitre 5, page 120) :

- un « nombre équivalent moyen de cycles hydrologiques annuels » ($\tilde{N}_{CA}$) de 6,8 années,
- un taux de disponibilité η_d de 92,4%,

Sa représentativité hydrologique est bonne (cf. note en bas de page 188).

La figure 7.11 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 42 stations virtuelles. La table 7.6 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

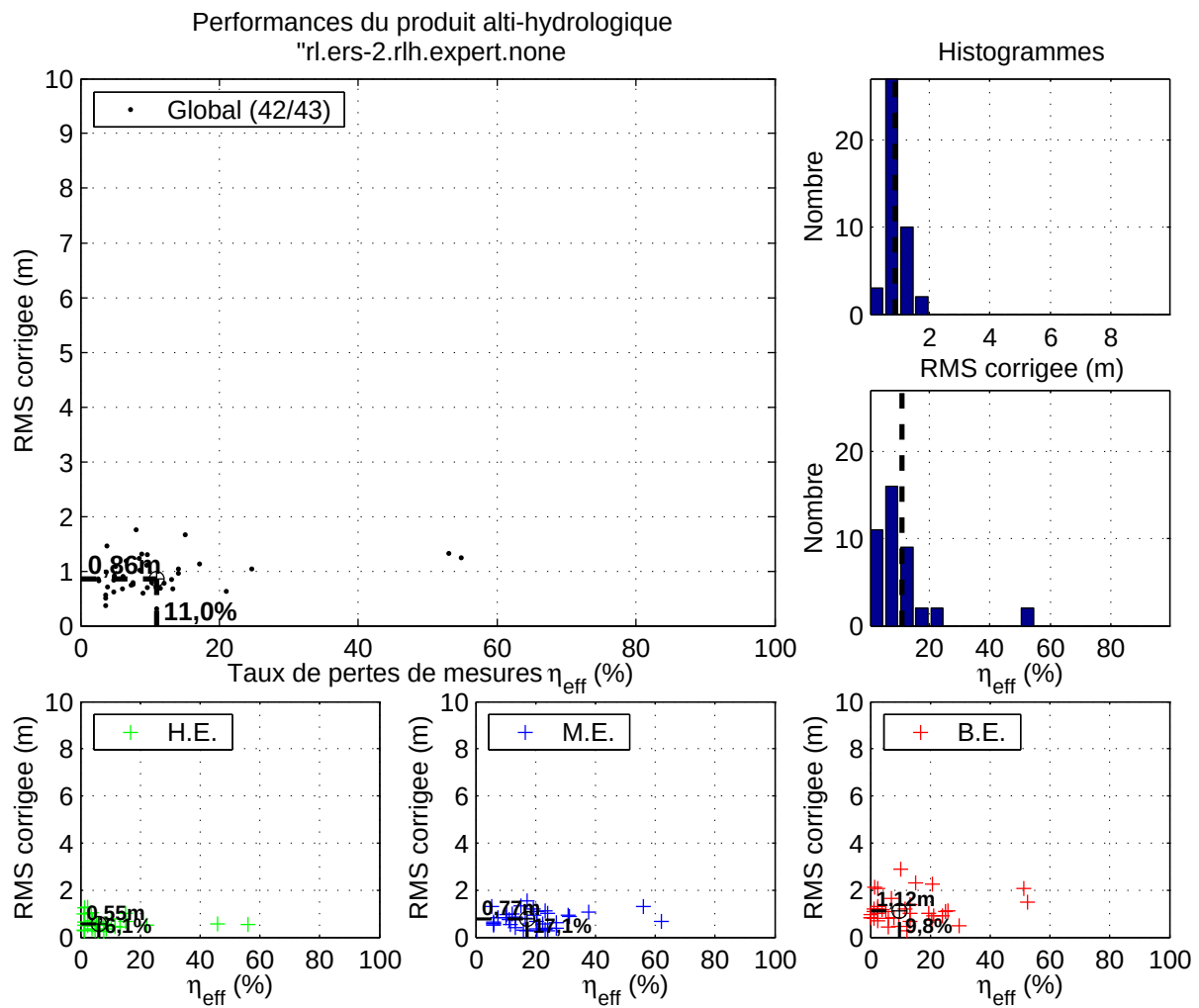


FIG. 7.11: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ERS-2.

Indicateurs de qualité moyens aux 42 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « River and Lake/rlh/expert/none »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	0,86	0,80	0,14	40,3	11,0	0,92	0,86	1,97	0,31
Hautes eaux	0,55	0,56	-0,00	38,3	6,1	0,57	0,59	1,83	0,13
Moyennes eaux	0,77	0,68	0,07	43,9	17,1	0,81	0,74	1,90	0,30
Basses eaux	1,12	0,88	0,34	40,0	9,8	1,16	0,95	2,17	0,38

$\overline{\eta_d} = 92,4\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 97,5\%$; $\tilde{N}_{CA} = 6,8$; $\overline{M_a} = 74,0$ ($\overline{\eta_a} = 93,4\%$)

TAB. 7.6: Table des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ERS-2.

7.4.4 [~Birkett 2002] (Topex/Poseidon)

Dans leur publication [Birkett et al., 2002], Birkett et al. quantifient la précision (RMS) d'un produit alti-hydrologique dérivé du produit altimétrique AVISO/M-GDR, sur 34 stations virtuelles dont 14 sur des cours d'eau et 20 sur des lacs ou des zones inondables.

Nous avons reconstruit ce produit alti-hydrologique pour les 14 stations virtuelles sur des cours d'eau. Les séries temporelles alti-hydrologiques sont construites à partir du produit altimétrique source (AVISO/M-GDR) sur les fenêtres géographiques définies dans la publication [Birkett et al., 2002] et sont filtrées à l'aide de la chaîne de filtrage automatique optimale (cf. section 7.5.1).

Parmi ces 14 stations virtuelles, 5 n'ont pu faire l'objet de reconstitutions suffisamment précises des séries temporelles in-situ et ont été écartées du jeu de stations virtuelles pour l'évaluation de la qualité. Notre évaluation de la qualité du produit alti-hydrologique a donc été menée sur 9 stations virtuelles.

Analyse des indicateurs de qualité

Suite à la mise en œuvre de notre méthode sur les 9 séries temporelles alti-hydrologiques de ce produit, nous trouvons en moyenne sur l'ensemble de ces stations virtuelles, une précision RMS de 1,19m ($0,39 \pm 1,12$ m). Le taux de pertes moyen de mesures altimétriques du produit est de 28,2% et donne une période d'échantillonnage effective de 14,0 jours.

Le jeu des 9 séries temporelles in-situ reconstituées présente les caractéristiques moyennes suivantes (cf. chapitre 5, page 120) :

- un « nombre équivalent moyen de cycles hydrologiques annuels » ($\tilde{N}_{CA}$) de 7,0 années,
- un taux de disponibilité η_d de 81,5%,

Sa représentativité hydrologique est bonne (cf. note en bas de page 188).

La figure 7.12 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur les 9 stations virtuelles. La table 7.7 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

Ce produit alti-hydrologique étant construit à partir des mesures de Topex/Poseidon, certaines de ses stations virtuelles sont définies sur les mêmes intersections trace/fleuve que les stations virtuelles des produits alti-hydrologiques générés dans le cadre de cette thèse (cf. 7.4).

Comparaison des méthodes de quantification de la précision RMS

En supposant que le produit alti-hydrologique que nous avons reconstitué est raisonnablement proche de celui de [Birkett et al., 2002], les différences d'estimation de la précision RMS obtenues par les deux méthodes (notre méthode dont les résultats sont donnés ci-dessus et la méthode employée par [Birkett et al., 2002]) proviennent des façons différentes d'utiliser les séries temporelles in-situ (reconstitution dans notre cas et décalages temporel et vertical dans le cas de Charon Birkett).

Station virtuelle Fenêtre géographique Birkett	RMS (m) Méthode Thèse	RMS (m) Méthode Birkett	Différence (m) Thèse-Birkett
TPA-063A-Negro-Bir	2,17	1,12	1,05
TPA-063B-Solimoes-Bir	1,32	0,70	0,62
TPA-076A-Purus-Bir	1,39	1,15	0,24
TPA-076B-Purus-Bir	1,39	1,73	-0,34
TPA-102A-Solimoes-Bir	0,71	0,59	0,12
TPA-152A-Amazon-Bir	0,56	0,43	0,13
TPA-241A-Solimoes-Bir	1,65	0,86	0,79
TPA-254A-Solimoes-Bir	0,98	0,83	0,15
TPA-254B-Solimoes-Bir	0,49	0,62	-0,13
Moyennes :	1,19	0,89	0,30

Les écarts de résultats illustrés ici peuvent provenir de trois facteurs principaux : (1) les effets de notre méthode de reconstitution ne sont pas parfaitement corrigés et engendrent une erreur supplémentaire, (2) la méthode de filtrage employée par [Birkett et al., 2002] n'est pas précisée et peut amener à de meilleurs résultats que notre chaîne automatique, (3) le décalage temporel visant à minimiser l'erreur RMS opéré par [Birkett et al., 2002] a nécessairement un effet positif sur le résultat final.

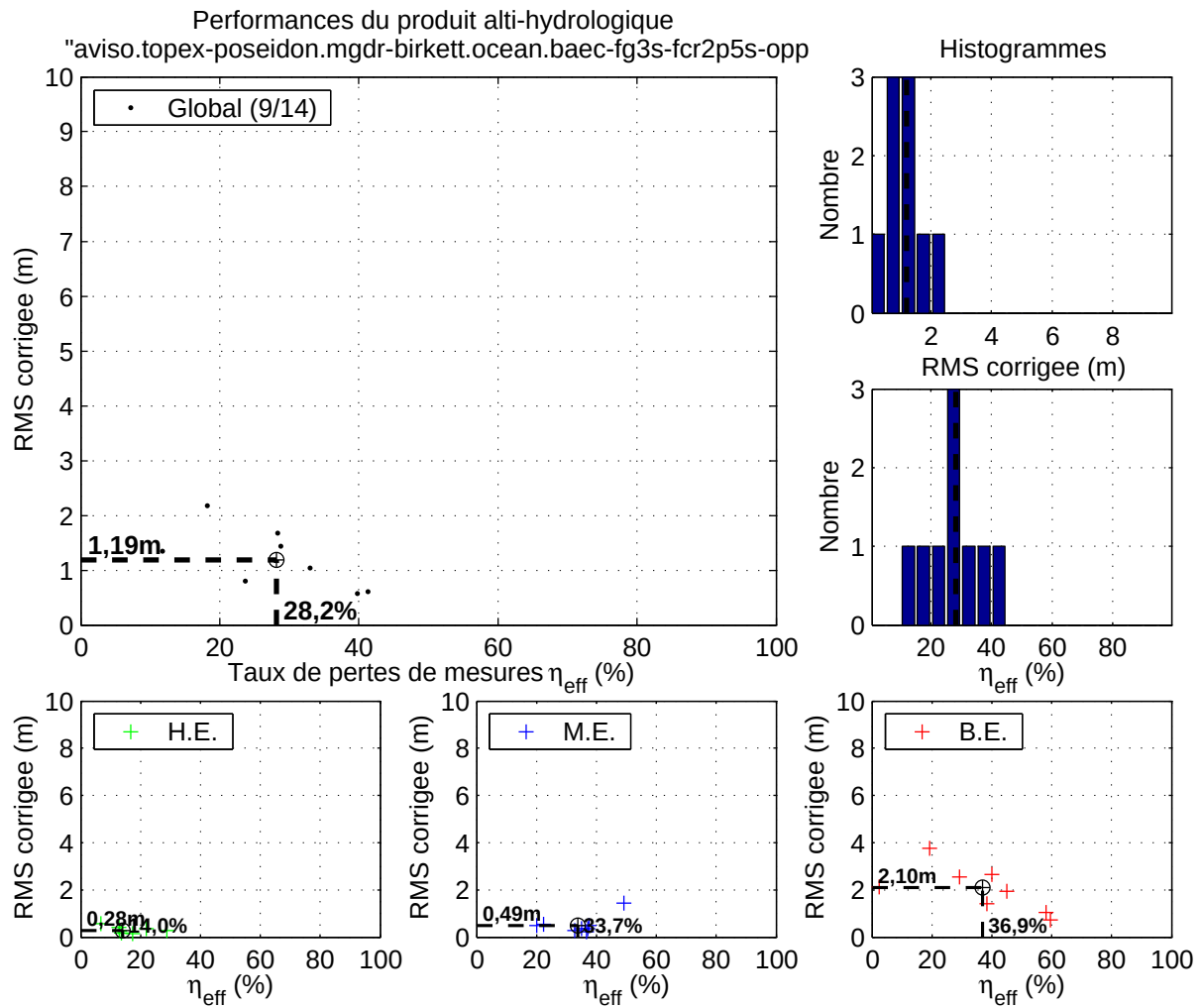


FIG. 7.12: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique [~Birkett 2002] (Topex/Poseidon).

Indicateurs de qualité moyens aux 9 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr-birkett/ocean/baec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$R\hat{M}S_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,19	1,12	0,39	14,0	28,2	1,23	1,17	0,39	0,30
Hautes eaux	0,28	0,28	-0,00	11,6	14,0	0,31	0,31	-0,00	0,13
Moyennes eaux	0,49	0,47	-0,04	15,2	33,7	0,54	0,52	-0,04	0,31
Basses eaux	2,10	1,59	1,33	16,9	36,9	2,12	1,63	1,32	0,32
$\overline{\eta_d} = 81,5\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 96,6\%$; $\tilde{N}_{CA} = 7,0$; $\overline{M_a} = 213,8$ ($\overline{\eta_a} = 82,3\%$)									

TAB. 7.7: Table des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique [~Birkett 2002].

7.4.5 AVISO/M-GDR/Ocean (Topex/Poseidon)

Cette section présente les résultats de quantification de la qualité des 7 produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique AVISO/M-GDR construit à partir des mesures de la mission altimétrique Topex/Poseidon et utilisant le tracker « Ocean ».

Sur 77 stations virtuelles définies aux intersections entre les traces de Topex/Poseidon et les cours d'eau amazoniens, 16 n'ont pu faire l'objet de reconstitutions suffisamment précises des séries temporelles in-situ et une ne présente pas un nombre suffisant de mesures appariées. Notre évaluation de la qualité des produits alti-hydrologiques de ce groupe a donc été menée sur 60 stations virtuelles.

Analyse d'ensemble

La table 7.8 dresse la liste des indicateurs de qualité moyens obtenus par les 7 produits alti-hydrologiques. Les valeurs d'erreur RMS s'étendent de 1,35m ($0,40 \pm 1,27$ m) à 1,82m ($0,41 \pm 1,74$ m). Les taux de pertes de mesures s'étendent de 45,5% ($T_{\text{eff}} = 20,7$ jours) à 47,4% ($T_{\text{eff}} = 21,5$ jours).

Les performances de ces produits sont relativement proches les unes des autres, à l'exception du produit de la famille PB (chaîne « opp ») qui est sensiblement moins bon que les autres.

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique/tracker « aviso.topex-poseidon.mgdr/ocean »										
Chaîne PrdAH ¹	Nb SV ²	$\hat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\hat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)
opp	60	1,82	1,74	0,41	20,7	45,5	1,87	1,80	0,08	0,37
opp-fg3s	60	1,54	1,46	0,40	20,9	45,9	1,59	1,52	0,10	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	60	1,41	1,33	0,39	21,2	46,5	1,47	1,39	0,07	0,37
opp-fcr2p5s	60	1,53	1,46	0,39	21,0	46,3	1,59	1,51	0,05	0,37
fg3s-opp	60	1,50	1,43	0,40	21,1	46,3	1,56	1,48	0,10	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	60	1,35	1,27	0,40	21,5	47,4	1,41	1,33	0,07	0,37
fcr2p5s-opp	60	1,53	1,45	0,41	21,3	46,9	1,59	1,51	0,02	0,37

¹Critères de sélection des mesures employés : "aec"

²Nombre de stations virtuelles utilisées (non-rejetées) sur les 77 disponibles.

TAB. 7.8: Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « AVISO/M-GDR/Ocean ».

Meilleur produit alti-hydrologique : « fg3s-fcr2p5s-opp »

Le meilleur produit alti-hydrologique de ce groupe est le produit de la famille P5 (chaîne « fg3s-fcr2p5s-opp » : filtrage global avec $K = 3$, filtrage calendaire récursif avec $K = 2,5$ et sélection d'une mesure représentative par passage) avec une erreur RMS moyenne de 1,35m ($0,40 \pm 1,27$ m) et un taux de pertes de mesures altimétriques de 47,4% ($T_{\text{eff}} = 21,5$ jours).

Le jeu des 60 séries temporelles in-situ reconstituées présente une bonne représentativité hydrologique (cf. note en bas de page 188) : $\overline{\eta_d} = 77,8\%$ et $\tilde{N}_{CA} = 6,7$.

La figure 7.13 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 60 stations virtuelles. La table 7.9 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

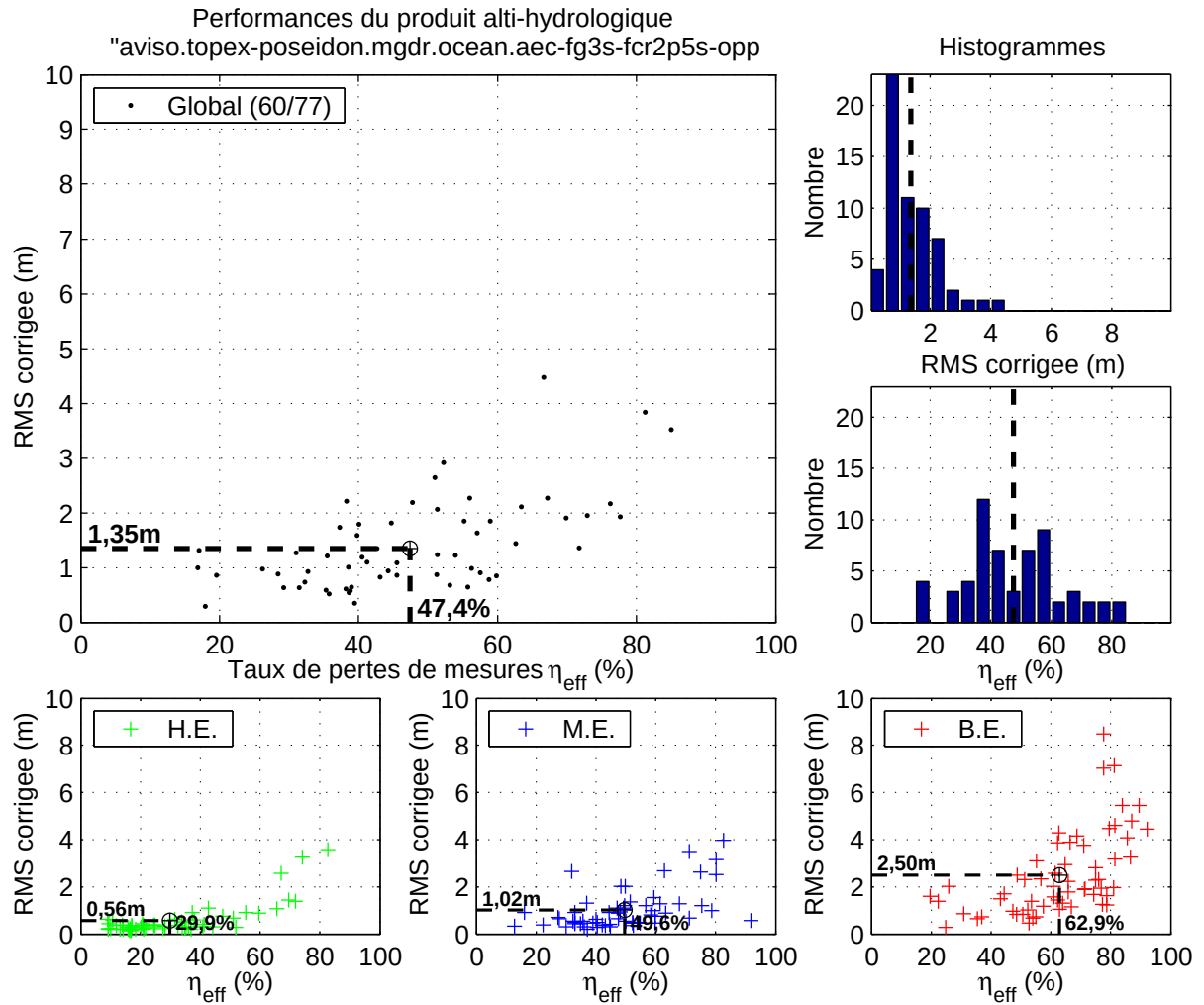


FIG. 7.13: Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe AVISO M-GDR, tracker Ocean (Topex/Poseidon).

Indicateurs de qualité moyens aux 60 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,35	1,27	0,40	21,5	47,4	1,41	1,33	0,07	0,37
Hautes eaux	0,56	0,56	0,00	16,1	29,9	0,59	0,60	-0,33	0,21
Moyennes eaux	1,02	0,93	0,26	23,8	49,6	1,07	1,00	-0,07	0,38
Basses eaux	2,50	1,71	1,58	34,7	62,9	2,52	1,77	1,25	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,4\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,7 ; \overline{M_a} = 152,9 (\overline{\eta_a} = 79,3\%)$									

TAB. 7.9: Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe AVISO M-GDR, tracker Ocean (Topex/Poseidon).

7.4.6 CLS/ENVISAT-L2/Ice1 (Topex/Poseidon)

Cette section présente les résultats de quantification de la qualité des 7 produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 construit à partir des mesures de la mission altimétrique Topex/Poseidon et utilisant le tracker « Ice1 ».

Sur 77 stations virtuelles définies aux intersections entre les traces de Topex/Poseidon et les cours d'eau amazoniens, 16 n'ont pu faire l'objet de reconstitutions suffisamment précises des séries temporelles in-situ. Notre évaluation de la qualité des produits alti-hydrologiques de ce groupe a donc été menée sur 61 stations virtuelles.

Analyse d'ensemble

La table 7.10 dresse la liste des indicateurs de qualité moyens obtenus par les 7 produits alti-hydrologiques. Les valeurs d'erreur RMS s'étendent de 2,45m ($0,77 \pm 2,28$ m) à 151,03m ($0,96 \pm 151,03$ m).

Nous remarquons que les produits alti-hydrologiques issus des familles qui n'utilisent pas le module de filtrage calendaire récursif « fcr2p5s » (PB, P1 et P4) ainsi que le produit « opp-fcr2p5s » (P3) sont caractérisés par des erreurs RMS très importantes allant de 10,82m à 151,56m. Parmi ces produits, le produit issu de la famille PB qui n'utilise aucun module de filtrage est caractérisée par l'erreur RMS la plus importante (151,56m) et est inutilisable.

Les produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 et utilisant le tracker Ice1 devraient donc être générés soit en utilisant conjointement les deux modules de filtrage « fg3s » et « fcr2p5s », soit en utilisant le module « fcr2p5s » suivi du module de sélection d'une mesure représentative par passage « opp ».

Les taux de pertes de mesures s'étendent de 26,3% ($T_{\text{eff}} = 13,6$ jours) à 31,1% ($T_{\text{eff}} = 14,5$ jours).

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique/tracker « cls.topex-poseidon.envisatL2/ice1 »										
Chaîne PrdAH ¹	Nb SV ²	RMS_{ϵ} (m)	$\hat{\sigma}_{\epsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\epsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\epsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
opp	61	151,56	151,03	0,96	13,6	26,3	151,57	151,03	19,34	0,37
opp-fg3s	61	12,36	12,28	0,94	13,7	27,3	12,37	12,30	2,02	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	2,66	2,50	0,76	14,5	31,1	2,70	2,54	1,79	0,37
opp-fcr2p5s	61	13,86	13,41	-1,84	14,5	31,1	13,89	13,45	3,08	0,37
fg3s-opp	61	10,82	10,74	0,96	13,7	27,1	10,83	10,75	1,80	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68	0,37
fcr2p5s-opp	61	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68	0,37

¹Critères de sélection des mesures employés : "cec"

²Nombre de stations virtuelles utilisées (non-rejetées) sur les 77 disponibles.

TAB. 7.10: Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/Ice1 ».

Meilleur produit alti-hydrologique : « fg3s-fcr2p5s-opp »

Le meilleur produit alti-hydrologique de ce groupe est le produit de la famille P5 (chaîne « fg3s-fcr2p5s-opp » : filtrage global avec $K = 3$, filtrage calendaire récursif avec $K = 2, 5$ et sélection d'une mesure représentative par passage) avec une erreur RMS moyenne de 2,45m ($0,77 \pm 2,28$ m) et un taux de pertes de mesures altimétriques de 30,3% ($T_{\text{eff}} = 14,3$ jours).

Le jeu des 61 séries temporelles in-situ reconstituées présente une bonne représentativité hydrologique (cf. note en bas de page 188) : $\overline{\eta_d} = 76,8\%$ et $\tilde{N}_{CA} = 6,6$.

La figure 7.14 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 61 stations virtuelles. La table 7.11 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

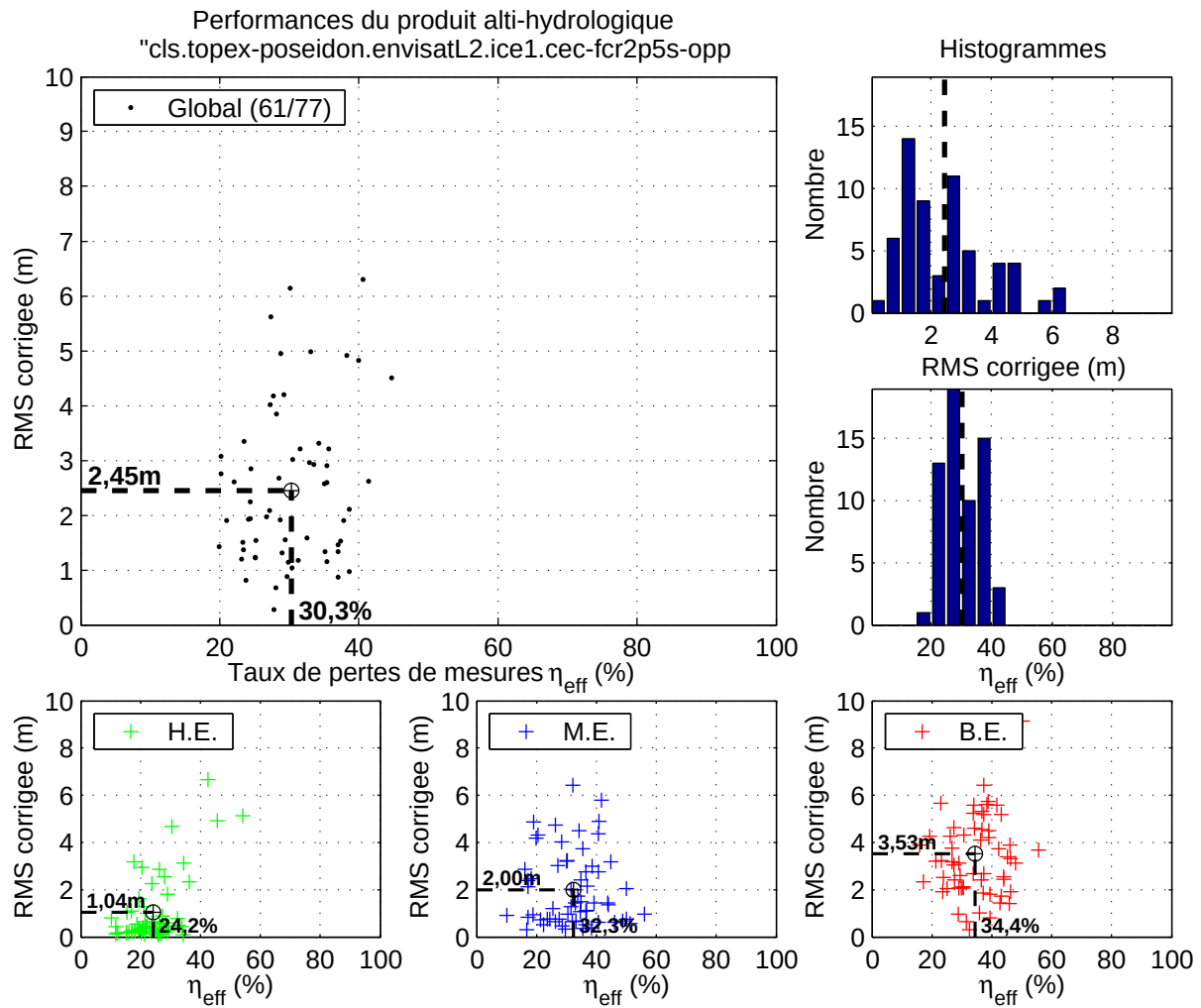


FIG. 7.14: Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ice1 (Topex/Poseidon).

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice1/cec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68	0,37
Hautes eaux	1,04	1,04	-0,00	13,3	24,2	1,06	1,07	0,90	0,21
Moyennes eaux	2,00	1,83	0,55	15,0	32,3	2,03	1,89	1,46	0,38
Basses eaux	3,53	2,80	1,90	15,4	34,4	3,54	2,83	2,80	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 199,5 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$

TAB. 7.11: Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ice1 (Topex/Poseidon).

7.4.7 CLS/ENVISAT-L2/Ice2 (Topex/Poseidon)

Cette section présente les résultats de quantification de la qualité des 7 produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 construit à partir des mesures de la mission altimétrique Topex/Poseidon et utilisant le retracker « Ice2 ».

Sur 77 stations virtuelles définies aux intersections entre les traces de Topex/Poseidon et les cours d'eau amazoniens, 16 n'ont pu faire l'objet de reconstitutions suffisamment précises des séries temporelles in-situ. Notre évaluation de la qualité des produits alti-hydrologiques de ce groupe a donc été menée sur 61 stations virtuelles.

Analyse d'ensemble

La table 7.12 dresse la liste des indicateurs de qualité moyens obtenus par les 7 produits alti-hydrologiques. Les valeurs d'erreur RMS s'étendent de 1,75m ($0,34 \pm 1,69$ m) à 116,99m ($2,69 \pm 116,57$ m).

Nous remarquons que les produits alti-hydrologiques issus des familles qui n'utilisent pas le module de filtrage calendaire récursif « fcr2p5s » (PB, P1 et P4) sont caractérisés par des erreurs RMS très importantes allant de 5,35m à 116,99m. Parmi ces produits, le produit issu de la famille PB qui n'utilise aucun module de filtrage est caractérisée par l'erreur RMS la plus importante (151,56m) et est inutilisable.

Le module de filtrage « fcr2p5s » devrait donc être systématiquement employé dans les chaînes de génération des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 et utilisant le retracker Ice2.

Les taux de pertes de mesures s'étendent de 28,5% ($T_{\text{eff}} = 14,0$ jours) à 32,8% ($T_{\text{eff}} = 14,9$ jours).

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique/tracker « cls.topex-poseidon.envisatL2/ice2 »										
Chaîne PrdAH ¹	Nb SV ²	RMS_{ε} (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
opp	61	116,99	116,57	2,69	14,0	28,5	116,99	116,58	12,79	0,37
opp-fg3s	61	5,35	5,32	0,43	14,2	29,6	5,37	5,35	0,57	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	1,97	1,92	0,33	14,9	32,8	2,02	1,97	0,85	0,37
opp-fcr2p5s	61	2,02	1,97	0,33	14,9	32,8	2,07	2,02	0,85	0,37
fg3s-opp	61	6,34	6,30	0,56	14,2	29,3	6,36	6,32	0,57	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,75	1,69	0,34	14,8	32,2	1,80	1,74	0,88	0,37
fcr2p5s-opp	61	1,83	1,77	0,34	14,8	32,1	1,88	1,82	0,86	0,37

¹Critères de sélection des mesures employés : "cec"

²Nombre de stations virtuelles utilisées (non-rejetées) sur les 77 disponibles.

TAB. 7.12: Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/Ice2 ».

Meilleur produit alti-hydrologique : « fg3s-fcr2p5s-opp »

Le meilleur produit alti-hydrologique de ce groupe est le produit de la famille P5 (chaîne « fg3s-fcr2p5s-opp » : filtrage global avec $K = 3$, filtrage calendaire récursif avec $K = 2, 5$ et sélection d'une mesure représentative par passage) avec une erreur RMS moyenne de 1,75m ($0,34 \pm 1,69$ m) et un taux de pertes de mesures altimétriques de 32,2% ($T_{\text{eff}} = 14,8$ jours).

Le jeu des 61 séries temporelles in-situ reconstituées présente une bonne représentativité hydrologique (cf. note en bas de page 188) : $\overline{\eta_d} = 76,8\%$ et $\tilde{N}_{CA} = 6,6$.

La figure 7.15 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 61 stations virtuelles. La table 7.13 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.



TAB. 7.13: Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ice2 (Topex/Poseidon).

7.4.8 CLS/ENVISAT-L2/Ocean (Topex/Poseidon)

Cette section présente les résultats de quantification de la qualité des 7 produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 construit à partir des mesures de la mission altimétrique Topex/Poseidon et utilisant le retracker « Ocean ».

Sur 77 stations virtuelles définies aux intersections entre les traces de Topex/Poseidon et les cours d'eau amazoniens, 16 n'ont pu faire l'objet de reconstitutions suffisamment précises des séries temporelles in-situ. Notre évaluation de la qualité des produits alti-hydrologiques de ce groupe a donc été menée sur 61 stations virtuelles.

Analyse d'ensemble

La table 7.14 dresse la liste des indicateurs de qualité moyens obtenus par les 7 produits alti-hydrologiques. Les valeurs d'erreur RMS s'étendent de 2,06m ($0,53 \pm 1,96m$) à 129,90m ($-1,15 \pm 129,30m$).

Nous remarquons que les produits alti-hydrologiques issus des familles qui n'utilisent pas le module de filtrage calendaire récursif « fcr2p5s » (PB, P1 et P4) sont caractérisés par des erreurs RMS très importantes allant de 8,70m à 129,90m. Parmi ces produits, le produit issu de la famille PB qui n'utilise aucun module de filtrage est caractérisée par l'erreur RMS la plus importante (129,90m) et est inutilisable.

Le module de filtrage « fcr2p5s » devrait donc être systématiquement employé dans les chaînes de génération des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 et utilisant le retracker Ocean.

Les taux de pertes de mesures s'étendent de 26,0% ($T_{\text{eff}} = 13,5$ jours) à 30,9% ($T_{\text{eff}} = 14,4$ jours).

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique/tracker « cls.topex-poseidon.envisatL2/ocean »										
Chaîne PrdAH ¹	Nb SV ²	$\tilde{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\tilde{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
opp	61	129,90	129,30	-1,15	13,5	26,0	129,91	129,31	16,23	0,37
opp-fg3s	61	8,70	8,64	0,64	13,7	27,1	8,72	8,66	1,63	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	2,31	2,23	0,50	14,4	30,9	2,35	2,27	1,72	0,37
opp-fcr2p5s	61	2,31	2,23	0,50	14,4	30,9	2,35	2,27	1,72	0,37
fg3s-opp	61	11,96	11,90	0,87	13,5	26,3	11,97	11,91	1,63	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73	0,37
fcr2p5s-opp	61	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73	0,37

¹Critères de sélection des mesures employés : "cec"

²Nombre de stations virtuelles utilisées (non-rejetées) sur les 77 disponibles.

TAB. 7.14: Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/Ocean ».

Meilleur produit alti-hydrologique : « fg3s-fcr2p5s-opp »

Le meilleur produit alti-hydrologique de ce groupe est le produit de la famille P5 (chaîne « fg3s-fcr2p5s-opp » : filtrage global avec $K = 3$, filtrage calendaire récursif avec $K = 2,5$ et sélection d'une mesure représentative par passage) avec une erreur RMS moyenne de 2,06m ($0,53 \pm 1,96m$) et un taux de pertes de mesures altimétriques de 29,6% ($T_{\text{eff}} = 14,2$ jours).

Le jeu des 61 séries temporelles in-situ reconstituées présente une bonne représentativité hydrologique (cf. note en bas de page 188) : $\overline{\eta_d} = 76,8\%$ et $\tilde{N}_{CA} = 6,6$.

La figure 7.16 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 61 stations virtuelles. La table 7.15 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

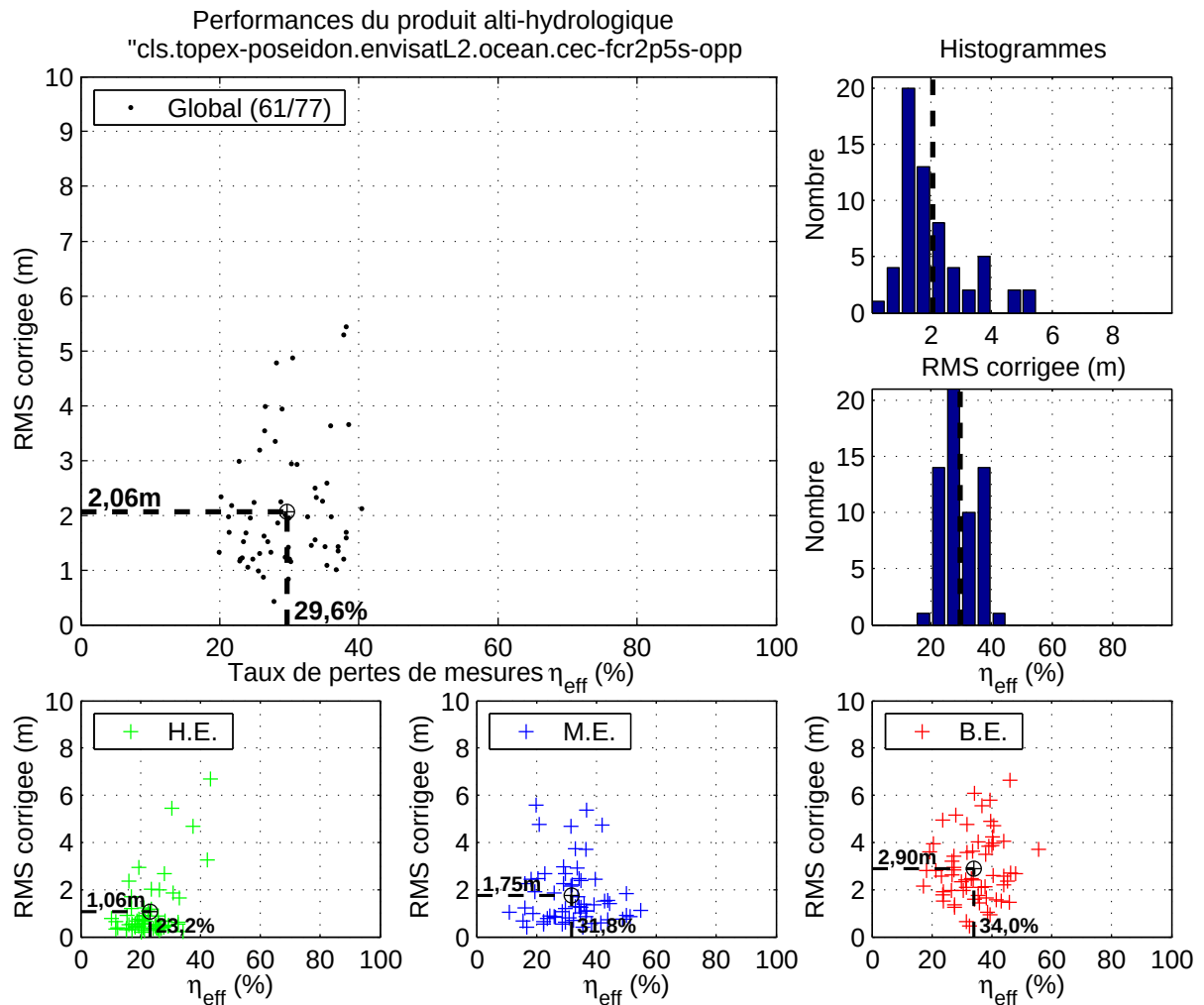


FIG. 7.16: Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ocean (Topex/Poseidon).

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ocean/cec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73	0,37
Hautes eaux	1,06	1,07	0,00	13,0	23,2	1,10	1,10	1,21	0,21
Moyennes eaux	1,75	1,64	0,46	14,9	31,8	1,80	1,70	1,67	0,38
Basses eaux	2,90	2,46	1,20	15,3	34,0	2,92	2,50	2,40	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 201,5 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$

TAB. 7.15: Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ocean (Topex/Poseidon).

7.4.9 CLS/ENVISAT-L2/SeaIce (Topex/Poseidon)

Cette section présente les résultats de quantification de la qualité des 7 produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 construit à partir des mesures de la mission altimétrique Topex/Poseidon et utilisant le retracker « SeaIce ».

Sur 77 stations virtuelles définies aux intersections entre les traces de Topex/Poseidon et les cours d'eau amazoniens, 16 n'ont pu faire l'objet de reconstitutions suffisamment précises des séries temporelles in-situ. Notre évaluation de la qualité des produits alti-hydrologiques de ce groupe a donc été menée sur 61 stations virtuelles.

Analyse d'ensemble

La table 7.16 dresse la liste des indicateurs de qualité moyens obtenus par les 7 produits alti-hydrologiques. Les valeurs d'erreur RMS s'étendent de 1,85m ($0,39 \pm 1,79$ m) à 131,39m ($1,05 \pm 131,07$ m).

Nous remarquons que les produits alti-hydrologiques issus des familles qui n'utilisent pas le module de filtrage calendaire récursif « fcr2p5s » (PB, P1 et P4) sont caractérisés par des erreurs RMS très importantes allant de 6,70m à 131,39m. Parmi ces produits, le produit issu de la famille PB qui n'utilise aucun module de filtrage est caractérisée par l'erreur RMS la plus importante (131,39m) et est inutilisable.

Le module de filtrage « fcr2p5s » devrait donc être systématiquement employé dans les chaînes de génération des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 et utilisant le retracker SeaIce.

Les taux de pertes de mesures s'étendent de 27,4% ($T_{\text{eff}} = 13,8$ jours) à 32,1% ($T_{\text{eff}} = 14,7$ jours).

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique/tracker « cls.topex-poseidon.envisatL2/seaice »										
Chaîne PrdAH ¹	Nb SV ²	RMS_{ε} (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
opp	61	131,39	131,07	1,05	13,8	27,4	131,40	131,08	16,07	0,37
opp-fg3s	61	6,70	6,66	0,50	14,0	28,5	6,72	6,69	0,68	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	1,99	1,93	0,40	14,7	32,1	2,04	1,98	0,83	0,37
opp-fcr2p5s	61	2,02	1,96	0,40	14,7	32,1	2,07	2,01	0,83	0,37
fg3s-opp	61	7,46	7,42	0,57	13,9	28,1	7,47	7,44	0,58	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,85	1,79	0,39	14,6	31,3	1,90	1,84	0,82	0,37
fcr2p5s-opp	61	1,89	1,82	0,40	14,6	31,2	1,94	1,87	0,81	0,37

¹Critères de sélection des mesures employés : "cec"

²Nombre de stations virtuelles utilisées (non-rejetées) sur les 77 disponibles.

TAB. 7.16: Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/SeaIce ».

Meilleur produit alti-hydrologique : « fg3s-fcr2p5s-opp »

Le meilleur produit alti-hydrologique de ce groupe est le produit de la famille P5 (chaîne « fg3s-fcr2p5s-opp » : filtrage global avec $K = 3$, filtrage calendaire récursif avec $K = 2, 5$ et sélection d'une mesure représentative par passage) avec une erreur RMS moyenne de 1,85m ($0,39 \pm 1,79$ m) et un taux de pertes de mesures altimétriques de 31,3% ($T_{\text{eff}} = 14,6$ jours).

Le jeu des 61 séries temporelles in-situ reconstituées présente une bonne représentativité hydrologique (cf. note en bas de page 188) : $\overline{\eta_d} = 76,8\%$ et $\tilde{N}_{CA} = 6,6$.

La figure 7.17 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 61 stations virtuelles. La table 7.17 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

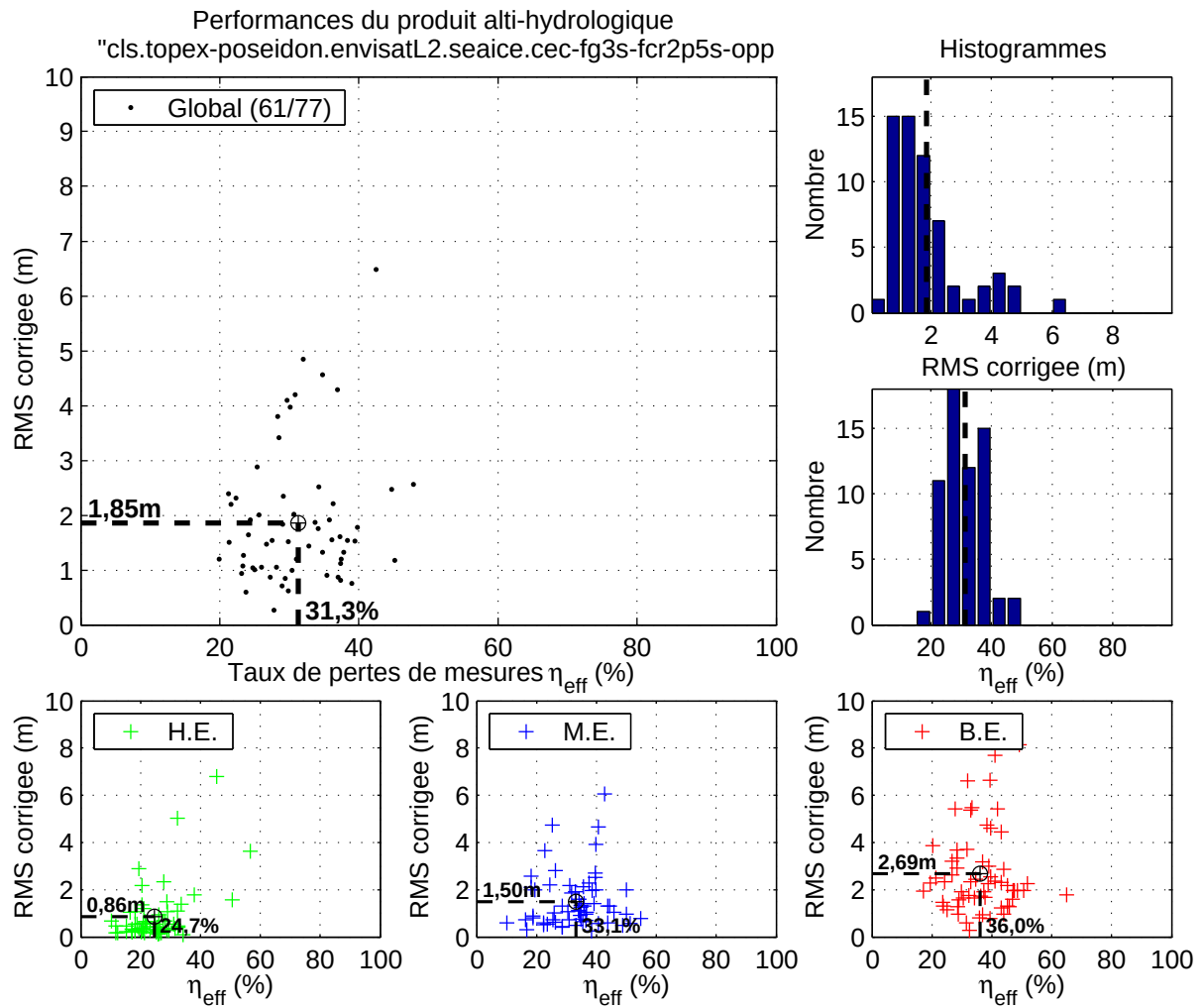


FIG. 7.17: Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker SeaIce (Topex/Poseidon).

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/seaice/cec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,85	1,79	0,39	14,6	31,3	1,90	1,84	0,82	0,37
Hautes eaux	0,86	0,86	-0,00	13,4	24,7	0,89	0,90	0,43	0,21
Moyennes eaux	1,50	1,41	0,27	15,1	33,1	1,55	1,47	0,70	0,38
Basses eaux	2,69	2,39	0,96	15,8	36,0	2,72	2,44	1,39	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 196,6 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$									

TAB. 7.17: Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker SeaIce (Topex/Poseidon).

7.4.10 CLS/ENVISAT-L2/clsmix (Topex/Poseidon)

Cette section présente les résultats de quantification de la qualité des 7 produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/Mix construit à partir des mesures de la mission altimétrique Topex/Poseidon et utilisant un « mélange » des quatre retrackers « Ocean », « Ice1 », « Ice2 » et « Sea-Ice » permettant un peuplement des mesures altimétriques théoriquement quatre fois plus important pour chaque passage du satellite à la station virtuelle (cf. § 7.2.2.1, page 174).

Sur 77 stations virtuelles définies aux intersections entre les traces de Topex/Poseidon et les cours d'eau amazoniens, 16 n'ont pu faire l'objet de reconstitutions suffisamment précises des séries temporelles in-situ. Notre évaluation de la qualité des produits alti-hydrologiques de ce groupe a donc été menée sur 61 stations virtuelles.

Analyse d'ensemble

La table 7.18 dresse la liste des indicateurs de qualité moyens obtenus par les 7 produits alti-hydrologiques. Les valeurs d'erreur RMS s'étendent de 1,85m ($0,57 \pm 1,73$ m) à 177,85m ($1,54 \pm 177,48$ m).

Nous remarquons que les produits alti-hydrologiques issus des familles qui n'utilisent pas le module de filtrage calendaire récursif « fcr2p5s » (PB, P1 et P4) ainsi que le produit « opp-fcr2p5s » (P3) sont caractérisés par des erreurs RMS très importantes allant de 12,77m à 177,85m. Parmi ces produits, le produit issu de la famille PB qui n'utilise aucun module de filtrage est caractérisée par l'erreur RMS la plus importante (177,85m) et est inutilisable.

Les produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 et utilisant le mélange des quatre retrackers Ice1, Ice2, Ocean et SeaIce devraient donc être générés soit en utilisant conjointement les deux modules de filtrage « fg3s » et « fcr2p5s », soit en utilisant le module « fcr2p5s » suivi du module de sélection d'une mesure représentative par passage « opp ».

Les taux de pertes de mesures s'étendent de 25,1% ($T_{\text{eff}} = 13,3$ jours) à 30,2% ($T_{\text{eff}} = 14,3$ jours).

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique/tracker « cls.topex-poseidon.clsmix/clsmix »										
Chaîne PrdAH ¹	Nb SV ²	RMS_{ϵ} (m)	$\hat{\sigma}_{\epsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\epsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\epsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
opp	61	177,85	177,48	1,54	13,3	25,1	177,85	177,49	21,38	0,37
opp-fg3s	61	13,23	13,17	0,53	13,5	26,1	13,25	13,19	1,50	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	2,11	2,01	0,53	14,3	30,2	2,15	2,06	1,32	0,37
opp-fcr2p5s	61	12,77	12,53	-1,54	14,3	30,2	12,81	12,58	2,47	0,37
fg3s-opp	61	13,40	13,33	0,63	13,4	25,7	13,41	13,34	1,32	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,85	1,73	0,57	14,1	29,2	1,90	1,79	1,30	0,37
fcr2p5s-opp	61	1,85	1,73	0,57	14,1	29,2	1,90	1,79	1,30	0,37

¹Critères de sélection des mesures employés : "cec"

²Nombre de stations virtuelles utilisées (non-rejetées) sur les 77 disponibles.

TAB. 7.18: Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/clsmix ».

Meilleur produit alti-hydrologique : « fg3s-fcr2p5s-opp »

Le meilleur produit alti-hydrologique de ce groupe est le produit de la famille P5 (chaîne « fg3s-fcr2p5s-opp » : filtrage global avec $K = 3$, filtrage calendaire récursif avec $K = 2, 5$ et sélection d'une mesure représentative par passage) avec une erreur RMS moyenne de 1,85m ($0,57 \pm 1,73$ m) et un taux de pertes de mesures altimétriques de 29,2% ($T_{\text{eff}} = 14,1$ jours).

Le jeu des 61 séries temporelles in-situ reconstituées présente une bonne représentativité hydrologique (cf. note en bas de page 188) : $\overline{\eta_d} = 76,8\%$ et $\tilde{N}_{CA} = 6,6$.

La figure 7.18 illustre les résultats obtenus pour ce produit alti-hydrologique sur 61 stations virtuelles. La table 7.19 récapitule les moyennes de tous les indicateurs de qualité.

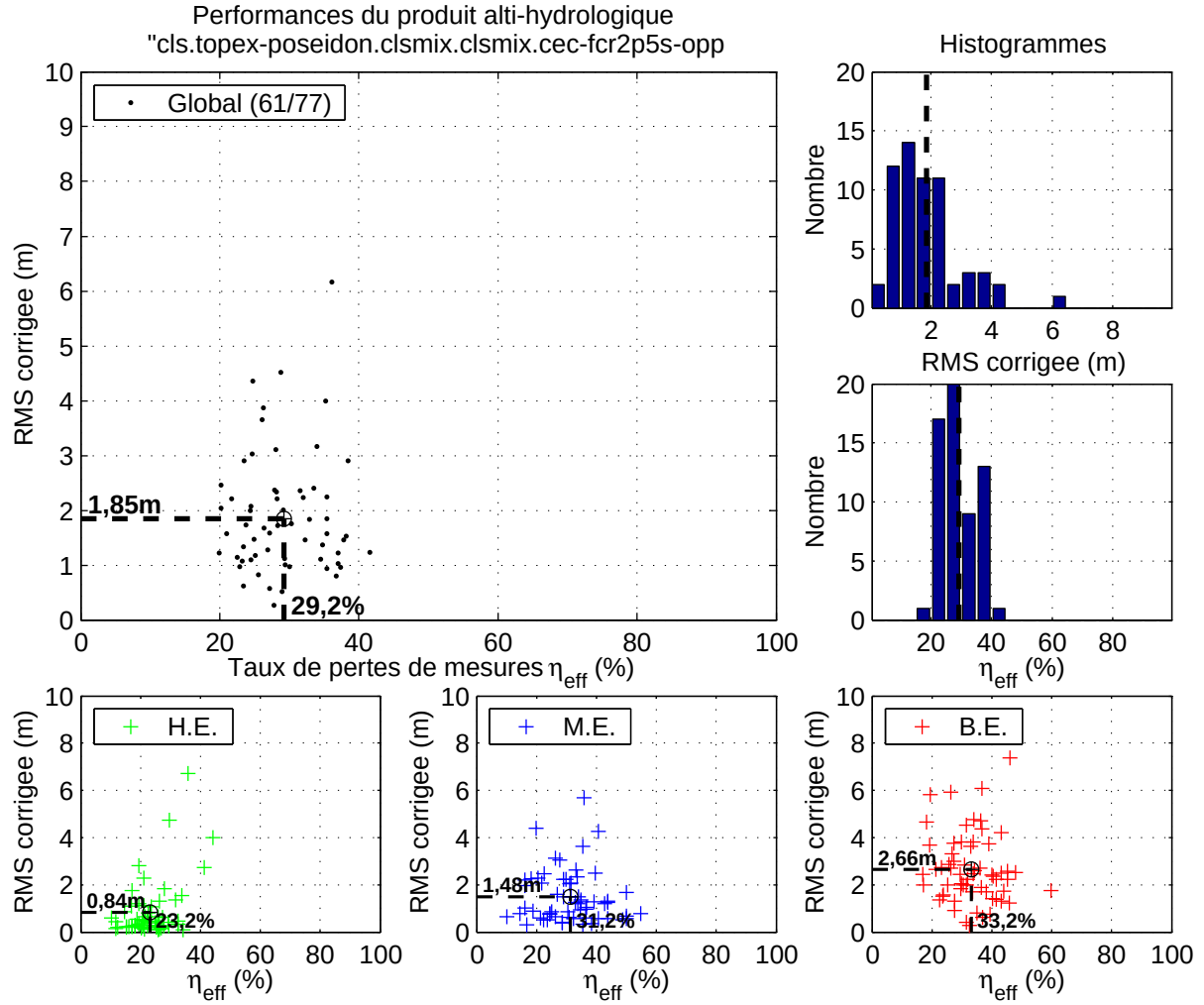


FIG. 7.18: Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2 et utilisant le mélange des quatre retrackers Ice1, Ice2, Ocean et SeaIce (Topex/Poseidon).

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/clsmix/clsmix/cec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,85	1,73	0,57	14,1	29,2	1,90	1,79	1,30	0,37
Hautes eaux	0,84	0,84	-0,00	13,0	23,2	0,87	0,87	0,73	0,21
Moyennes eaux	1,48	1,37	0,41	14,7	31,2	1,53	1,43	1,15	0,38
Basses eaux	2,66	2,16	1,38	15,1	33,2	2,68	2,20	2,11	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \widetilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 202,7 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$

TAB. 7.19: Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2 et utilisant le mélange des quatre retrackers Ice1, Ice2, Ocean et SeaIce (Topex/Poseidon).

7.4.11 Table récapitulative des indicateurs de qualité moyens des 46 produits alti-hydrologiques traités

La table 7.20 récapitule de manière synthétique l'intégralité des indicateurs de qualité moyens des différents produits alti-hydrologiques « prêts à l'emploi » (cf. tables 7.4, 7.5 et 7.6) et des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques générés dans le cadre de la thèse à partir de produits altimétriques (cf. tables 7.9, 7.15, 7.11, 7.13, 7.17 et 7.19).

Les résultats présentés dans cette table ne sont pas strictement comparables entre eux du fait qu'ils sont basés sur des ensembles différents (par le nombre et la nature) de stations virtuelles. Leur analyse permet néanmoins d'avoir une vue d'ensemble de tous les produits alti-hydrologiques dont nous avons pu quantifier la qualité.

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques										
PrdAH ou Chaîne PrdAH	Nb SV	RMS_{ε} (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	RMS_{ε} (m)	σ_{ε} (m)	μ_{ε} (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Produits alti-hydrologiques « prêts à l'emploi »										
CASH	9	1,15	1,06	0,40	13,9	28,3	1,19	1,10	1,11	0,28
RLH/ENVISAT	41	0,77	0,71	0,15	41,6	13,8	0,82	0,77	1,04	0,31
RLH/ERS-2	42	0,86	0,80	0,14	40,3	11,0	0,92	0,86	1,97	0,31
Birkett2002	9	1,19	1,12	0,39	14,0	28,2	1,23	1,17	0,39	0,30
Produits alti-hydrologiques issus du groupe « aviso.topex-poseidon.mgdr/ocean »										
opp	60	1,82	1,74	0,41	20,7	45,5	1,87	1,80	0,08	0,37
opp-fg3s	60	1,54	1,46	0,40	20,9	45,9	1,59	1,52	0,10	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	60	1,41	1,33	0,39	21,2	46,5	1,47	1,39	0,07	0,37
opp-fcr2p5s	60	1,53	1,46	0,39	21,0	46,3	1,59	1,51	0,05	0,37
fg3s-opp	60	1,50	1,43	0,40	21,1	46,3	1,56	1,48	0,10	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	60	1,35	1,27	0,40	21,5	47,4	1,41	1,33	0,07	0,37
fcr2p5s-opp	60	1,53	1,45	0,41	21,3	46,9	1,59	1,51	0,02	0,37
Produits alti-hydrologiques issus du groupe « cls.topex-poseidon.envisatL2/ice1 »										
opp	61	151,56	151,03	0,96	13,6	26,3	151,57	151,03	19,34	0,37
opp-fg3s	61	12,36	12,28	0,94	13,7	27,3	12,37	12,30	2,02	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	2,66	2,50	0,76	14,5	31,1	2,70	2,54	1,79	0,37
opp-fcr2p5s	61	13,86	13,41	-1,84	14,5	31,1	13,89	13,45	3,08	0,37
fg3s-opp	61	10,82	10,74	0,96	13,7	27,1	10,83	10,75	1,80	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68	0,37
fcr2p5s-opp	61	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68	0,37
Produits alti-hydrologiques issus du groupe « cls.topex-poseidon.envisatL2/ice2 »										
opp	61	116,99	116,57	2,69	14,0	28,5	116,99	116,58	12,79	0,37
opp-fg3s	61	5,35	5,32	0,43	14,2	29,6	5,37	5,35	0,57	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	1,97	1,92	0,33	14,9	32,8	2,02	1,97	0,85	0,37
opp-fcr2p5s	61	2,02	1,97	0,33	14,9	32,8	2,07	2,02	0,85	0,37
fg3s-opp	61	6,34	6,30	0,56	14,2	29,3	6,36	6,32	0,57	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,75	1,69	0,34	14,8	32,2	1,80	1,74	0,88	0,37
fcr2p5s-opp	61	1,83	1,77	0,34	14,8	32,1	1,88	1,82	0,86	0,37
Produits alti-hydrologiques issus du groupe « cls.topex-poseidon.envisatL2/ocean »										
opp	61	129,90	129,30	-1,15	13,5	26,0	129,91	129,31	16,23	0,37
opp-fg3s	61	8,70	8,64	0,64	13,7	27,1	8,72	8,66	1,63	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	2,31	2,23	0,50	14,4	30,9	2,35	2,27	1,72	0,37
opp-fcr2p5s	61	2,31	2,23	0,50	14,4	30,9	2,35	2,27	1,72	0,37
fg3s-opp	61	11,96	11,90	0,87	13,5	26,3	11,97	11,91	1,63	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73	0,37
fcr2p5s-opp	61	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73	0,37
Produits alti-hydrologiques issus du groupe « cls.topex-poseidon.envisatL2/seaiice »										
opp	61	131,39	131,07	1,05	13,8	27,4	131,40	131,08	16,07	0,37
opp-fg3s	61	6,70	6,66	0,50	14,0	28,5	6,72	6,69	0,68	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	1,99	1,93	0,40	14,7	32,1	2,04	1,98	0,83	0,37
opp-fcr2p5s	61	2,02	1,96	0,40	14,7	32,1	2,07	2,01	0,83	0,37
fg3s-opp	61	7,46	7,42	0,57	13,9	28,1	7,47	7,44	0,58	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,85	1,79	0,39	14,6	31,3	1,90	1,84	0,82	0,37
fcr2p5s-opp	61	1,89	1,82	0,40	14,6	31,2	1,94	1,87	0,81	0,37
Produits alti-hydrologiques issus du groupe « cls.topex-poseidon.clsmix/clsmix »										
opp	61	177,85	177,48	1,54	13,3	25,1	177,85	177,49	21,38	0,37
opp-fg3s	61	13,23	13,17	0,53	13,5	26,1	13,25	13,19	1,50	0,37
opp-fg3s-fcr2p5s	61	2,11	2,01	0,53	14,3	30,2	2,15	2,06	1,32	0,37
opp-fcr2p5s	61	12,77	12,53	-1,54	14,3	30,2	12,81	12,58	2,47	0,37
fg3s-opp	61	13,40	13,33	0,63	13,4	25,7	13,41	13,34	1,32	0,37
fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,85	1,73	0,57	14,1	29,2	1,90	1,79	1,30	0,37
fcr2p5s-opp	61	1,85	1,73	0,57	14,1	29,2	1,90	1,79	1,30	0,37

TAB. 7.20: Table récapitulative des 46 produits alti-hydrologiques.

7.5 Applications de la méthode à l'analyse comparative des produits alti-hydrologiques et à l'optimisation des procédures de fenêtrage, de re-tracking et de filtrage automatique

Dans cette section, nous présentons plusieurs analyses comparatives des performances des produits alti-hydrologiques. Elles illustrent le potentiel d'application de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques.

Nous mènerons successivement quatre types d'analyses :

- (1) la comparaison des performances de différentes chaînes de filtrage automatiques des séries temporelles alti-hydrologiques (cf. § 7.5.1)
- (2) la comparaison des performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique (cf. § 7.5.2)
- (3) la comparaison des performances de différentes méthodes de fenêtrage géographique (cf. § 7.5.3)
- (4) la comparaison de la qualité de 10 produits alti-hydrologiques (cf. § 7.5.4)

7.5.1 Comparaison des performances des chaînes de filtrage automatique

La comparaison des indicateurs de qualité moyens, au sein de chacun des six groupes de produits alti-hydrologiques (cf. section 7.2.2), permet de déterminer la ou les chaînes de filtrage les plus intéressantes, que ce soit du point de vue de la précision des mesures altimétriques (RMS) ou bien leur taux de pertes (η_{eff}).

La figure 7.19 illustre cette comparaison en prenant pour exemple les produits alti-hydrologiques du groupe CLS/ENVISAT-L2/SeaIce. On y observe les disparités de la qualité des produits au sein d'un même groupe, en fonction de la configuration de la chaîne modulaire de filtrage employée (cf. table 7.16 (page 204) pour les valeurs numériques)¹⁰.

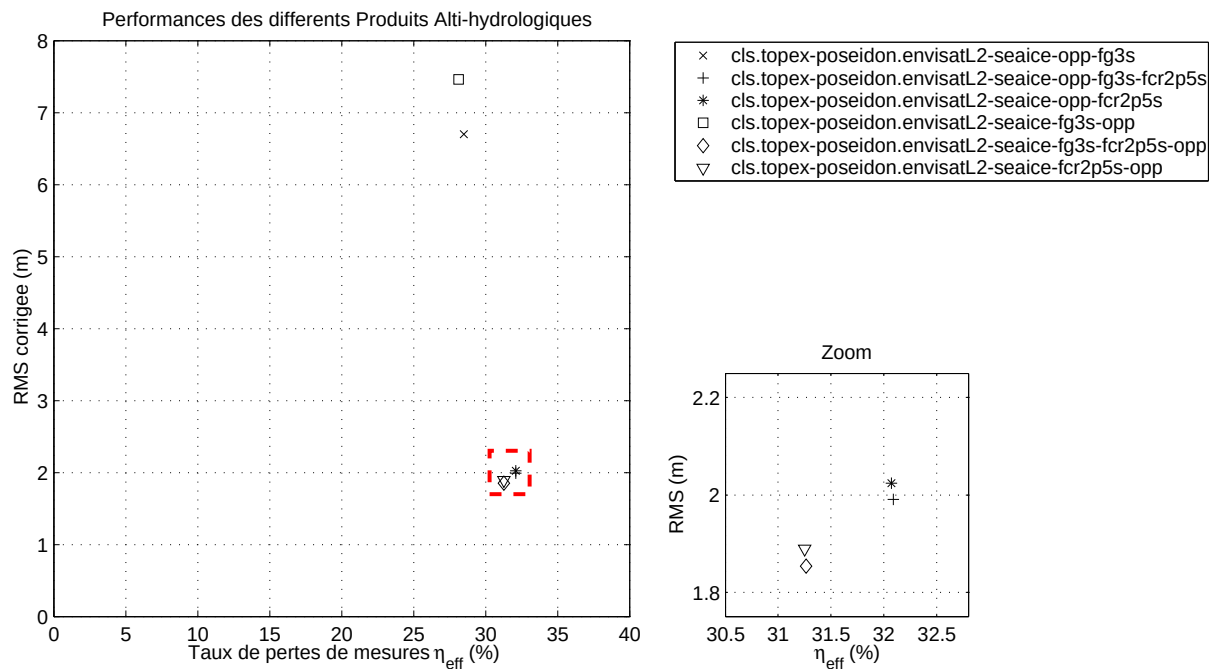


FIG. 7.19: Comparaison de performances des familles de produits alti-hydrologiques pour le groupe CLS/ENVISAT-L2/SeaIce (cf. table 7.16 (page 204) pour les valeurs numériques).

¹⁰Le produit alti-hydrologique issu de la chaîne « opp » n'est pas présent sur la figure puisqu'il est caractérisé par une très importante erreur RMS de 131, 39m.

Dans cet exemple, l'absence du module de filtrage calendaire récursif « fcr2p5s » dans les chaînes de génération des produits alti-hydrologiques a un fort impact sur l'erreur RMS moyenne : les produits marqués par les symboles $\square$ et $\times$ présentent des valeurs de RMS élevées, alors que les quatre produits dont les chaînes intègrent ce module (symboles ∇ , $\diamond$, $*$ et $+$) sont caractérisés par les meilleures précisions moyennes (RMS). De plus, le fait de générer les produits alti-hydrologiques avec des chaînes de filtrages intégrant ce module n'a pas un impact important sur les taux de pertes des mesures altimétriques (cf. produits marqués par les symboles ∇ , $\diamond$, $*$ et $+$). Ainsi, sur le bassin amazonien, le filtrage calendaire récursif (« fcr2p5s ») permet d'identifier et d'écarter automatiquement les mesures altimétriques aberrantes.

Par ailleurs, l'utilisation préalable dans les chaînes de filtrage du module de filtrage global « fg3s » permet systématiquement d'améliorer la précision des produits alti-hydrologiques, sans pour autant dégrader le taux de pertes des mesures altimétriques.

Ces constats détaillés pour le groupe de produits alti-hydrologiques CLS/ENVISAT-L2/SeaIce sont transposables à l'ensemble des autres groupes.

Conclusion

Nous en concluons que, pour toute combinaison produit altimétrique/(re)tracker, la chaîne de filtrage automatique utilisant un filtrage global (module « fg3s ») puis un filtrage calendaire récursif (module « fcr2p5s ») puis la sélection d'une mesure représentative par passage (« opp ») **est optimale** et permet d'obtenir le meilleur produit alti-hydrologique¹¹.

¹¹Notons que cette conclusion s'applique sur le bassin de l'Amazonie pour lequel le signal hydrologique annuel est fortement marqué ; sa généralisation à d'autres bassins doit faire l'objet d'études préalables.

7.5.2 Comparaison des performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique

Nous avons montré au § 7.4 que pour toute combinaison [produit altimétrique/(re)tracker] la chaîne modulaire de filtrage « fg3s-fcr2p5s-opp » permet d'obtenir le meilleur produit alti-hydrologique. Nous pouvons sur cette base comparer les performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique.

Nous avons regroupé dans la table 7.21 et la figure 7.20 les indicateurs de qualité moyens des six produits alti-hydrologiques résultants, ce qui nous permet de mener une analyse comparative.

Quatre constats s'imposent :

1. le produit alti-hydrologique issu du produit altimétrique AVISO/M-GDR se distingue par une meilleure précision (1, 35m) mais un taux de pertes de mesures plus important (47, 4%),
2. les produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 sont caractérisés par de moins bonnes précisions (de 1, 75m à 2, 45m) mais de plus faibles taux de pertes des mesures altimétriques (~ 30%),
3. la comparaison des quatre produits alti-hydrologiques issus du produit altimétrique CLS/ENVISAT-L2 et des retracker « Ice1 », « Ice2 », « Ocean » et « SeaIce » permet de comparer dans des conditions d'acquisition strictement identiques les performances de ces quatre retracker :
 - le retracker « Ice2 » fournit le produit alti-hydrologique le plus précis (1, 75m ; 32, 2%),
 - le retracker « Ocean » fournit le produit alti-hydrologique avec le taux de pertes le plus faible (2, 06m ; 29, 6%),
 - les retracker « Ocean » et « Ice1 » fournissent des produits alti-hydrologiques de précisions moindres
4. le produit alti-hydrologique « CLS/ENVISAT-L2/clsmix/fg3s-fcr2p5s-opp » combinant les différents retracker constitue en première approximation le meilleur compromis entre précision et taux de pertes des mesures (1, 85m ; 29, 2%). En effet, les séries temporelles de ce produit fusionné ont une densité de mesures altimétriques jusqu'à quatre fois supérieure à la densité des séries temporelles n'utilisant qu'un seul retracker, renforçant ainsi la probabilité d'obtenir au moins une mesure par passage du satellite à la station virtuelle.

Conclusion

À travers cette comparaison des performances entre produits alti-hydrologiques issus des différentes combinaisons [produit altimétrique/(re)tracker] nous avons montré que la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques permet de quantifier, de manière statistiquement significative, le gain de précision et/ou de taux de pertes de mesures apporté par un (re)tracker donné.

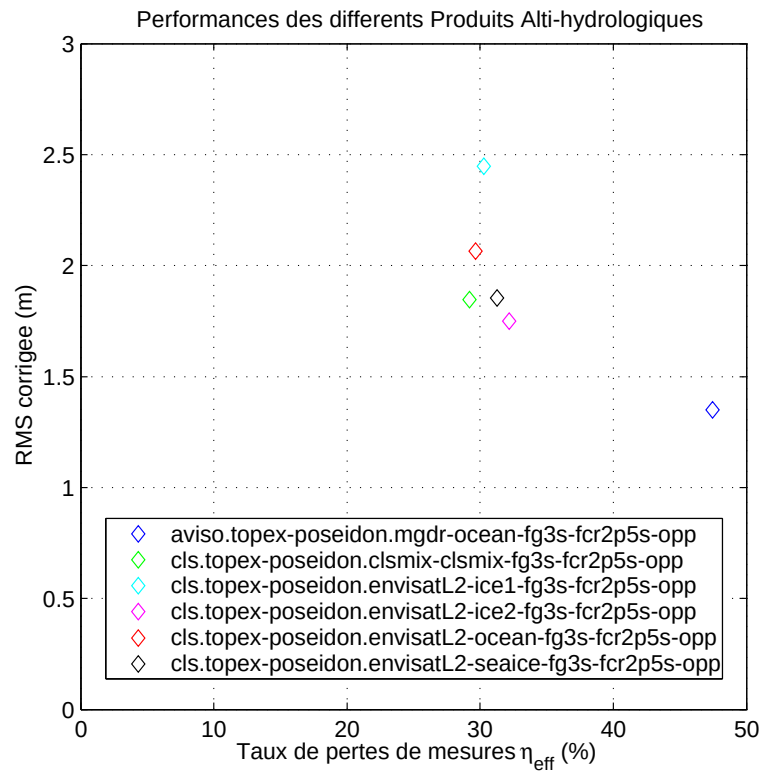


FIG. 7.20: Comparaison des performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique : performances des six meilleurs produits alti-hydrologiques de chaque combinaison « produit altimétrique/(re)tracker ».

Comparaison de performances des meilleurs produits alti-hydrologiques de chaque groupe										
Groupe	PrdAH ou Chaîne PrdAH	Nb SV	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)
AVISO/Ocean	fg3s-fcr2p5s-opp	60	1,35	1,27	0,40	21,5	47,4	1,41	1,33	0,07
CLS/Ice1	fg3s-fcr2p5s-opp	61	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68
CLS/Ice2	fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,75	1,69	0,34	14,8	32,2	1,80	1,74	0,88
CLS/Ocean	fg3s-fcr2p5s-opp	61	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73
CLS/SeaIce	fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,85	1,79	0,39	14,6	31,3	1,90	1,84	0,82
CLS/clsmix	fg3s-fcr2p5s-opp	61	1,85	1,73	0,57	14,1	29,2	1,90	1,79	1,30

TAB. 7.21: Comparaison des performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique : performances des six meilleurs produits alti-hydrologiques de chaque combinaison « produit altimétrique/(re)tracker ».

7.5.3 Comparaison des performances de différentes méthodes de fenêtrage géographique

Comme nous le verrons à la section 7.5.4.2 (B. page 221), la largeur des fenêtres géographiques à partir desquelles les mesures altimétriques sont extraites a un impact important sur la précision RMS et le taux de pertes des séries temporelles alti-hydrologiques.

À partir d'une option initiale où la fenêtre géographique est calée sur les berges du cours d'eau, nous pouvons appliquer notre méthode de caractérisation de la qualité pour quantifier cet impact, en testant différentes options de fenêtrage :

- option 0 : fenêtrage calé sur les berges du cours d'eau,
- option 1 : fenêtrage 0 élargi d'un kilomètre,
- option 2 : fenêtrage 0 élargi de deux kilomètres,
- option 3 : fenêtrage 0 élargi de trois kilomètres,
- option 4 : fenêtrage 0 élargi de quatre kilomètres,
- option 5 : fenêtrage 0 élargi de cinq kilomètres,
- option 6 : fenêtrage 0 élargi de six kilomètres,

La figure 7.21 illustre ces différents fenêtrages sur la station virtuelle « TP-178A-Madeira ».



FIG. 7.21: Illustration des 7 options de fenêtrage pour la station virtuelle « TP-178A-Madeira ». Chaque fenêtrage est 2km plus large que la précédente, la plus étroite étant ajustée sur les berges du cours d'eau.

Nous avons employé ces 7 différentes options de fenêtrages sur les 77 stations virtuelles « Thèse » pour construire 7 produits alti-hydrologiques à partir du produit altimétrique AVISO/M-GDR/Ocean, en utilisant la chaîne de filtrage automatique optimale.

La table 7.22 récapitule les indicateurs de qualité moyens des 7 variantes de produits alti-hydrologiques. La figure 7.22 illustre leur comparaison.

Commentaires : L'élargissement de la fenêtre géographique d'extraction des stations virtuelles à partir de la fenêtre initiale ajustée sur les berges du fleuve se traduit par une diminution du taux de pertes mais une dégradation de la précision.

Ce constat moyen est applicable à la quasi-totalité des stations virtuelles, à quelques exceptions près qui montrent généralement des zones d'inondations étendues voisines du fleuve.

En conclusion, nous préconisons le fenêtrage ajusté sur les berges du fleuve. Deux cas particuliers peuvent inciter à élargir ce fenêtrage : (1) une expertise hydrologique nous permet de délimiter (par exemple à partir d'images satellites) la fenêtre géographique d'extraction pour inclure des zones d'inondation ; (2) on privilégie une diminution des taux de pertes de mesures altimétriques sur un gain en précision (cf. chapitre 9).

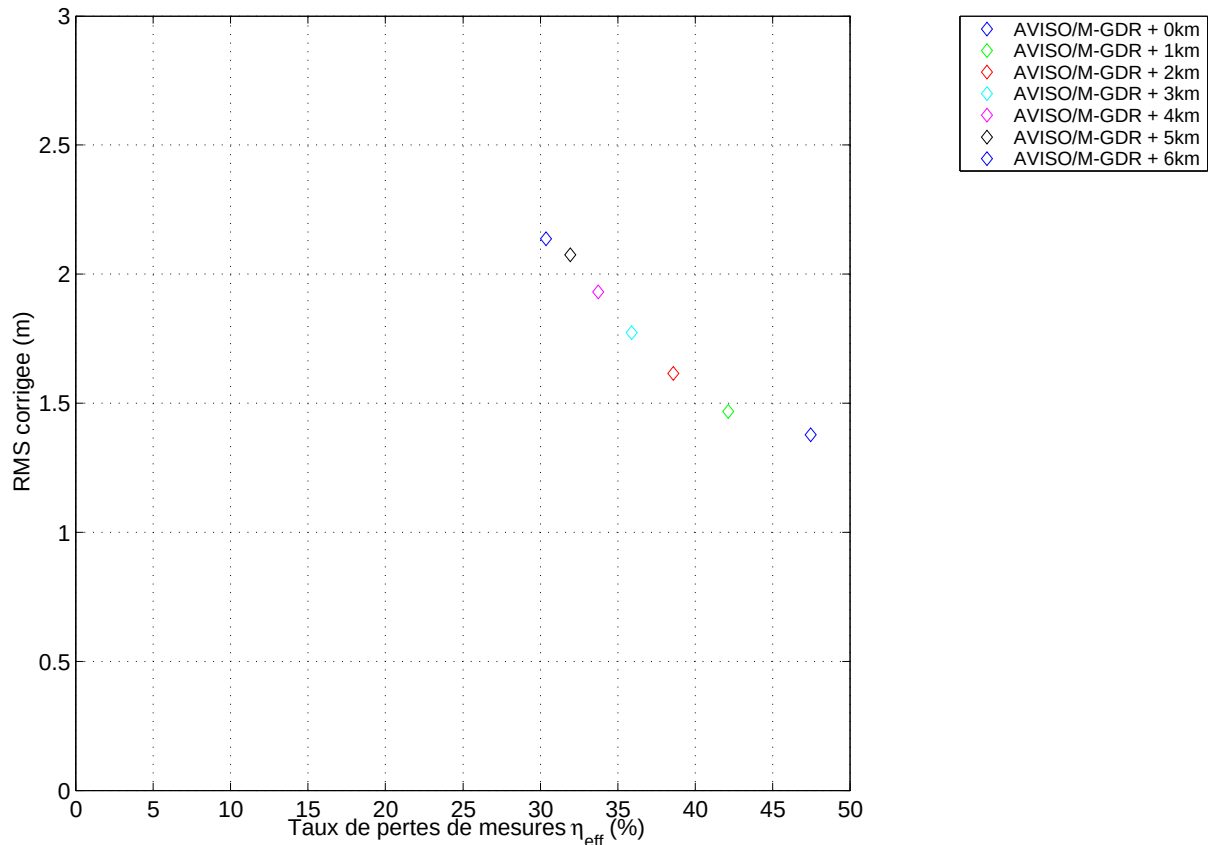


FIG. 7.22: Comparaison des performances de 7 méthodes de fenêtrage géographique pour les produits alti-hydrologiques construits à partir du produit altimétrique AVISO/TP/M-GDR et la chaîne de filtrage automatique optimale (« fg3s-fcr2p5s-opp »).

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques											
Produit Alti-Hydrologique	Nb SV ²	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires				
		RMS_{ϵ} (m)	$\hat{\sigma}_{\epsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\epsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\bar{\epsilon}}$ (m)	$\sigma_{\bar{\epsilon}}$ (m)	$\mu_{\bar{\epsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\epsilon Rec}$ (m)	
AVISO/M-GDR + 0km ¹	60	1,35	1,27	0,40	21,5	47,4	1,41	1,33	0,07	0,37	
AVISO/M-GDR + 1km ¹	61	1,47	1,36	0,44	18,6	42,1	1,52	1,42	0,26	0,37	
AVISO/M-GDR + 2km ¹	61	1,62	1,49	0,52	17,1	38,6	1,67	1,55	0,32	0,37	
AVISO/M-GDR + 3km ¹	61	1,77	1,62	0,58	16,2	35,9	1,82	1,68	0,40	0,37	
AVISO/M-GDR + 4km ¹	61	1,93	1,76	0,64	15,5	33,7	1,98	1,82	0,52	0,37	
AVISO/M-GDR + 5km ¹	61	2,08	1,90	0,69	14,9	31,9	2,12	1,95	0,64	0,37	
AVISO/M-GDR + 6km ¹	61	2,14	1,94	0,75	14,5	30,4	2,18	1,99	0,76	0,37	

¹ Produits alti-hydrologiques construits avec la chaîne de filtrage « fg3s-fcr2p5s-opp ».

² Nombre de stations virtuelles utilisées (non-rejetées) sur les 77 disponibles.

TAB. 7.22: Comparaison des performances de 7 méthodes de fenêtrage géographique pour les produits alti-hydrologiques construits à partir du produit altimétrique AVISO/TP/M-GDR et la chaîne de filtrage automatique optimale (« fg3s-fcr2p5s-opp »).

7.5.4 Comparaison de la qualité de 10 produits alti-hydrologiques

Dans la section 7.4 nous avons présenté successivement la qualité des quatre produits alti-hydrologiques existants :

- 1 CASH/TP/mix
- 2 River & Lake Hydrology/ENVISAT/Système expert
- 3 River & Lake Hydrology/ERS-2/Système expert
- 4 [~Birkett 2002]/TP/Ocean

ainsi que de six produits alti-hydrologiques construits dans le cadre de cette thèse pour six combinaisons différentes [produit altimétrique/(re)tracker] et la chaîne de filtrage automatique « fg3s-fcr2p5s-opp » :

- 5 AVISO/TP/Ocean
- 6 CLS/TP/Ice1
- 7 CLS/TP/Ice2
- 8 CLS/TP/Ocean
- 9 CLS/TP/SeaIce
- 10 CLS/TP/clsmix

Dans les sections suivantes, nous comparons les performances des 10 produits alti-hydrologiques tout d'abord de manière brute (7.5.4.1) puis sur des ensembles homogènes de stations virtuelles (7.5.4.2).

Nous y verrons par exemple (cf. figure 7.25) que les produits alti-hydrologiques CLS présentent les mêmes performances que le produit CASH lorsqu'ils sont comparés sur un même jeu de stations virtuelles et que le produit « River & Lake Hydrology/ENVISAT » présente sur ce même jeu la meilleure précision RMS.

7.5.4.1 Comparaison brute des produits alti-hydrologiques

La table 7.23 récapitule les indicateurs de qualité moyens des 10 produits alti-hydrologiques, calculés sur des ensembles hétérogènes de stations virtuelles. La figure 7.23 illustre leur comparaison « brute ». CETTE COMPARAISON N'EST PAS PERTINENTE car elle est biaisée par la forte hétérogénéité des jeux de stations virtuelles utilisés pour chacun des produits¹². La figure 7.24 illustre cette hétérogénéité en présentant les histogrammes de largeurs de fleuves pour chaque ensemble de stations virtuelles.

Commentaires

Les produits alti-hydrologiques CASH, RLH/ENVISAT, RLHERS-2 et [~Birkett 2002] présentent de meilleures performances en précision et/ou en taux de pertes que les produits AVISO et CLS, mais comme l'indique la figure 7.24, ils ont été testés sur des jeux de stations virtuelles qui, de façon générale, présentent une largeur de fleuve plus grande : largeurs médianes respectives de 3,8km, 2,6km, 3,0km et 1,9km pour les premiers et de 1,2 ~ 1,3km pour les derniers.

Pour que la comparaison soit significative, il importe de la réaliser sur des jeux homogènes de stations virtuelles. Ceci est l'objet de la section suivante (cf. § 7.5.4.2).

¹²Voir aussi les cartes des stations virtuelles présentées en section 7.3.1 cartes stations virtuelles.

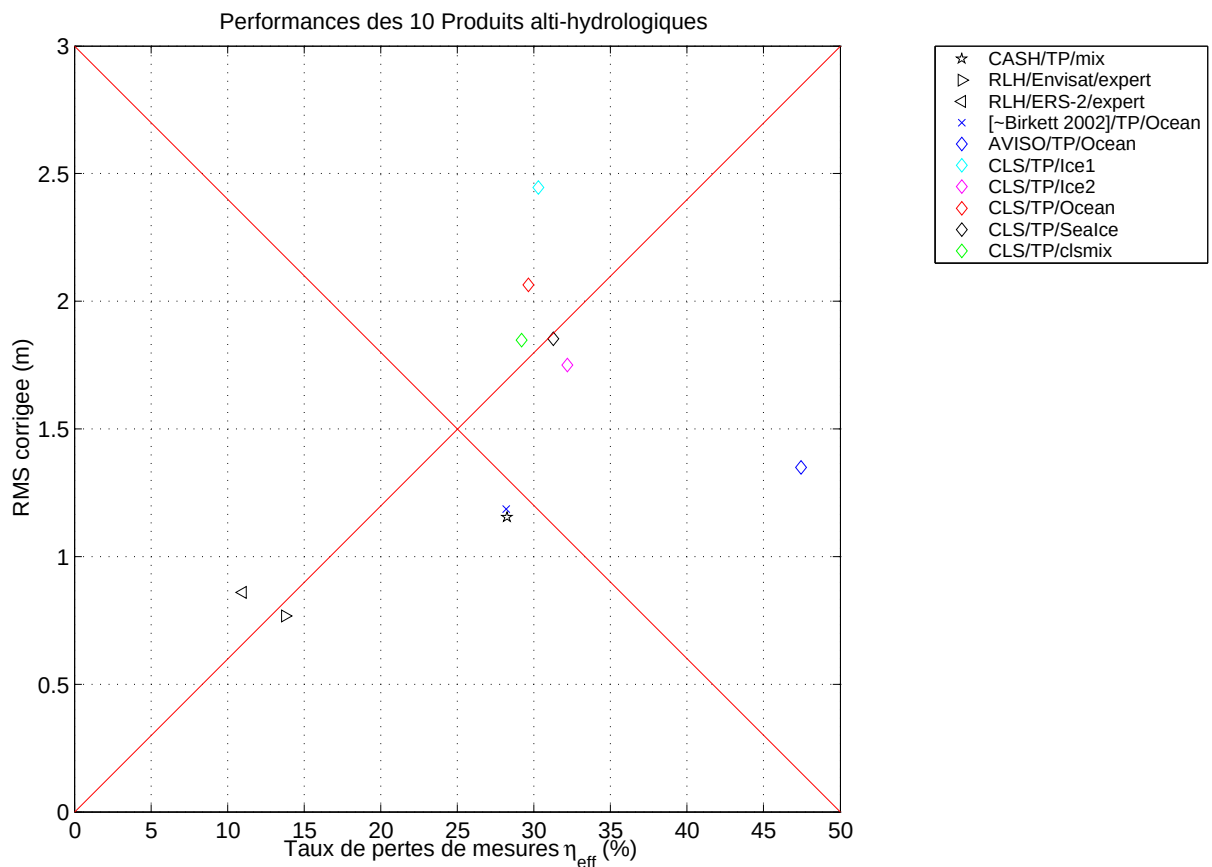


FIG. 7.23: Comparaison brute de la qualité de 10 produits alti-hydrologiques sur des jeux hétérogènes de stations virtuelles. Comme expliqué dans le texte, cette comparaison brute n'est pas pertinente (cf. 7.27 pour une comparaison pertinente).

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques										
Produit Alti-Hydrologique	Nb SV	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires			
		RMS_{ε} (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
CASH/TP/mix	9	1,15	1,06	0,40	13,9	28,3	1,19	1,10	1,11	0,28
RLH/ENVISAT/exp.	41	0,77	0,71	0,15	41,6	13,8	0,82	0,77	1,04	0,31
RLH/ERS-2/expert	42	0,86	0,80	0,14	40,3	11,0	0,92	0,86	1,97	0,31
Birkett/TP/Ocean ¹	9	1,19	1,12	0,39	14,0	28,2	1,23	1,17	0,39	0,30
AVISO/TP/Ocean ¹	60	1,35	1,27	0,40	21,5	47,4	1,41	1,33	0,07	0,37
CLS/TP/Ice1 ¹	61	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68	0,37
CLS/TP/Ice2 ¹	61	1,75	1,69	0,34	14,8	32,2	1,80	1,74	0,88	0,37
CLS/TP/Ocean ¹	61	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73	0,37
CLS/TP/SeaIce ¹	61	1,85	1,79	0,39	14,6	31,3	1,90	1,84	0,82	0,37
CLS/TP/clsmix ¹	61	1,85	1,73	0,57	14,1	29,2	1,90	1,79	1,30	0,37

¹ Produits alti-hydrologiques construits avec la chaîne de filtrage « fg3s-fcr2p5s-opp ».

TAB. 7.23: Table de comparaison brute des indicateurs de qualité de 10 produits alti-hydrologiques sur des jeux hétérogènes de stations virtuelles. Comme expliqué dans le texte, cette comparaison brute n'est pas pertinente.

Ce tableau et cette figure sont barrés pour bien signifier qu'une telle comparaison brute des performances des produits alti-hydrologiques sur des jeux hétérogènes de stations virtuelles n'est pas pertinente. On se reportera aux figures 7.26 et 7.27 et aux tables 7.24 et 7.25 pour des comparaisons pertinentes.

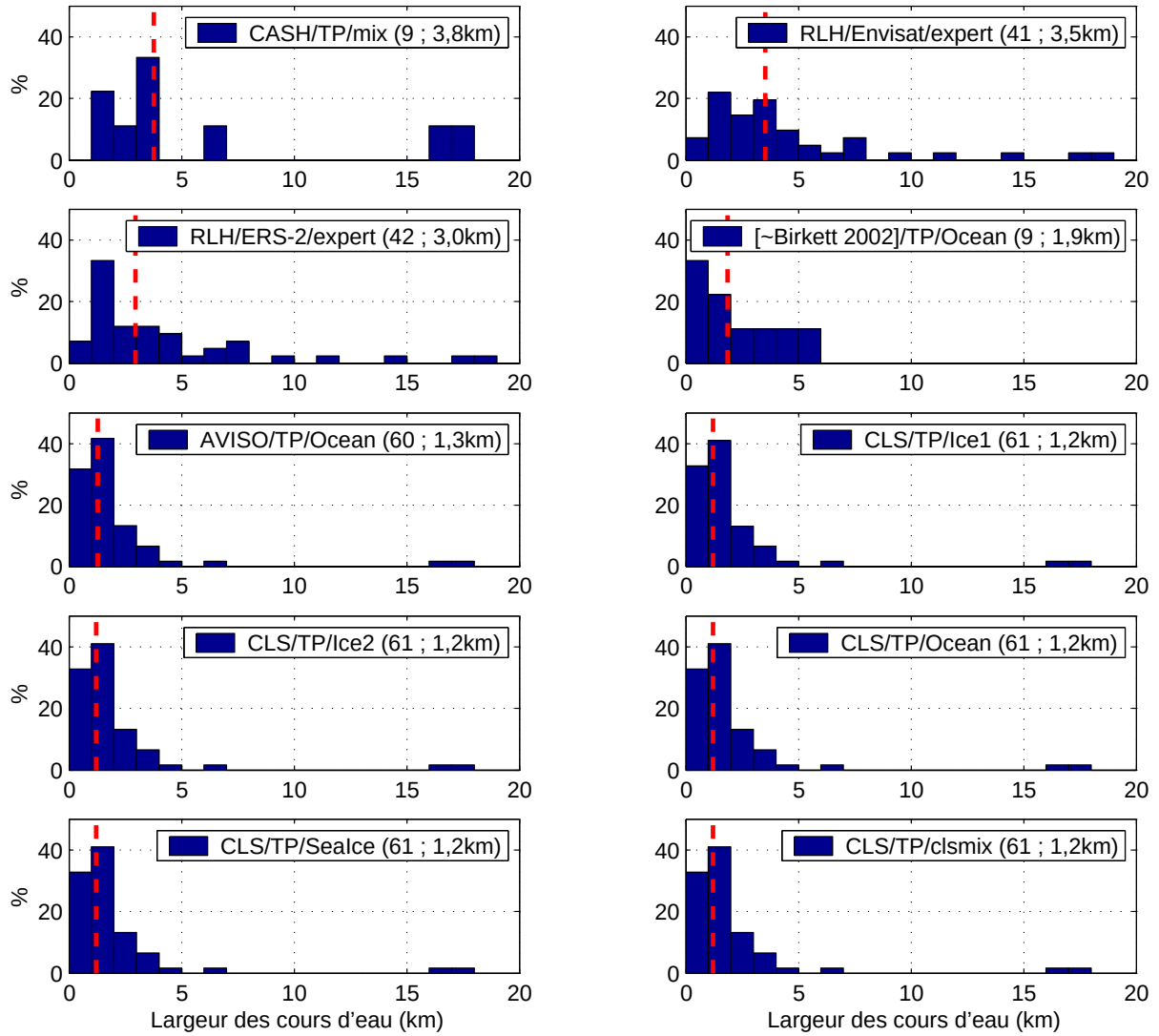


FIG. 7.24: Histogrammes des largeurs de rivières aux stations virtuelles des 10 produits alti-hydrologiques (cf. table 7.23 et figure 7.23).

7.5.4.2 Comparaison des produits alti-hydrologiques sur des ensembles homogènes de stations virtuelles

A. Comparaison des 9 produits alti-hydrologiques AVISO, CASH, CLS et River & Lake Hydrology sur 8 stations virtuelles

Les 9 produits alti-hydrologiques AVISO/TP/Ocean, CASH/TP/mix, CLS/TP/Ice1, CLS/TP/Ice2, CLS/TP/Ocean, CLS/TP/SeaIce, CLS/TP/clsmix, RLH/ENVISAT/expert et RLH/ERS-2/expert, issus pour les 7 premiers de la mission Topex/Poseidon, pour le huitième de la mission ENVISAT et pour le dernier de la mission ERS-2, peuvent être comparés sur 8 stations virtuelles¹³. Dans le cas des produits CASH/CLS/AVISO il s'agit strictement des mêmes stations virtuelles, celles des produits River & Lake Hydrology ayant été choisies à leur proximité immédiate (distances entre 0km et 33km) et dans des configurations hydrologiques similaires (largeurs des cours d'eau). Seule une station virtuelle pour le produit RLH/ENVISAT parmi les 8 sites n'a pas pu faire l'objet d'une série temporelle alti-hydrologique

Bien que le nombre de 8 stations virtuelles soit faible pour une représentativité statistique il permet toutefois une comparaison de ces 9 produits en situations strictement identiques. La carte présentée en figure 7.25 donne un aperçu de la répartition de ces 8 stations virtuelles sur lesquelles la comparaison de ces produits alti-hydrologiques est menée.

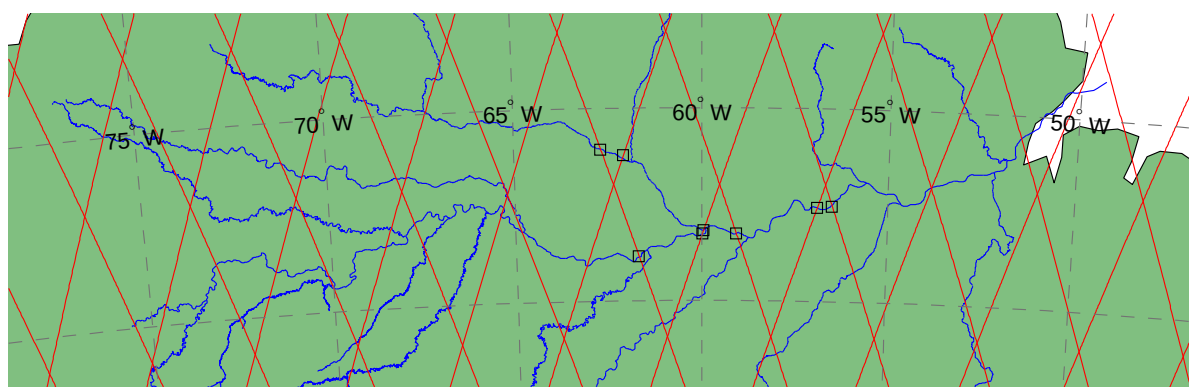


FIG. 7.25: Carte des 8 stations virtuelles sur lesquelles sont comparés les 9 produits alti-hydrologiques CASH, AVISO, CLS et River & Lake Hydrology.

La table 7.24 récapitule les indicateurs de qualité moyens des 9 produits alti-hydrologiques, calculés sur le jeu homogène de 8 stations virtuelles. La figure 7.26 illustre leur comparaison.

Commentaires : Notons que sur ce jeu de stations virtuelles la largeur médiane des cours d'eau est de 3,8km, voir l'histogramme des largeurs pour le produit alti-hydrologique CASH à la figure 7.24, en haut à gauche.

Les produits alti-hydrologiques CASH et CLS présentent des performances tout à fait comparables avec une précision RMS proche de $\sim 1,15\text{m}$ et des taux de pertes de $\sim 26\%$; les produits CLS utilisant les retrackers Ice1 et Ocean sont légèrement moins précis avec des précisions RMS de l'ordre de $\sim 1,30\text{m}$. Le produit alti-hydrologique AVISO/M-GDR s'avère être le plus précis ($0,96\text{m}$) des produits issus de la mission altimétrique Topex/Poseidon mais est caractérisé par un plus fort taux de pertes ($33,0\%$).

Dans des conditions de mesures directement comparables, les produits alti-hydrologiques RLH/ENVISAT et RLH/ERS-2 présentent de meilleures performances avec une précision RMS de respectivement $0,65\text{m}$ et $0,74\text{m}$ et des taux de pertes de $17,7\%$ et $12,5\%$.

¹³ À l'exception du produit RLH/ENVISAT/expert dont une série temporelle alti-hydrologique n'est pas disponible dans le produit fourni par De Montfort University.

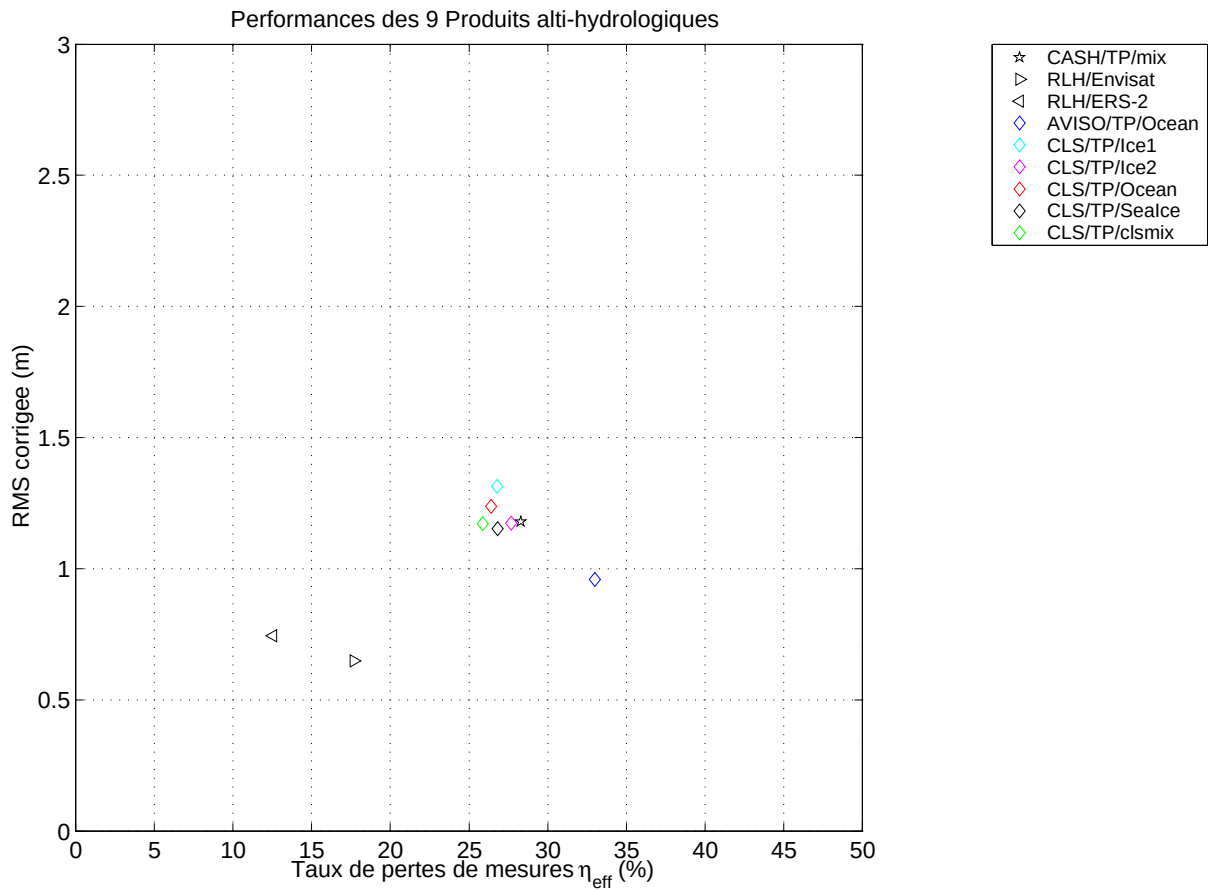


FIG. 7.26: Comparaison de la qualité des 9 produits alti-hydrologiques CASH, AVISO, CLS et River & Lake Hydrology sur un jeu homogène de 8 stations virtuelles.

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques sur 8 stations virtuelles										
Produit Alti-Hydrologique	Nb SV	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires			
		$R\hat{M}S_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ (m)
CASH/TP/mix	8	1,18	1,08	0,40	14,0	28,3	1,20	1,11	1,11	0,25
RLH/Envisat	8	0,65	0,60	0,12	45,1	17,7	0,69	0,65	0,57	0,25
RLH/ERS-2	7	0,74	0,69	0,19	42,5	12,5	0,78	0,74	1,56	0,26
AVISO/TP/Ocean	8	0,96	0,90	0,25	15,0	33,0	1,00	0,93	-0,06	0,25
CLS/TP/Ice1	8	1,31	1,21	0,41	13,6	26,8	1,34	1,24	0,80	0,25
CLS/TP/Ice2	8	1,17	1,11	0,26	13,8	27,7	1,20	1,15	0,52	0,25
CLS/TP/Ocean	8	1,24	1,16	0,33	13,5	26,4	1,27	1,20	1,12	0,25
CLS/TP/SeaIce	8	1,15	1,09	0,25	13,6	26,8	1,18	1,13	0,39	0,25
CLS/TP/clsmix	8	1,17	1,08	0,32	13,4	25,9	1,20	1,12	0,72	0,25

¹ Produits alti-hydrologiques construits avec la chaîne de filtrage « fg3s-fcr2p5s-opp ».

TAB. 7.24: Table de comparaison des indicateurs de qualité des 9 produits alti-hydrologiques CASH, AVISO, CLS et River & Lake Hydrology sur 8 stations virtuelles.

Ces résultats confirment la remarque faite à la section 7.5.4.1 sur la non pertinence de la comparaison brute des performances des produits alti-hydrologiques sur des jeux hétérogènes de stations virtuelles. La figure 7.23 pouvait laisser croire que le produit alti-hydrologique CASH était dans l'absolu meilleur que les produits CLS et AVISO alors que cette différence de performances était liée au fait que les produits CLS et AVISO étaient testés sur une plus grande diversité de stations virtuelles, notamment de faibles largeurs de cours d'eau.

Dans la section suivante, nous comparons les performances des produits alti-hydrologiques non plus sur les mêmes stations virtuelles voisines mais sur le même cours d'eau.

B. Comparaison des 10 produits alti-hydrologiques sur le système fluvial Solimões-Amazone

Les produits alti-hydrologiques issus d'une part de Topex/Poseidon et d'autre part de ERS-2 et ENVISAT ne coïncident qu'exceptionnellement sur les mêmes stations virtuelles. Il est toutefois possible de les comparer de façon statistiquement significative en analysant leurs performances sur un même cours d'eau. Nous avons choisi pour cela le tronçon Solimões-Amazone, de Santarem à Tabatinga¹⁴, soit un linéaire de cours d'eau de 2400km, croisé par 11 traces Topex/Poseidon et 39 traces ERS-2/ENVISAT.

Sur ce tronçon, les produits alti-hydrologiques River & Lake Hydrology ENVISAT et ERS-2 sont analysés respectivement sur 11 et 17 stations virtuelles ; le produit CASH sur 5 stations virtuelles ; le produit [~Birkett 2002] sur 6 stations virtuelles ; et les produits AVISO et CLS sur 18 stations virtuelles.

La table 7.25 récapitule les indicateurs de qualité moyens des 10 produits alti-hydrologiques, calculés sur des ensembles homogènes de stations virtuelles (système fluvial Solimões-Amazone). La figure 7.27 illustre leur comparaison et la figure 7.28 présente les histogrammes de largeurs de fleuves correspondant aux stations virtuelles.

Commentaires : Après observation de la figure 7.27, nous pouvons regrouper les produits alti-hydrologiques en sous-ensembles :

1. [$RMS < 1\text{m}$ et $\eta_{\text{eff}} < 20\%$] : les deux produits alti-hydrologiques du projet River & Lake Hydrology « RLH/ENVISAT » et « RLH/ERS-2 » se distinguent très nettement des autres produits en présentant à la fois les meilleures précisions RMS (0,69m et 0,92m respectivement) et les plus faibles taux de pertes de mesures altimétriques η_{eff} (13,5% et 12,3% respectivement).
2. [$1\text{m} < RMS < 1,5\text{m}$ et $\eta_{\text{eff}} > 40\%$] : le produit alti-hydrologique AVISO/M-GDR est caractérisé par une précision RMS (1,27m) et le plus fort taux de pertes de mesures (41,8%).
3. [$RMS > 1,5\text{m}$ et $20\% < \eta_{\text{eff}} < 40\%$] : les produits alti-hydrologiques CLS issus du retracking de la mission Topex/Poseidon avec le segment sol ENVISAT sont caractérisés par une précision de 1,83m et présentent des taux de pertes de mesures altimétriques autour de 28%. Le retracking a permis de diminuer significativement le taux de pertes par rapport au tracker « Ocean » d'AVISO (passage de 42% à ~ 38%) mais au prix de la dégradation de la précision (passage de ~ 1,3m à ~ 1,8m).
4. Le produit alti-hydrologique [~Birkett 2002], directement issu du produit altimétrique AVISO/M-GDR, présente une précision de 0,95m et un taux de pertes de mesures de 29,6%. Des fenêtres géographiques élargies au delà des rives du cours d'eau et englobant des zones d'inondation semblent avoir permis une amélioration de la précision (-0,32m) et une diminution du taux de pertes (-12%).
5. Le produit alti-hydrologique CASH, dérivé d'un produit équivalent au produit altimétrique CLS/clsmix, présente une précision de 1,55m et un taux de pertes de mesures de 27,7%. Ce gain apparent

¹⁴Nous avons exclu de cette analyse les traces de satellites croisant le tronçon de l'Amazone à l'aval de Santarem, tronçon soumis à l'effet de la marée océanique et pour lequel nous ne disposons pas d'un modèle fiable de reconstitution des niveaux [Kosuth, 2002; Kosuth et al., 2003, 2000, 1999].

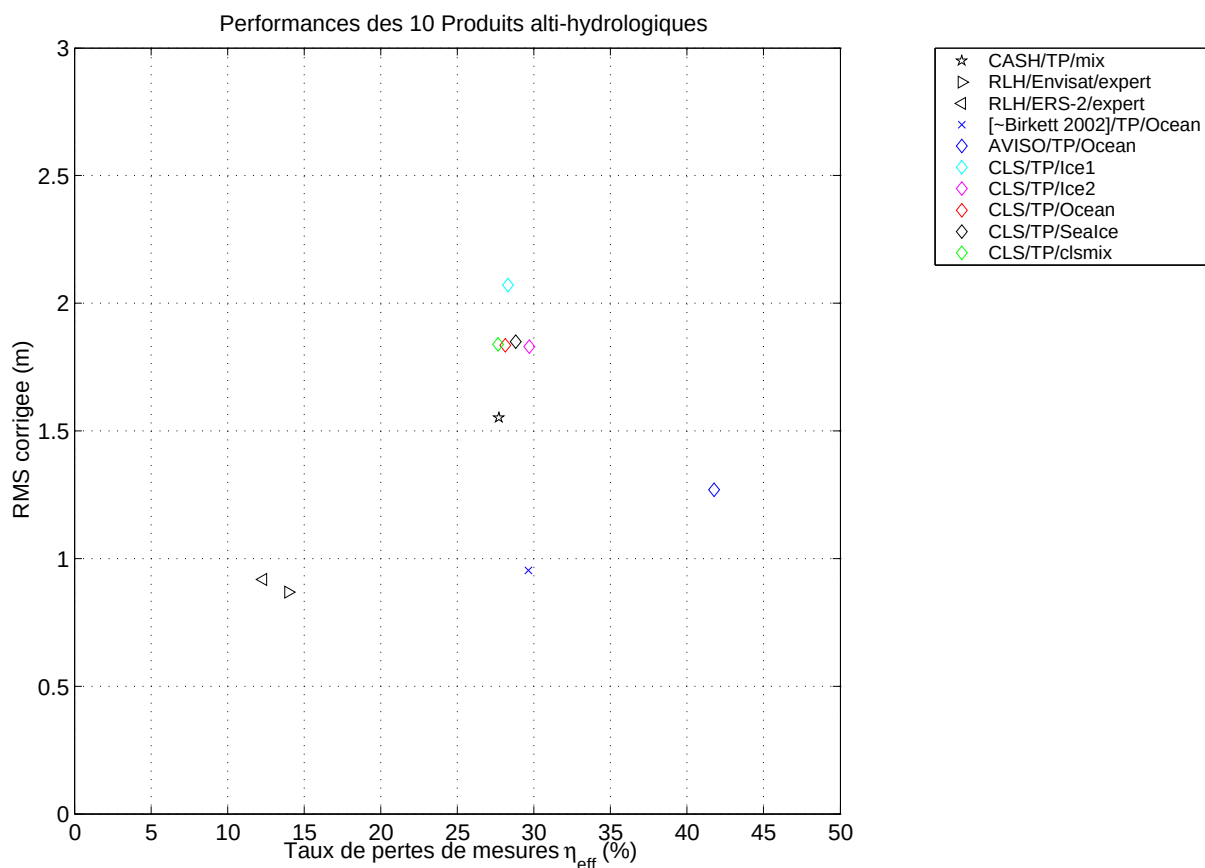


FIG. 7.27: Comparaison de 10 produits alti-hydrologiques pour les stations virtuelles situées sur le système fluvial Solimões-Amazone.

Indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques										
Produit Alti-Hydrologique	Nb SV	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires			
		RMS_{ε} (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
CASH/TP/mix	5	1,55	1,41	0,62	13,8	27,7	1,57	1,43	1,22	0,20
RLH/ENVISAT/exp.	11	0,69	0,65	0,02	40,6	13,5	0,74	0,71	0,61	0,27
RLH/ERS-2/expert	17	0,92	0,88	0,06	41,0	12,3	0,98	0,94	1,51	0,31
Birkett/TP/Ocean ¹	6	0,95	0,91	0,28	14,4	29,6	1,01	0,97	0,16	0,29
AVISO/TP/Ocean ¹	18	1,27	1,21	0,37	19,3	41,8	1,32	1,26	0,07	0,31
CLS/TP/Ice1 ¹	18	2,07	1,90	0,79	13,9	28,3	2,11	1,94	1,12	0,31
CLS/TP/Ice2 ¹	18	1,83	1,75	0,47	14,2	29,7	1,87	1,79	0,60	0,31
CLS/TP/Ocean ¹	18	1,84	1,72	0,57	13,9	28,1	1,87	1,77	1,36	0,31
CLS/TP/SeaIce ¹	18	1,85	1,75	0,53	14,0	28,8	1,89	1,80	0,55	0,31
CLS/TP/clsmix ¹	18	1,84	1,72	0,61	13,8	27,6	1,88	1,76	0,93	0,31

¹ Produits alti-hydrologiques construits avec la chaîne de filtrage « fg3s-fcr2p5s-opp ».

TAB. 7.25: Table récapitulative des indicateurs de qualité de 10 produits alti-hydrologiques pour les stations virtuelles situées sur le système fluvial Solimões-Amazone.

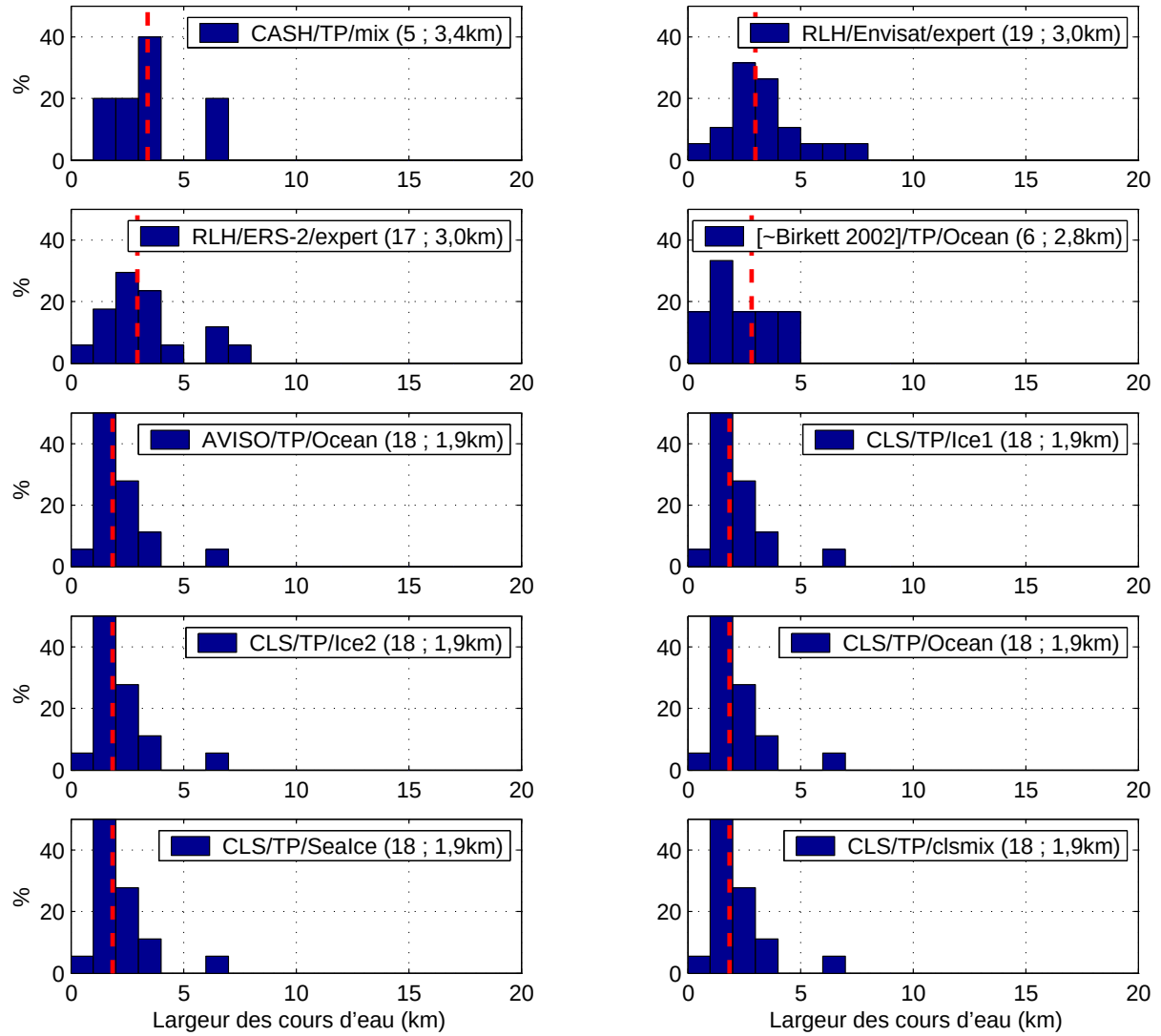


FIG. 7.28: Histogrammes des largeurs de rivières aux stations virtuelles des 10 produits alti-hydrologiques sur le système fluvial Solimões-Amazone (cf. table 7.25 et figure 7.27).

de précision de $-0,29\text{m}$ par rapport aux produits CLS est lié au fait (cf. section précédente **A.**) que les mesures CASH sont limitées à des stations virtuelles aval sur le système fluvial Solimões-Amazone avec des largeurs de cours d'eau plus élevées (valeurs médianes $3,4\text{km}$ pour CASH contre $1,9\text{km}$ pour CLS).

7.6 Conclusion générale sur la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques

Les chapitres 4, 5 et 6 ont permis de concevoir et réaliser une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques. Cette méthode a pour vocation de combler le manque actuel en matière de caractérisation objective de la précision des produits altimétriques pour l'hydrologie. Elle est donc destinée aux utilisateurs intéressés par le potentiel de l'altimétrie radar pour le suivi des eaux continentales. La figure 4.1 du chapitre 4 reprend de manière synthétique le schéma d'ensemble de la méthode, structuré en six étapes.

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre la méthode de façon systématique sur 10 produits alti-hydrologiques et nous pouvons à ce stade tirer trois groupes de conclusions.

Généricité de la méthode

La Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques a été conçue et développée de façon à être applicable à tout type de mission altimétrique, quel que soit le format des données, la période de revisite sur site du satellite, les corrections atmosphériques à utiliser, le standard horaire employé, etc.

La lecture des données d'un produit altimétrique ou produit alti-hydrologique nécessite toutefois le développement d'un module de lecture dédié. Les séries temporelles altimétriques résultantes sont ensuite converties sous une forme générique et standardisée permettant de les manipuler de manière transparente. La méthode est donc techniquement générique vis-à-vis des données qu'elle est capable de traiter, sous réserve que les modules de lecture des produits altimétriques ou produits alti-hydrologiques soient développés.

De façon générale, la méthode est applicable pour tout type de réseau hydrographique pour lequel on dispose d'un réseau de stations limnimétriques nivelées et qui ne présente pas de discontinuité hydrauliques (chutes d'eau, ouvrages, etc.). Nous avons utilisé dans le cadre de ce travail le bassin amazonien qui présente une grande diversité de conditions hydrologiques. La méthode est généralisable pour évaluer la qualité des produits alti-hydrologiques sur d'autres bassins.

Champs d'application de la méthode

L'éventail des champs d'application de la méthode est très large.

- Elle permet tout d'abord de caractériser statistiquement la précision et le taux de pertes de données d'un produit alti-hydrologique.
- Elle permet pour un même produit alti-hydrologique de comparer les performances de différents retrackers.
- Elle permet d'optimiser la stratégie de fenêtrage : nous avons ainsi montré qu'en première approche le fenêtrage calé sur les berges du fleuve donne la meilleure précision.
- Elle permet de comparer les performances de différentes stratégies de filtrages automatiques des données altimétriques pour adopter une procédure optimale.
- Elle permet de comparer sur des jeux homogènes de stations virtuelles la qualité de différents produits alti-hydrologiques.
- Elle permet, comme nous le verrons au chapitre suivant, d'analyser les déterminants physiques expliquant les erreurs d'altimétrie radar et de prévoir l'incertitude associée à une mesure.

Imperfections de la méthode

À ce stade, la principale imperfection de la méthode réside dans sa force : l'étape de reconstitution des séries temporelles in-situ aux stations virtuelles. En effet, la solution idéale qui consisterait en la mesure directe des niveaux par des stations limnimétriques nivelées implantées aux stations virtuelles n'est pas envisageable et nous sommes donc tenus à reconstituer systématiquement les séries temporelles in-situ aux stations virtuelles pour pouvoir évaluer les erreurs des mesures altimétriques sur un échantillon statistiquement significatif de stations virtuelles. C'est donc une étape critique dans la mesure où elle peut biaiser l'estimation des indicateurs de précision si le modèle de reconstitution utilisé est peu précis.

Nous avons adopté dans le cas du bassin amazonien une méthode de reconstitution présentée au chapitre 5 et nous avons pris soin d'estimer l'erreur de reconstitution associée (chapitre 6) en fonction de paramètres hydromorphologiques. Toute méthode de reconstitution plus performante (ayant une meilleure précision de reconstitution) pourra venir se substituer à la méthode actuelle comme le prévoit la structure modulaire de la méthode.

Dans le cadre de notre travail, une seconde imperfection - indépendante de la méthode - est liée à l'absence de nivellement de haute précision sur les stations limnimétriques du bassin amazonien. Ceci nous a amenés à ne traiter que de la précision relative des mesures altimétriques (à une constante près pour chacune des stations virtuelles) sans pouvoir traiter de façon approfondie de la précision absolue¹⁵. Cette étude de la précision relative repose sur la correction du biais constaté en périodes de hautes eaux, c'est à dire sur l'hypothèse d'une meilleure précision des mesures altimétriques en hautes eaux que pendant les autres périodes. Bien que vérifiée dans la grande majorité des cas, cette hypothèse souffre de quelques exceptions correspondant à des stations virtuelles où les mesures altimétriques sont très mauvaises.

¹⁵Pour aborder cette étude de la précision absolue, il sera nécessaire de travailler sur un réseau hydrographique disposant d'un nivellement de haute précision.

Chapitre 8

DÉTERMINATION DE L'INCERTITUDE ASSOCIÉE AUX MESURES ALTIMÉTRIQUES

Sommaire

8.1	Introduction : de la précision à l'incertitude	228
8.2	Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité des produits alti-hydrologiques	229
8.2.1	Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité pour le produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR	229
8.2.2	Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT	234
8.3	Détermination de l'incertitude associée à une mesure altimétrique individuelle	238
8.3.1	Cas des stations virtuelles où l'on dispose d'une période historique conjointe mesures altimétriques/mesures in-situ reconstituées	238
8.3.2	Cas des stations virtuelles où l'on ne dispose pas d'une période historique de mesures in-situ reconstituées	238
8.4	Conclusion sur la modélisation de l'incertitude	241

8.1 Introduction : de la précision à l'incertitude

Le chapitre précédent, à travers la mise en œuvre de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques, nous a permis de quantifier la précision et les taux de pertes de mesures alti-hydrologiques pour un produit alti-hydrologique donné sur le bassin amazonien.

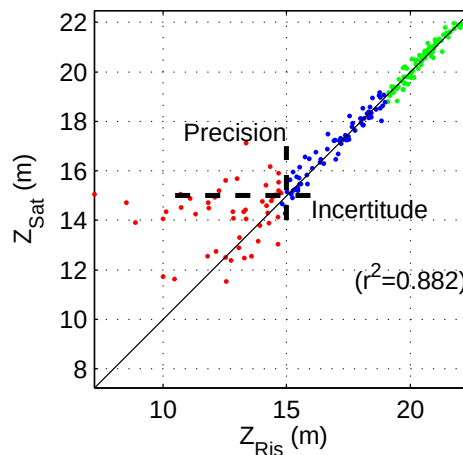
Cette quantification de la précision, qui fournit une information sur la qualité globale du produit est intéressante pour le spécialiste des technologies spatiales mais ne répond que partiellement au besoin des hydrologues. En effet, pour un hydrologue, l'enjeu principal est qu'une valeur d'incertitude soit associée à chaque mesure alti-hydrologique qui lui est fournie.

Le présent chapitre est consacré à la quantification de l'incertitude associée aux mesures alti-hydrologiques.

À ce stade, il est important de clarifier la distinction entre précision et incertitude. Toutes deux sont des caractérisations statistiques de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ :

- la précision est une caractérisation statistique de cette distribution par rapport aux valeurs in-situ (mesurées ou reconstituées). Elle signifie que la mesure alti-hydrologique est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{is} \pm \text{précision}]$. La précision est associée à la valeur in-situ.
- l'incertitude est une caractérisation statistique de cette distribution par rapport aux mesures alti-hydrologiques. Elle signifie que la valeur in-situ est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{Sat} \pm \text{incertitude}]$. L'incertitude est associée à la mesure alti-hydrologique.

Nous verrons plus loin que le modèle d'incertitude attaché à la mesure altimétrique peut être sensiblement différent du modèle de précision attaché à la valeur in-situ lorsque ces deux valeurs ne sont pas bien corrélées comme l'illustre la figure ci-dessous.



Une première section (8.2) présente l'analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité (précision et taux de pertes) d'un produit alti-hydrologique sur différentes stations virtuelles. Elle s'attache à expliquer pourquoi un même produit alti-hydrologique présente des performances très variables d'une station virtuelle à l'autre (cf. par exemple figure 7.9 où la précision du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR sur diverses stations virtuelles varie de 0, 25m à 4, 50m environ) et à modéliser ces performances en fonction de caractéristiques hydromorphologiques de la station virtuelle quantifiables *a priori*.

La seconde section (8.3) introduit les méthodes de quantification de l'incertitude associée aux mesures alti-hydrologiques sur une station virtuelle. Elle différencie deux cas de figure :

(§ 8.3.1) celui où l'on dispose pour cette station virtuelle d'une période historique conjointe mesures altimétriques/mesures in-situ reconstituées, qui permet une modélisation fine, spécifique à cette station virtuelle, de l'incertitude en fonction de la mesure altimétrique

(§ 8.3.2) le cas où l'on ne dispose pas d'une période historique de mesures in-situ reconstituées, ce qui nous oblige à utiliser les modèles généraux issus de la section précédente.

8.2 Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité des produits alti-hydrologiques sur différentes stations virtuelles

Dans cette section, nous analysons les déterminants de la qualité des produits alti-hydrologiques liés à la morphologie et à l'hydrologie des cours d'eau. Nous menons cette analyse successivement pour les produits alti-hydrologiques AVISO/TP/M-GDR et RLH/ENVISAT.

8.2.1 Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité pour le produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR

La figure 8.1 ci-dessous (identique à la figure 7.13) illustre la variabilité de la précision du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR sur 60 stations virtuelles du bassin amazonien et la relation entre cette précision et la largeur du fleuve.

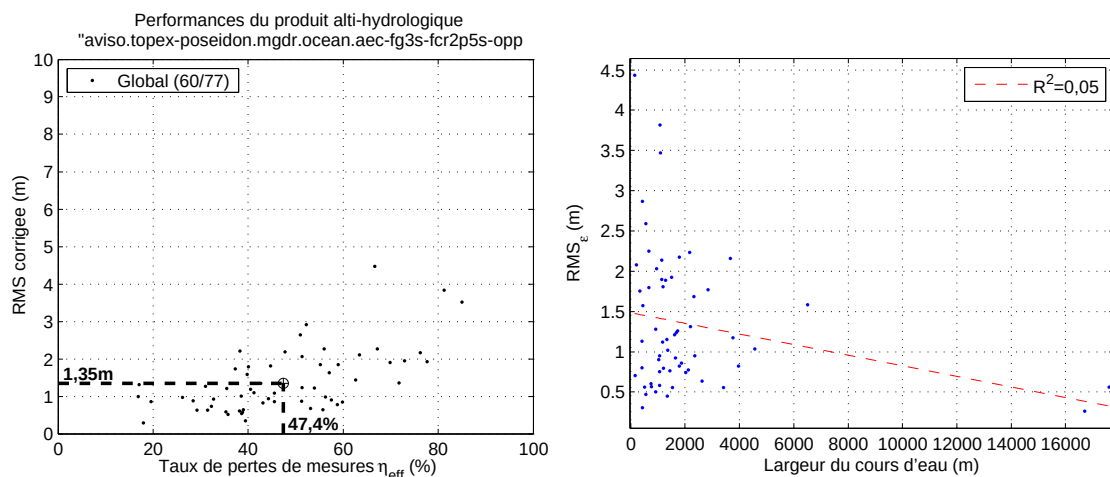


FIG. 8.1: Gauche : qualité du produit alti-hydrologique AVISO/M-GDR/Ocean (Topex/Poseidon) caractérisée sur 60 stations virtuelles du bassin amazonien ; Droite : relation entre précision RMS du produit alti-hydrologique et largeur du fleuve sur ces 60 stations virtuelles.

Deux constats s'imposent :

1. la précision au sein du produit alti-hydrologique AVISO/M-GDR/Ocean est très variable d'une station virtuelle à l'autre. Il serait donc très réducteur d'associer à une station virtuelle donnée les indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique. Il est préférable de comprendre les caractéristiques de la station virtuelle qui déterminent ses indicateurs de qualité.
2. la largeur du cours d'eau n'explique pas, dans le cas du produit altimétrique AVISO/TP/M-GDR, la variabilité de la qualité ($r^2 = 0,05$) : à titre d'exemple, les deux stations virtuelles présentant pour ce produit alti-hydrologique la meilleure précision ont des largeurs très différentes : ce sont la trace 76 sur le Rio Negro (largeur 16700m, précision RMS de 0,26m) et la trace 178 sur le Rio Jutai (largeur 920m, précision RMS de 0,30m). Par ailleurs, deux stations virtuelles de même largeur sur le même fleuve peuvent présenter des précisions très différentes, c'est le cas sur le Solimões des traces 89 (largeur 1500m, précision 3,81m) et 165 (largeur 1530m, précision 0,55m).

Nous avons testé différentes variables hydromorphologiques, caractérisant le plan d'eau et son environnement, susceptibles d'expliquer cette variabilité des performances :

$\mathcal{W}_R$: la largeur (en mètres) du cours d'eau à la station virtuelle,

$\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$: l'amplitude (en mètres) de variation (maximale observée) du niveau du plan d'eau.

ΔZ : le dénivelé (en mètres) entre terrain naturel et plan d'eau le long de la trace lors de l'approche du satellite. L'altitude moyenne du terrain naturel est calculée à partir du modèle numérique de terrain (MNT) SRTM30 pour différentes distances d'approche (100, 50, 30, 20, 10 et 5km). En raison des particularités de mesures de SRTM30 sur les plans d'eau (liées à la date de mesure et fortement bruitées), l'altitude moyenne du plan d'eau est calculée à partir de la série temporelle in-situ reconstituée (la cohérence entre une série temporelle in-situ reconstituée et SRTM30 a été vérifiée préalablement).

ΔZ_{HE} , ΔZ_{ME} , ΔZ_{BE} : le dénivelé peut également être déterminé pour chacune des trois périodes hydrologiques (hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux) selon que l'on considère les valeurs in-situ pour chacune de ces trois périodes (voir plus bas).

La table 8.1 présente les coefficients de corrélation des régressions linéaires monovariées entre les cinq indicateurs de qualité et chacune des trois premières variables hydromorphologiques ($\mathcal{W}_R$, $\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$ et ΔZ , avec différentes distances d'approche pour cette dernière).

Valeurs de r^2	$\hat{RMS}_\varepsilon$	$\hat{\sigma}_\varepsilon$	$\hat{\mu}_\varepsilon$	η_{eff}	T_{eff}
largeur $\mathcal{W}_R$	0,05	0,06	0,06	0,15	0,06
Amplitude $\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$	0,02	0,02	0,04	0,01	0,03
$\Delta Z_{5\text{km}}$	0,13	0,15	0,00	0,17	0,19
$\Delta Z_{10\text{km}}$	0,11	0,13	0,00	0,16	0,17
$\Delta Z_{20\text{km}}$	0,16	0,19	0,00	0,24	0,34
$\Delta Z_{30\text{km}}$	0,14	0,16	0,00	0,24	0,32
$\Delta Z_{50\text{km}}$	0,16	0,19	0,00	0,19	0,30
$\Delta Z_{100\text{km}}$	0,11	0,13	0,00	0,14	0,19

TAB. 8.1: Table des coefficients r^2 obtenus entre les déterminants hydromorphologiques des stations virtuelles et les 5 indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR.

On constate ainsi pour le produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR que seules les variables de dénivelé semblent potentiellement pertinentes pour expliquer une partie de la variabilité des indicateurs de qualité. La largeur du cours d'eau ainsi que l'amplitude du signal hydrologique paraissent relativement peu pertinents pour expliquer la qualité du produit alti-hydrologique sur une station virtuelle. Pour la suite des analyses, nous choisissons le dénivelé d'approche à 20 km.

Sur cette base, nous nous intéressons à la modélisation multivariable des indicateurs de qualité.

Modèles multivariés d'estimation des indicateurs de qualité

Des modèles multilinéaires d'estimation¹ peuvent être construits pour chacun des cinq indicateurs de qualité d'un produit alti-hydrologique.

Nous présentons dans cette section deux types de modèles d'estimation des indicateurs de qualité à la station virtuelle :

- (1) des modèles d'estimation globaux des indicateurs de qualité à la station virtuelle qui permettront une estimation de la précision moyenne du produit alti-hydrologique sur une station virtuelle,
- (2) des modèles d'estimation saisonniers qui permettront d'affiner l'estimation de la précision en fonction du niveau du plan d'eau à la station virtuelle.

¹ Cf. chapitre 6, section 6.3.4.1 (page 145) pour une description des modèles multivariés linéaires.

Modèles d'estimation globaux Un modèle « global » vise à estimer, pour une station virtuelle donnée, la valeur moyenne d'un indicateur de qualité caractérisant une série temporelle alti-hydrologique.

Les modèles globaux que nous construisons sont basés sur les cinq variables suivantes : $\mathcal{W}_R$, $\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$, $\Delta Z_{20km\ HE}$, $\Delta Z_{20km\ ME}$ et $\Delta Z_{20km\ BE}$, dont la matrice $\mathcal{D}$ ($5 \times N$, N étant le nombre de stations virtuelles) est confrontée au vecteur $\mathcal{I}$ de l'indicateur de qualité que nous souhaitons modéliser (de longueur N). Les coefficients $\mathcal{C}_g$ du modèle sont :

$$\mathcal{C}_g = [\mathcal{D}'^T \mathcal{D}']^{-1} \mathcal{D}'^T \mathcal{I}$$

avec : $\mathcal{D}' = [1, \mathcal{D}] = [1, \mathcal{W}_R, \mathcal{A}_{Z_{Ris}}, \Delta Z_{20km\ HE}, \Delta Z_{20km\ ME}, \Delta Z_{20km\ BE}]$

Les performances (coefficient r^2 et écart-type de l'erreur résiduelle des modèles σ) des modèles multilinéaires « globaux » construits pour l'estimation des cinq indicateurs de qualité sont présentés à la table 8.2.

À titre d'exemple, l'équation (8.1) de modélisation multilinéaire de l'indicateur de précision $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ sur les stations virtuelles du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR est :

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}} &= 0,483659 - 0,000035.\mathcal{W}_R - 0,050189.\mathcal{A}_{Z_{Ris}} \\ &+ 0,165520.\Delta Z_{20km\ BE} - 0,036513.\Delta Z_{20km\ ME} - 0,107713.\Delta Z_{20km\ HE} \end{aligned} \quad (8.1)$$

La figure 8.2 illustre la corrélation entre les valeurs réelles des indicateurs de précision et les valeurs estimées issues des modèles (i.e. sorties des modèles).

Modèles d'estimation saisonniers Un modèle « saisonnier » vise à estimer, pour une station virtuelle donnée, la valeur moyenne d'un indicateur de qualité caractérisant une mesure alti-hydrologique.

Ces modèles sont construits en confrontant les indicateurs de qualité pour les trois périodes hydrologiques (hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux) et les déterminants hydromorphologiques associés à ces périodes. L'ajustement des modèles est alors opéré sur un jeu de variables trois fois plus grand que pour les modèles globaux. Le dénivelé ΔZ_{20km} et le vecteur de l'indicateur de qualité à modéliser sont dans ce cas pris en compte sous la forme suivante :

$$\Delta Z_{20km} = \begin{bmatrix} \Delta Z_{20km\ HE} \\ \Delta Z_{20km\ ME} \\ \Delta Z_{20km\ BE} \end{bmatrix} \quad \mathcal{I} = \begin{bmatrix} \mathcal{I}_{HE} \\ \mathcal{I}_{ME} \\ \mathcal{I}_{BE} \end{bmatrix}$$

Les coefficients $\mathcal{C}_s$ du modèle saisonnier sont :

$$\mathcal{C}_s = [\mathcal{D}'^T \mathcal{D}']^{-1} \mathcal{D}'^T \mathcal{I}$$

avec : $\mathcal{D}' = [1, \mathcal{W}_R, \mathcal{A}_{Z_{Ris}}, \Delta Z_{20km}]$

Les performances (coefficient r^2 et écart-type de l'erreur résiduelle des modèles σ) des modèles multilinéaires « saisonniers » construits pour l'estimation des cinq indicateurs de qualité sont présentés à la table 8.3.

À titre d'exemple, l'équation (8.2) de modélisation multilinéaire de l'indicateur de précision $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ sur les stations virtuelles du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR est :

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}} = 0,219645 - 0,000029.\mathcal{W}_R + 0,023635.\mathcal{A}_{Z_{Ris}} + 0,027905.\Delta Z_{20km} \quad (8.2)$$

La figure 8.3 illustre la corrélation entre les valeurs réelles des indicateurs de précision et les valeurs estimées issues des modèles (i.e. sorties des modèles).

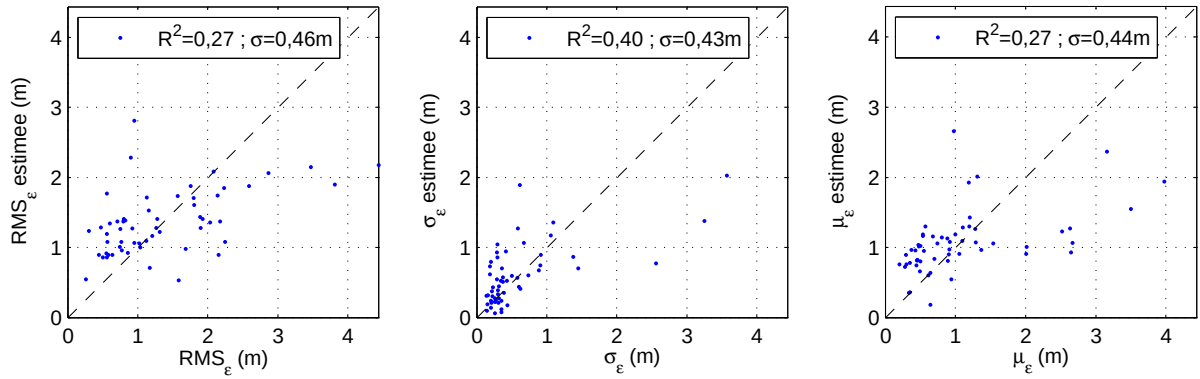


FIG. 8.2: Modèles globaux : Illustration de la sortie des modèles multivariables d'estimation des indicateurs de précision pour le produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR en fonction de leurs valeurs réelles. La ligne en pointillé illustre la droite de corrélation idéale. Les valeurs de σ présentées dans les graphiques sont les écart-types de l'erreur résiduelle des modèles.

Modèles	$\hat{RMS}_\varepsilon$	$\hat{\sigma}_\varepsilon$	$\hat{\mu}_\varepsilon$	η_{eff}	T_{eff}
r^2	0,27	0,28	0,24	0,39	0,40
σ	0,46	0,44	0,22	6,34	10,01

TAB. 8.2: Modèles globaux : Table des coefficients r^2 et des valeurs d'écart-types de l'erreur résiduelle des modèles d'estimation des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR.

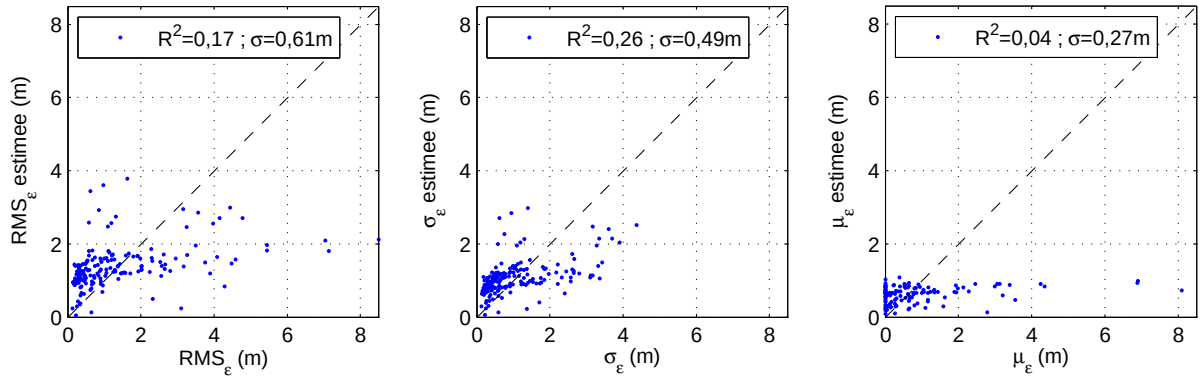


FIG. 8.3: Modèles saisonniers : Illustration de la sortie des modèles multivariables d'estimation des indicateurs de précision pour le produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR en fonction de leurs valeurs réelles. La ligne en pointillé illustre la droite de corrélation idéale. Les valeurs de σ présentées dans les graphiques sont les écart-types de l'erreur résiduelle des modèles.

Modèles	$\hat{RMS}_\varepsilon$	$\hat{\sigma}_\varepsilon$	$\hat{\mu}_\varepsilon$	η_{eff}	T_{eff}
r^2	0,17	0,26	0,04	0,23	0,26
σ	0,61	0,49	0,27	8,71	11,49

TAB. 8.3: Modèles saisonniers : Table des coefficients r^2 et des valeurs d'écart-types de l'erreur résiduelle des modèles d'estimation des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR.

Commentaires sur les modèles de qualité du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR en fonction de paramètres hydromorphologiques

Les modèles d'estimation des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR que nous avons construits à partir des déterminants hydromorphologiques des stations virtuelles, sont de qualité relativement faible et sont caractérisés par des coefficients r^2 allant de 0,24 à 0,40 pour les modèles globaux et de 0,04 à 0,26 pour les modèles saisonniers. Le fait que les modèles saisonniers présentent des coefficients r^2 plus faibles est probablement lié à la non-linéarité des phénomènes mis en jeu avec le dénivelé (cf. figure 8.2 comparée à figure 8.3).

En l'absence de modélisations plus performantes, l'estimation de la qualité du produit alti-hydrologique sur une station virtuelle à l'aide de ces modèles (même faiblement explicatifs) reste préférable à l'utilisation des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique. La figure 8.4 illustre que les modèles globaux (à gauche) et saisonniers (à droite) restituent de manière représentative la variabilité générale de la qualité du produit alti-hydrologique sur les 60 stations virtuelles du bassin amazonien.

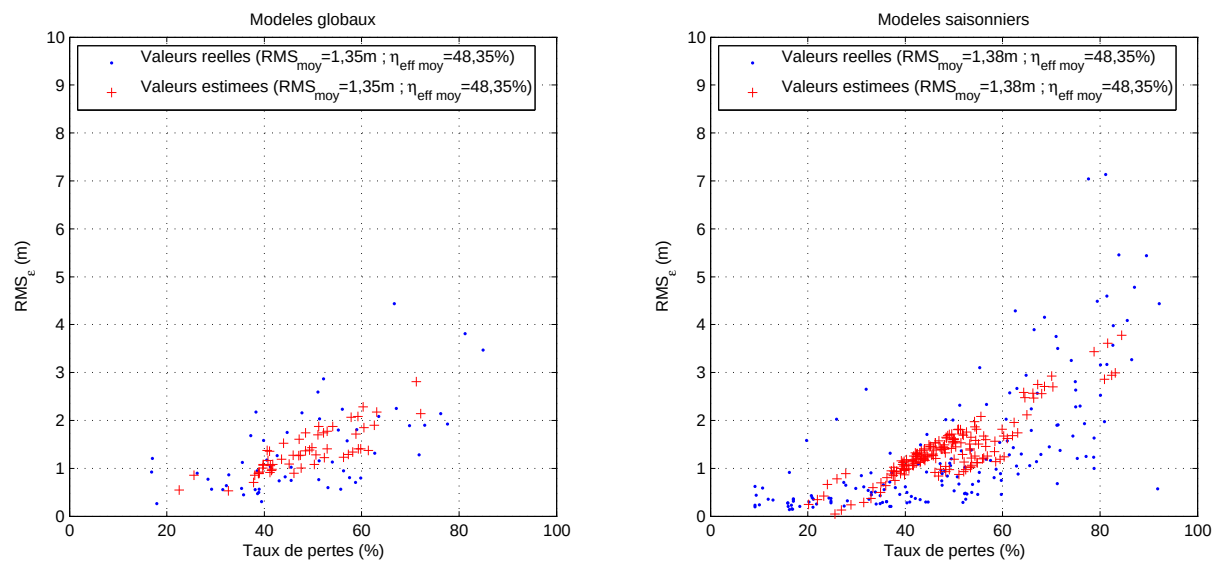


FIG. 8.4: Comparaison entre les valeurs réelles des indicateurs de qualité RMS et η_{eff} du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR aux valeurs issues des modèles globaux et saisonniers.

Dans le cas du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR, les principaux résultats que nous pouvons retenir sont :

- la largeur du cours d'eau n'est pas un facteur explicatif de la qualité du produit alti-hydrologique,
- le dénivelé d'approche sur 20km entre terrain naturel et plan d'eau semble être un facteur explicatif (faiblement) de la qualité du produit alti-hydrologique.

D'autres variables hydromorphologiques à identifier pourraient éventuellement permettre de mieux expliquer la variabilité des indicateurs de qualité d'un même produit alti-hydrologique d'une station virtuelle à l'autre. Nous venons d'illustrer que notre approche statistique permet d'identifier certaines causes de dysfonctionnement du tracker Ocean et, de façon générale, d'un algorithme de retracking.

8.2.2 Analyse des déterminants hydromorphologiques de la qualité pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT

Nous menons ici la même analyse qu'à la section 8.2.1, pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT. La figure 8.5 ci-dessous (identique à la figure 7.10) illustre la variabilité de la précision du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT sur 41 stations virtuelles du bassin amazonien et la relation entre cette précision et la largeur du fleuve.

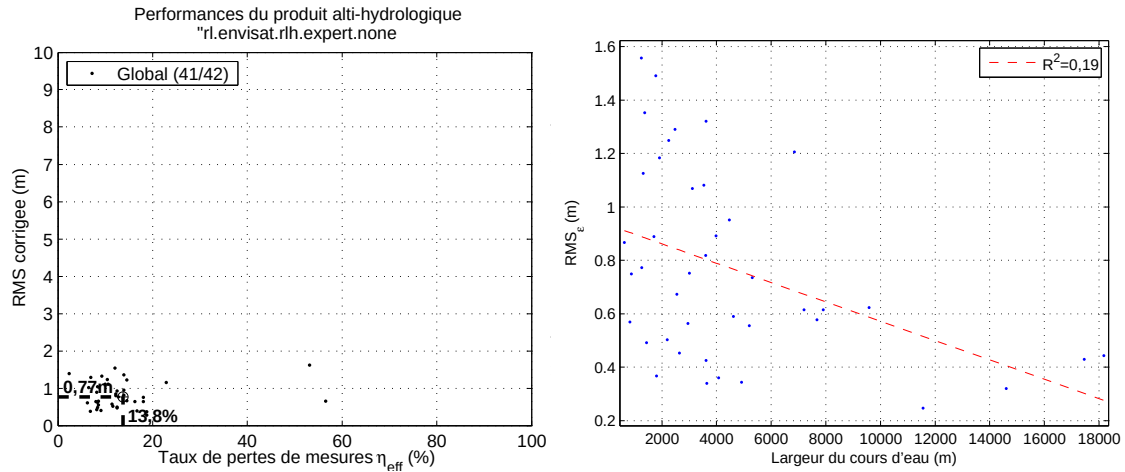


FIG. 8.5: Gauche : qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT caractérisée sur 41 stations virtuelles du bassin amazonien ; Droite : relation entre précision RMS du produit alti-hydrologique et largeur du fleuve sur ces 41 stations virtuelles.

On constate que la précision sur les stations virtuelles de ce produit alti-hydrologique est moins dispersée que pour le produit AVISO. D'autre part, l'indicateur de précision RMS est un peu plus sensible à la largeur du cours d'eau ($r^2 = 0,19$) que dans le cas du produit AVISO ($r^2 = 0,05$).

La table 8.4 présente les coefficients de corrélation des régressions linéaires monovariabiles entre les cinq indicateurs de qualité et chacune des 8 variables hydromorphologiques.

Valeurs de r^2	RMS_{ε}	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$	η_{eff}	T_{eff}
largeur $\mathcal{W}_R$	0,19	0,22	0,01	0,00	0,00
Amplitude $\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$	0,27	0,33	0,00	0,02	0,02
$\Delta Z_{5\text{km}}$	0,00	0,00	0,10	0,00	0,01
$\Delta Z_{10\text{km}}$	0,00	0,00	0,08	0,01	0,02
$\Delta Z_{20\text{km}}$	0,01	0,01	0,04	0,01	0,03
$\Delta Z_{30\text{km}}$	0,01	0,01	0,03	0,00	0,01
$\Delta Z_{50\text{km}}$	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00
$\Delta Z_{100\text{km}}$	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00

TAB. 8.4: Table des coefficients r^2 obtenus entre les déterminants hydromorphologiques des stations virtuelles et les cinq indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT.

Dans le cas de ce produit alti-hydrologique, les variables de largeur de cours d'eau ($\mathcal{W}_R$) et d'amplitude du signal hydrologique ($\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$) portent une information permettant d'expliquer en partie la variabilité des indicateurs de précision. En revanche les variables de dénivélé semblent complètement décorréliées des indicateurs de qualité.

Modèles multivariables d'estimation des indicateurs de qualité

Des modèles multilinéaires peuvent être construits pour chaque indicateur de qualité, à partir des variables hydromorphologiques : largeur du plan d'eau ($\mathcal{W}_R$), amplitude de la série temporelle in-situ reconstituée ($\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$), et éventuellement dénivelé à 20km (ΔZ) et ses déclinaisons par saison.

Modèles d'estimation globaux Les modèles multivariables globaux que nous construisons sont basés sur les cinq variables suivantes : $\mathcal{W}_R$, $\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$, $\Delta Z_{20km HE}$, $\Delta Z_{20km ME}$ et $\Delta Z_{20km BE}$, avec sélection automatique pour chaque modèle des variables pertinentes (cf. § 6.3.4.3, page 146).

Les performances (coefficient r^2 et écart-type de l'erreur résiduelle des modèles σ) des modèles multilinéaires « globaux » construits pour l'estimation des cinq indicateurs de qualité sont présentés à la table 8.5.

À titre d'exemple, l'équation (8.3) de modélisation multivariable de l'indicateur de précision $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT est :

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}} = -0,005884 - 0,000021.\mathcal{W}_R + 0,054160.\mathcal{A}_{Z_{Ris}} + 0,004333.\Delta Z_{20km HE} \quad (8.3)$$

La figure 8.6 illustre la corrélation entre les valeurs réelles des indicateurs de précision et les valeurs estimées issues des modèles.

Modèles d'estimation saisonniers Les modèles multivariables que nous construisons sont basés sur les cinq variables suivantes : $\mathcal{W}_R$, $\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$, $\Delta Z_{20km HE}$, $\Delta Z_{20km ME}$ et $\Delta Z_{20km BE}$.

Les performances (coefficient r^2 et écart-type de l'erreur résiduelle des modèles σ) des modèles multilinéaires « saisonniers » construits pour l'estimation des cinq indicateurs de qualité sont présentés dans la table 8.6.

À titre d'exemple, l'équation (8.4) de modélisation multilinéaire de l'indicateur de précision $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ sur les stations virtuelles du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT est :

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}} = -0,016249 - 0,000020.\mathcal{W}_R + 0,039421.\mathcal{A}_{Z_{Ris}} + 0,007688.\Delta Z_{20km} \quad (8.4)$$

La figure 8.7 illustre la corrélation entre les valeurs réelles des indicateurs de précision et les valeurs estimées issues des modèles.

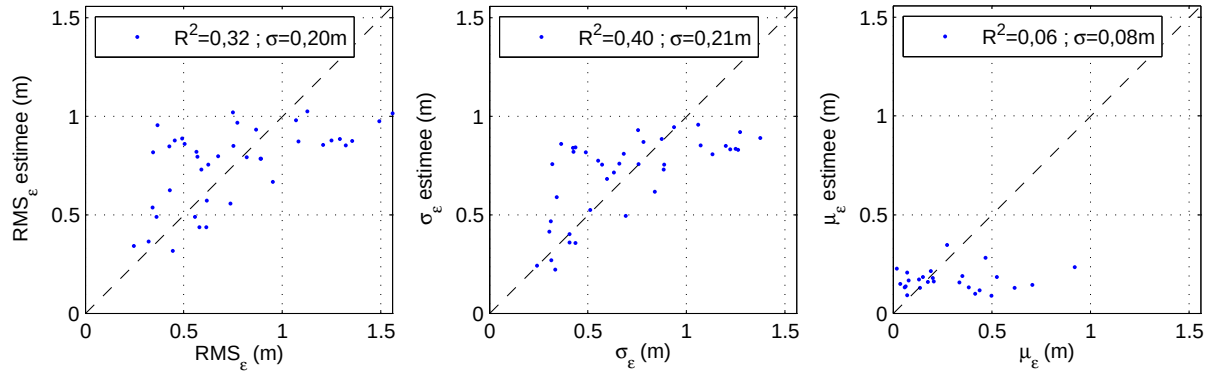


FIG. 8.6: Modèles globaux : Illustration de la sortie des modèles multivariables d'estimation des indicateurs de précision pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT en fonction de leurs valeurs réelles. La ligne en pointillé illustre la droite de corrélation idéale. Les valeurs de σ présentées dans les graphiques sont les écart-types de l'erreur résiduelle des modèles.

Modèles	$R\hat{M}S_{\varepsilon}$	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$	η_{eff}	T_{eff}
r^2	0,32	0,40	0,06	0,17	0,20
σ	0,20	0,21	0,08	3,59	4,60

TAB. 8.5: Modèles globaux : Table des coefficients r^2 et des valeurs d'écart-types de l'erreur résiduelle des modèles des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT.

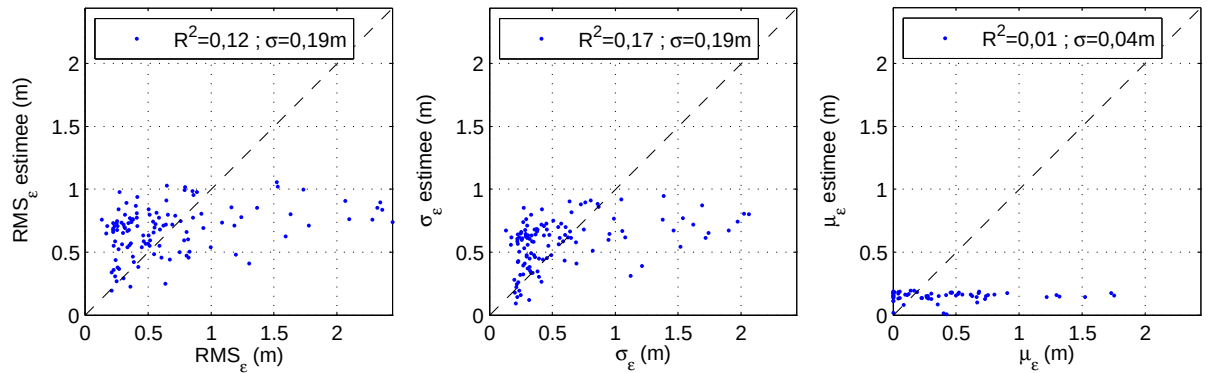


FIG. 8.7: Modèles saisonniers : Illustration de la sortie des modèles multivariables d'estimation des indicateurs de précision pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT en fonction de leurs valeurs réelles. La ligne en pointillé illustre la droite de corrélation idéale. Les valeurs de σ présentées dans les graphiques sont les écart-types de l'erreur résiduelle des modèles.

Modèles	$R\hat{M}S_{\varepsilon}$	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$	η_{eff}	T_{eff}
r^2	0,12	0,17	0,01	0,03	0,02
σ	0,19	0,19	0,04	2,22	2,25

TAB. 8.6: Modèles saisonniers : Table des coefficients r^2 et des valeurs d'écart-types de l'erreur résiduelle des modèles des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT.

Commentaires sur les modèles de qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT en fonction de paramètres hydromorphologiques

Les modèles d'estimation des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT que nous avons construits à partir des déterminants hydromorphologiques des stations virtuelles, sont de qualité relativement faible, tout comme le produit AVISO, et sont caractérisés par des coefficients r^2 allant de 0,06 à 0,40 pour les modèles globaux et de 0,01 à 0,17 pour les modèles saisonniers.

En l'absence de modélisations plus performantes, l'estimation de la qualité du produit alti-hydrologique sur une station virtuelle à l'aide de ces modèles (même faiblement explicatifs) reste préférable à l'utilisation des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique. La figure 8.8 illustre que les modèles globaux (à gauche) restituent de manière représentative la variabilité générale de la qualité du produit alti-hydrologique sur les 60 stations virtuelles du bassin amazonien. Les modèles saisonniers (à droite) ne semblent pas pertinents.

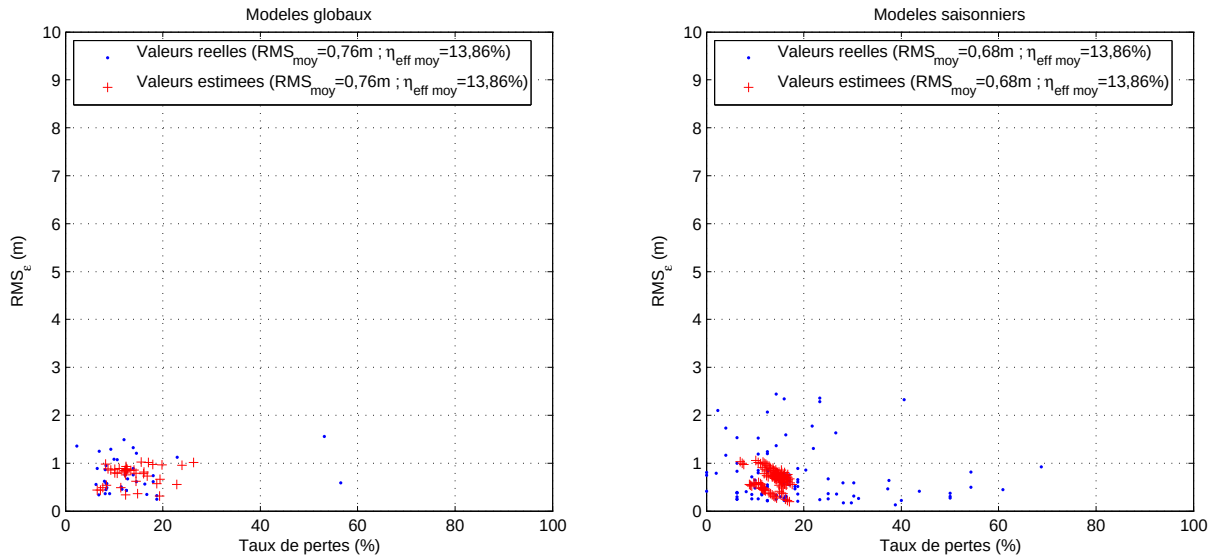


FIG. 8.8: Comparaison entre les valeurs réelles des indicateurs de qualité RMS et η_{eff} du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT aux valeurs issues des modèles globaux et saisonniers.

Dans le cas du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT, les principaux résultats que nous pouvons retenir sont :

- la largeur du cours d'eau ($\mathcal{W}_R$) et l'amplitude du signal hydrologique ($\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$) sont des facteurs explicatifs (faiblement) de la qualité du produit alti-hydrologique,
- le dénivelé d'approche sur 20km entre terrain naturel et plan d'eau n'est pas un facteur explicatif de la qualité du produit alti-hydrologique.

8.3 Détermination de l'incertitude associée à une mesure altimétrique individuelle

Nous développons ici les méthodes permettant de quantifier, à destination des hydrologues, l'incertitude associée à une mesure altimétrique issue d'un produit alti-hydrologique donné, sur une station virtuelle donnée. Nous distinguons deux cas selon qu'une période historique conjointe mesures altimétriques/mesures in-situ reconstituées a permis (1) ou non (2) de construire pour cette station virtuelle un modèle de l'incertitude en fonction de la mesure altimétrique.

8.3.1 Cas des stations virtuelles où l'on dispose d'une période historique conjointe mesures altimétriques/mesures in-situ reconstituées

8.3.1.1 Modélisation de la précision des mesures sur la station virtuelle

Dans ce cas l'analyse de la distribution de l'erreur, sur la période historique conjointe mesures altimétriques/mesures in-situ reconstituées, permet de construire un modèle de la précision $[\hat{\mu}_{\mathcal{M}_p}(Z_{Ris}); \hat{\sigma}_{\mathcal{M}_p}(Z_{Ris})]$ en fonction du niveau in-situ comme l'illustre la figure 8.9.

8.3.1.2 Illustration de l'impact de la précision sur la dispersion des mesures autour des valeurs in-situ

Sur la base de ce modèle de précision il est possible de prévoir, pour une série temporelle in-situ particulière, dans quelle bande de valeurs vont statistiquement s'inscrire les mesures altimétriques.

$$Z_{Sat} \in [Z_{Ris} + \hat{\mu}_{\mathcal{M}_p}(Z_{Ris}) \pm \hat{\sigma}_{\mathcal{M}_p}(Z_{Ris})] \quad (8.5)$$

La figure 8.9 illustre ce processus de mesure. On constate que 181 mesures sur 198, soit $\sim 91\%$ s'inscrivent dans la bande de valeurs.

8.3.1.3 Modélisation de l'incertitude des mesures sur la station virtuelle

À partir de la distribution de l'erreur, il est également possible de construire un modèle de l'incertitude en fonction de la mesure altimétrique $[\hat{\mu}_{\mathcal{M}_i}(Z_{Sat}); \hat{\sigma}_{\mathcal{M}_i}(Z_{Sat})]$ comme l'illustre la figure 8.10. La seule différence avec la figure 8.9 réside dans l'axe des abscisses.

8.3.1.4 Application à la détermination de l'incertitude associée à une mesure altimétrique individuelle

Sur la base de ce modèle il est possible de prévoir, pour une série temporelle alti-hydrologique particulière, dans quels intervalles d'incertitude autour des mesures alti-hydrologiques, passe la série temporelle in-situ.

$$Z_{Ris} \in [Z_{Sat} - \hat{\mu}_{\mathcal{M}_i}(Z_{Sat}) \pm \hat{\sigma}_{\mathcal{M}_i}(Z_{Sat})] \quad (8.6)$$

C'est cette information qui sera fournie aux hydrologues. La figure 8.10 illustre ce processus de mesure. On constate que la série temporelle in-situ (reconstituée) passe par 176 intervalles d'incertitude sur 198, soit $\sim 88\%$.

8.3.2 Cas des stations virtuelles où l'on ne dispose pas d'une période historique de mesures in-situ reconstituées

Dans le cas de stations virtuelles où l'on ne dispose pas d'une période historique de mesures in-situ reconstituées, l'estimation de l'incertitude ne peut reposer que sur l'analyse statistique sur un grand nombre de stations virtuelles du bassin.

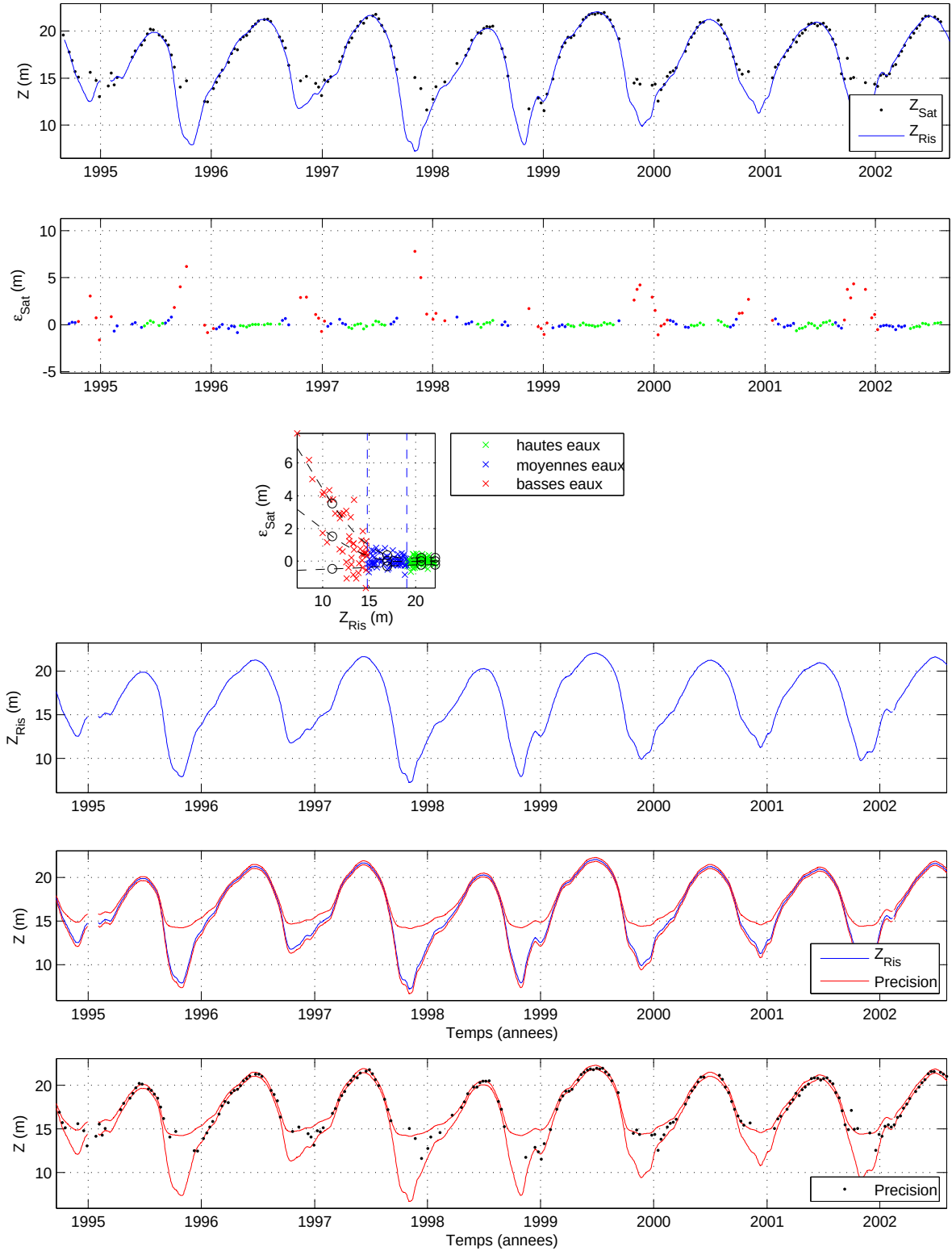


FIG. 8.9: Illustration de la construction d'un modèle de précision des mesures alti-hydrologiques et de son application. L'exemple s'appuie sur une station virtuelle à l'intersection entre la trace 63 de Topex/Poseidon et le fleuve Solimões. De haut en bas : (1) Les deux séries temporelles alti-hydrologique et in-situ reconstituée permettent de construire la série temporelle de l'erreur des mesures altimétriques (2). (3) Le modèle de précision $\mathcal{M}_p$ ($\hat{\mu}_{\mathcal{M}_p}$ et $\hat{\sigma}_{\mathcal{M}_p}$) est construit à partir des indicateurs de précision de l'erreur des mesures alti-hydrologiques par ajustement de courbes (noires en pointillé) sur les points de contrôle (ronds noirs). (4) Série temporelle in-situ reconstituée Z_{Ris} , à laquelle (5) on superpose les limites de précision $[\hat{\mu}_{\mathcal{M}_p}(Z_{Ris}) \pm \hat{\sigma}_{\mathcal{M}_p}(Z_{Ris})]$. (6) On vérifie que les mesures alti-hydrologiques sont, dans de bonnes proportions ($\sim 91\%$ des cas), situées dans l'intervalle de précision.

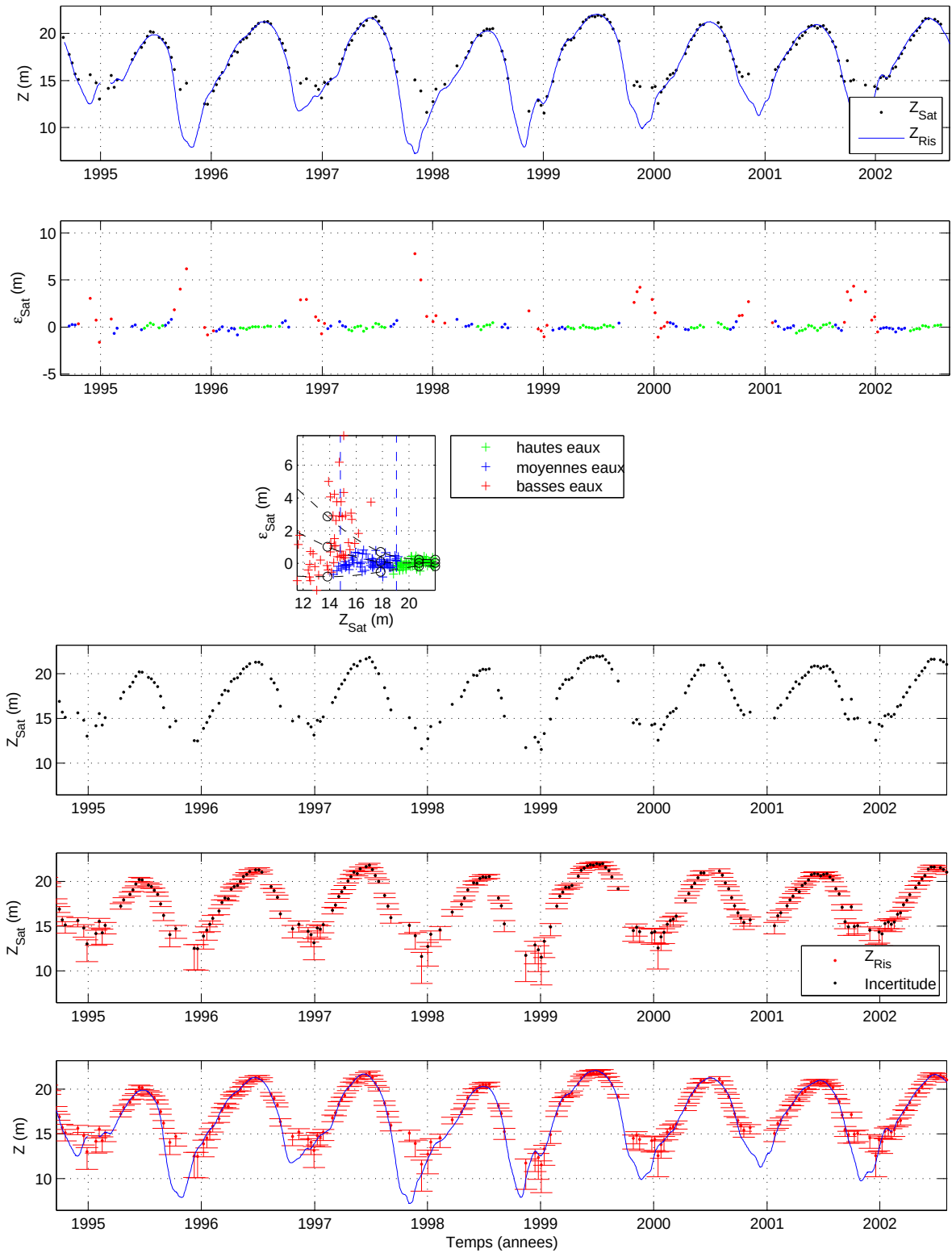


FIG. 8.10: Illustration de la construction d'un modèle d'incertitude des mesures alti-hydrologiques et de son application. L'exemple s'appuie sur une station virtuelle à l'intersection entre la trace 63 de Topex/Poseidon et le fleuve Solimões. De haut en bas : (1) Les deux séries temporelles alti-hydrologique et in-situ reconstituée permettent construire la série temporelle de l'erreur des mesures altimétriques (2). (3) Le modèle d'incertitude $\mathcal{M}_i$ ($\hat{\mu}_{\mathcal{M}_i}$ et $\hat{\sigma}_{\mathcal{M}_i}$) est contruit à partir des indicateurs de précision de l'erreur des mesures alti-hydrologiques par ajustement de courbes (noires en pointillé) sur les points de contrôle (ronds noirs). (4) Série temporelle alti-hydrologique Z_{Sat} , à laquelle (5) on superpose les barres d'incertitude $[\hat{\mu}_{\mathcal{M}_i}(Z_{Sat}) \pm \hat{\sigma}_{\mathcal{M}_i}(Z_{Sat})]$. (6) On vérifie que la série temporelle in-situ reconstituée passe, dans de bonnes proportions ($\sim 88\%$ des cas), par les barres d'incertitude.

Nous pouvons alors nous trouver dans deux cas de figure :

- soit nous disposons d'informations sur l'hydromorphologie de la station virtuelle,
- soit nous n'en disposons pas.

8.3.2.1 Modélisation de l'incertitude à partir d'une information sur l'hydromorphologie

Comme nous l'avons vu à la section 8.2, la connaissance d'une information sur l'hydromorphologie de la station virtuelle nous permet d'employer les modèles de prévision de l'incertitude sensiblement plus précis que le modèle moyen.

$$Z_{Ris} \in [Z_{Sat} - \hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}(\mathcal{W}_R, \mathcal{A}_{Z_{Ris}}, \Delta Z) \pm \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}(\mathcal{W}_R, \mathcal{A}_{Z_{Ris}}, \Delta Z)]$$

Ces modèles peuvent être globaux ou bien saisonniers.

8.3.2.2 Détermination de l'incertitude sans information sur l'hydromorphologie

Dans ce cas, l'incertitude est l'incertitude moyenne du produit alti-hydrologique qui n'est autre que la précision moyenne du produit.

$$Z_{Ris} \in [Z_{Sat} - \hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}} \pm \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}]$$

On peut toutefois affiner cette estimation de l'incertitude en différenciant les saisons de hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux à partir de l'analyse de la population de la série temporelle alti-hydrologique. On adopte alors pour chaque saison les valeurs moyennes des indicateurs de précision du produit alti-hydrologique.

8.4 Conclusion sur la modélisation de l'incertitude

En conclusion, une fois la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques mise en œuvre pour le produit alti-hydrologique considéré, le calcul de l'incertitude associée aux mesures alti-hydrologiques pour une station virtuelle particulière peut reposer sur trois méthodes, selon que l'on dispose ou non pour cette station virtuelle :

1. d'une période historique conjointe mesures altimétriques/mesures in-situ reconstituées,
2. de paramètres hydromorphologiques,
3. d'aucune information.

Ces trois méthodes sont de qualité décroissante.

Le schéma 8.11 présente l'organigramme de ces méthodes de la plus précise à la moins précise (de gauche à droite).

Enfin, la figure 8.12 illustre les valeurs d'incertitudes associées aux mesures alti-hydrologiques pour deux stations virtuelles voisines (distantes de 30km) sur le fleuve Solimões : l'une sur la trace 63 de Topex/Poseidon (produit alti-hydrologique CLS/clsmix), l'autre sur les traces 149 et 564 d'ENVISAT (produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT).

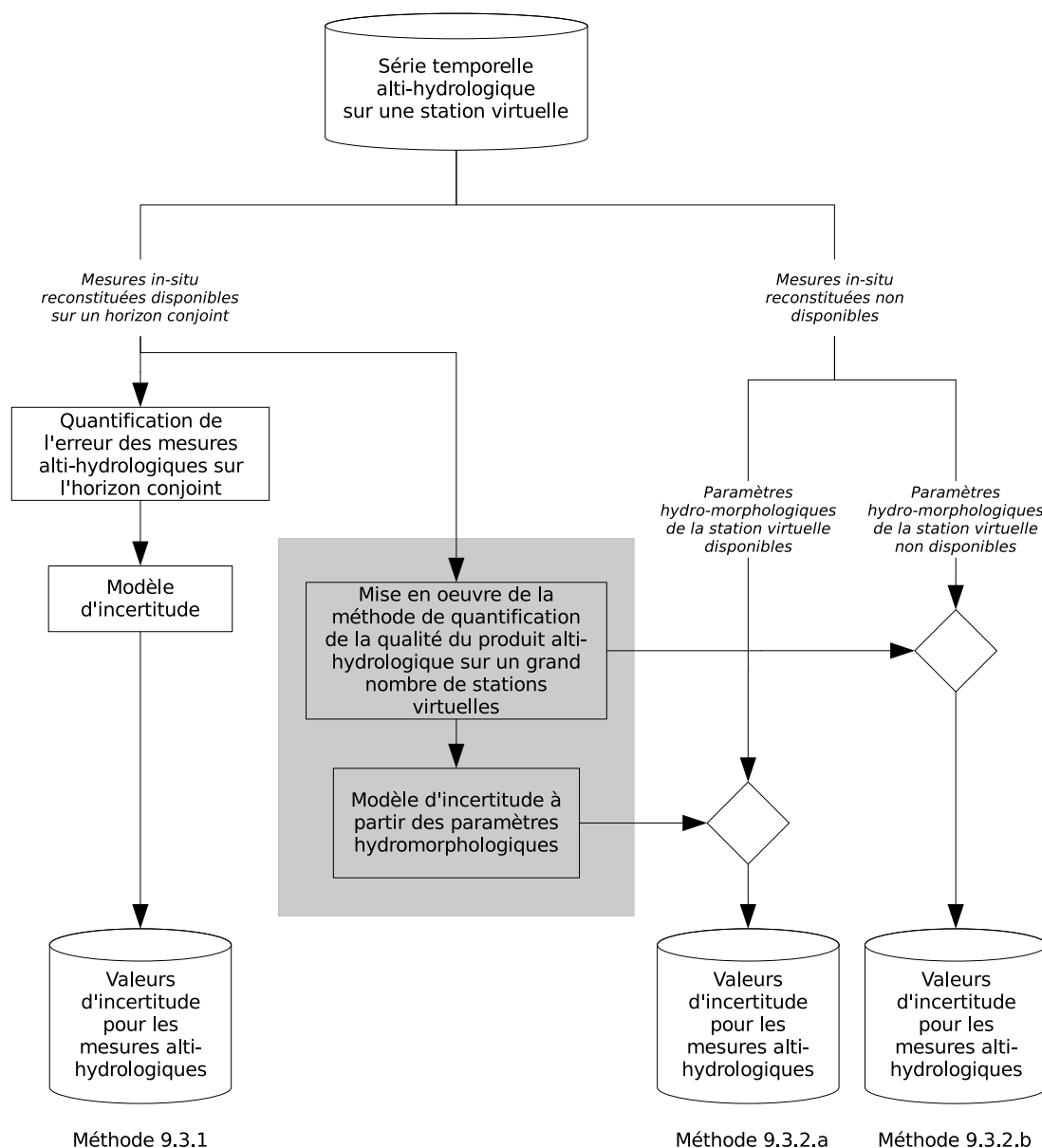


FIG. 8.11: Organigramme des méthodes de détermination de l'incertitude des mesures altimétriques, de gauche à droite : de la plus précise à la moins précise.

(§ 8.3.1) Si les mesures in-situ reconstituées sont disponibles à la station virtuelle, les modèles d'incertitude sont construits à partir des résultats de quantification de la qualité du produit alti-hydrologique.

(§ 8.3.2) Si ce n'est pas le cas, mais qu'une analyse antérieure de la qualité du produit alti-hydrologique (sur un nombre important de stations virtuelles) existe, deux autres possibilités se présentent :

- (§ 8.3.1.a) les paramètres hydromorphologiques sont disponibles et ont été mis en relation avec les indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique pour construire des modèles d'estimation : nous pouvons alors utiliser ces modèles pour estimer des valeurs d'incertitudes globale ou saisonnières,
- (§ 8.3.1.b) les paramètres hydromorphologiques ne sont pas disponibles : nous ne pouvons pas construire de modèle d'estimation de l'incertitude et nous utilisons les valeurs moyennes des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique comme valeur d'incertitude commune à toutes les stations virtuelles.

Dans les autres cas, nous ne sommes pas en mesure d'attribuer une valeur d'incertitude aux mesures altimétriques.

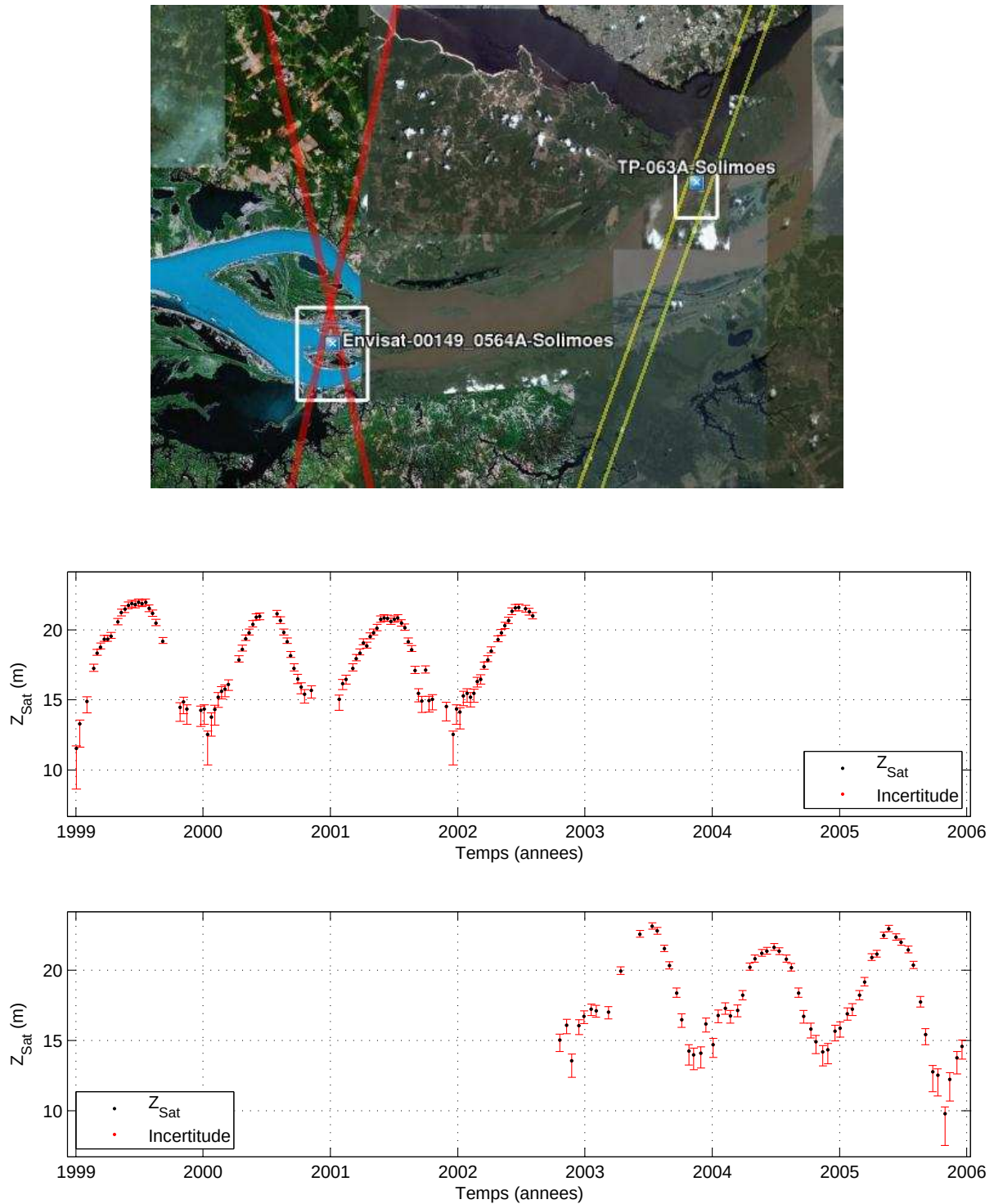


FIG. 8.12: Illustration de séries temporelles alti-hydrologiques avec valeurs d'incertitude associées. Les deux séries temporelles alti-hydrologiques sont issues de deux stations virtuelles voisines (distantes de 30km) sur le fleuve Solimões. En haut : station virtuelle sur la trace 63 de Topex/Poseidon (produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR) ; En bas : station virtuelle sur les traces 149 et 564 d'ENVISAT (produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT). Cette dernière série temporelle est construite par agglomération des mesures altimétriques collectées sur les deux traces 149 et 564, et présente une période d'échantillonnage inférieure à 35 jours (nominalement $\frac{35}{2}$ jours). On peut constater pour ces deux séries temporelles alti-hydrologiques que l'incertitude sur les mesures est plus grande pendant les périodes de basses eaux.

Chapitre 9

DE LA QUALITÉ ALTIMÉTRIQUE À LA QUALITÉ HYDROLOGIQUE

Sommaire

9.1	Introduction	246
9.2	Méthodes de suréchantillonnage temporel	246
9.2.1	Suréchantillonnage par interpolation linéaire ou polynomiale	246
9.2.2	Prise en compte des caractéristiques spectrales des signaux hydrologiques . . .	249
9.2.3	Méthodes de suréchantillonnage par approximation de signal à bande spectrale limitée	251
9.2.4	Conclusions	254
9.3	Quantification de la qualité hydrologique des produits alti-hydrologiques	255
9.3.1	« Qualité hydrologique » des séries temporelles limnimétriques reconstituées à partir de séries temporelles alti-hydrologiques	257
9.3.2	Application à l'hydrologie : détermination de l'incertitude associée à une série temporelle limnimétrique reconstituée à partir d'un produit alti-hydrologique .	263

9.1 Introduction

Le chapitre précédent fournit des méthodes permettant d'associer à chaque mesure alti-hydrologique une valeur d'incertitude. À partir de cette description fine de la qualité altimétrique, l'hydrologue peut utiliser en connaissance de cause le produit qui lui est proposé. Cependant ce nouveau type de produit présente, à l'heure actuelle, des précisions et périodes d'échantillonnage dégradées par rapport aux standards du suivi limnimétrique, correspondant généralement à une mesure quotidienne du niveau et une incertitude de l'ordre de 0,10m. Aussi, dans le cadre de ses chaînes de traitement et de ses modèles, l'hydrologue sera souvent amené à suréchantillonner le signal alti-hydrologique pour reconstituer un signal de période quotidienne comparable aux produits limnimétriques habituels. Nous appelons cette série temporelle alti-hydrologique sur-échantillonnée une « série temporelle limnimétrique reconstituée ».

Le processus de calcul de la série temporelle limnimétrique reconstituée à partir d'une série temporelle alti-hydrologique introduit une erreur globale dépendant de quatre facteurs :

- (1) l'incertitude sur les mesures alti-hydrologiques,
- (2) la période d'échantillonnage effective de la série temporelle alti-hydrologique,
- (3) la méthode de suréchantillonnage employée pour rééchantillonner à un pas journalier la série temporelle alti-hydrologique
- (4) la largeur du spectre en fréquence (ou largeur de bande) du signal hydrologique naturel ($Z(t)$),

Ce chapitre est consacré au développement d'une méthode permettant de caractériser la « qualité hydrologique » de la série temporelle limnimétrique reconstituée à partir d'un produit alti-hydrologique donné dont on connaît les caractéristiques de qualité altimétrique.

La première section (9.2) de ce chapitre est consacrée à la présentation de différentes méthodes de suréchantillonnage temporel d'un signal alti-hydrologique.

La seconde section (9.3) illustre la dégradation d'un signal limnimétrique naturel (caractérisé par son spectre de Fourier) lors de son échantillonnage par un produit alti-hydrologique et sur-échantillonnage par l'une des méthodes présentées dans la section 9.2. Elle permet de comparer la pertinence hydrologique (i.e. les performances hydrologiques) de différents produits alti-hydrologiques en fonction de leur précision et de leur période d'échantillonnage effective (liée notamment à la période de revisite du satellite).

9.2 Méthodes de suréchantillonnage temporel pour la construction de séries temporelles limnimétriques reconstituées à pas de temps fixé à partir des produits alti-hydrologiques

La présente section, après une présentation succincte des méthodes d'interpolation linéaire et polynomiale (§ 9.2.1) introduit une approche de suréchantillonnage basée sur la prise en compte des caractéristiques spectrales du signal (§ 9.2.2).

9.2.1 Suréchantillonnage par interpolation linéaire ou polynomiale

À partir de la mesure discrète $Z_{Sat}(t_i)$ d'un signal limnimétrique naturel sur une station virtuelle, par un produit alti-hydrologique, le suréchantillonnage consiste à calculer des valeurs $Z_{LR}(kT)$ du signal limnimétrique reconstitué où T est la période de suréchantillonnage requise. En hydrologie, T vaut généralement 1 jour.

9.2.1.1 Interpolation linéaire

La méthode la plus basique consiste à interpoler linéairement entre deux mesures discrètes successives entre t_i et t_{i+1} :

$$Z_{LR}(kT) = Z_{Sat}(t_i) + (kT - t_i) \cdot \frac{Z_{Sat}(t_{i+1}) - Z_{Sat}(t_i)}{t_{i+1} - t_i}$$

avec : $t_i \leq kT < t_{i+1}$

Cette méthode, peu coûteuse en temps de calcul, produit une série temporelle limnimétrique reconstituée composée d'une succession de segments de droites, physiquement peu représentative d'un signal limnimétrique naturel. Ses résultats se dégradent rapidement lorsque la période d'échantillonnage du signal discret (période d'échantillonnage effective de la série temporelle alti-hydrologique) augmente.

9.2.1.2 Interpolation polynomiale

Une méthode plus élaborée consiste à interpoler la série temporelle de mesures discrètes par une fonction polynomiale. Pour préserver le sens physique du signal, nous adoptons une fonction polynomiale de degré N ($N+1$ paramètres) passant par N mesures successives et minimisant un critère d'énergie sur l'intervalle de temps couvert par ces N mesures.

Cette technique que nous détaillons au chapitre 5 est mise en œuvre avec $N = 4$. Plus lourde en temps de calcul que la précédente, elle fournit un signal limnimétrique reconstitué plus proche du signal naturel, la contrainte de minimisation d'énergie introduisant un sens physique et permettant d'éviter les oscillations qu'induirait mathématiquement un polynôme de degré N contraint à passer par $N + 1$ points.

9.2.1.3 Résultats

La figure 9.1 et la table 9.1 permettent de comparer, pour trois stations limnimétriques et deux périodes d'échantillonnage¹, les erreurs RMS introduites par une interpolation « linéaire » et par une interpolation « polynomiale de degré 4 avec contrainte d'énergie » des séries temporelles alti-hydrologiques exactes (sans erreurs sur les mesures).

Erreur des méthodes de suréchantillonnage des séries temporelles mesurées in-situ				
RMS (m)	14,3 jours		41,2 jours	
	linéaire	polynomiale	linéaire	polynomiale
Manaus	0,09	0,06	0,45	0,40
Tabatinga	0,28	0,28	0,87	0,75
Uaracu	0,38	0,41	0,70	0,80

TAB. 9.1: Table des valeurs RMS de l'erreur des méthodes de suréchantillonnage « linéaire » et « polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie » pour trois stations limnimétriques échantillonnées de façon exacte à 14, 3 jours et 41, 2 jours. Ces résultats sont basés sur 7 années de mesures et 20 scénarios d'échantillonnage pour chaque station limnimétrique.

L'interpolation polynomiale s'avère sensiblement meilleure que l'interpolation linéaire pour Manaus et Tabatinga, et moins performante dans le cas de Uaracu, qui présente des perturbations haute fréquence.

¹14, 3 jours et 41, 2 jours correspondant respectivement à 10 jours avec un taux de pertes de mesures de 30% pour Topex/Poseidon, et 35 jours avec un taux de pertes de mesures de 15% pour ENVISAT (cf. chapitre 7).

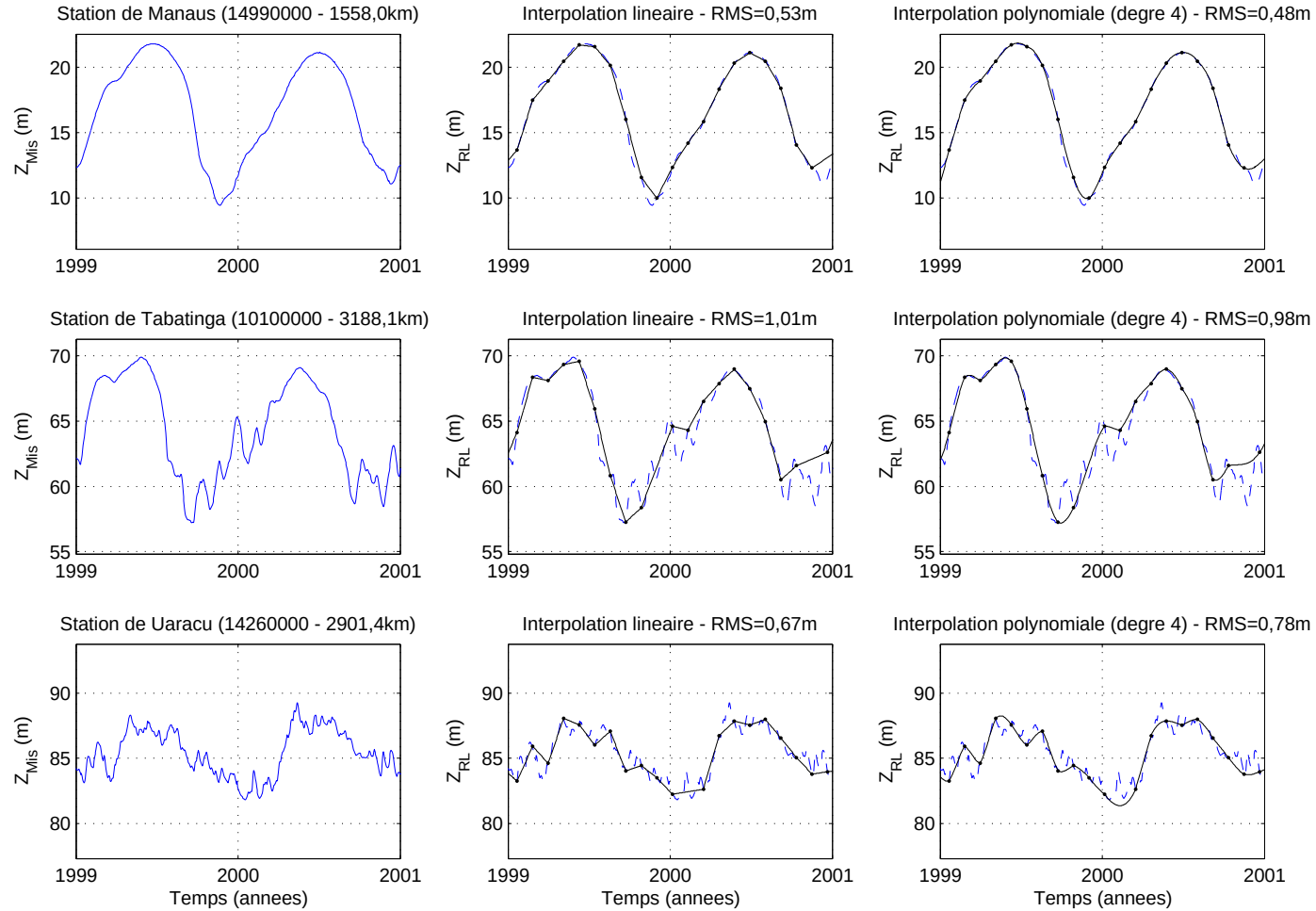


FIG. 9.1: Exemples d'application des méthodes de suréchantillonnage à l'aide des techniques d'interpolation « linéaire » et « polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie ». Afin d'estimer l'erreur induite par les méthodes de suréchantillonnage, on procède au sous-échantillonnage des séries temporelles mesurées in-situ (colonne de gauche); les échantillons résultants sont matérialisés par les points noirs. On tente ensuite de reconstituer les séries temporelles originales à l'aide des techniques d'interpolation « linéaire » (colonne centrale) et « polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie » (colonne de droite).

Nota : Le sous-échantillonnage employé ici simule le comportement du satellite ENVISAT avec une période d'échantillonnage effective $T_{\text{eff}} = 41,2$ jours (période théorique de $T_e = 35$ jours avec un taux de pertes de mesures de 15% similaire à celui du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT, cf. page 191). La simulation du taux de pertes est issue d'un processus aléatoire de sélection des échantillons. Les valeurs RMS présentées sont basées sur 7 années de mesures. Elles correspondent à un scénario d'échantillonnage particulier et différent donc des valeurs du tableau 9.1 qui correspondent à une moyenne statistique de 20 scénarios d'échantillonnage.

9.2.2 Prise en compte des caractéristiques spectrales des signaux hydrologiques

9.2.2.1 Caractéristiques spectrales d'un signal continu

Rappelons que tout signal continu $Z(t)$ ou discrétisé $Z(n.T)$ (ou $Z(n)$) peut être décomposé en une somme de fonctions sinusoïdales, ou bien pour être plus précis, en une somme de fonctions complexes $\mathcal{Z}_F(k) = \rho_k \cdot e^{i\phi_k}$, d'amplitude ρ_k , de phase ϕ_k et de fréquence $\omega_k = \frac{k}{2\pi T}$ [Bellanger, 2002].

Cette décomposition s'appelle, dans le cas des signaux discrétisés, la transformée de Fourier discrète. Elle s'exprime traditionnellement par rapport aux grandeurs normalisées n (indice de l'échantillon temporel $n.T$) et k (indice de l'échantillon fréquentiel, de fréquence $\omega_k = \frac{k}{2\pi T}$), de la façon suivante :

$$\mathcal{Z}_F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Z(n) \cdot e^{-i2\pi \frac{nk}{N}} \quad (9.1)$$

avec N le nombre d'échantillons du signal $Z(n.T)$.

Chaque élément $\mathcal{Z}_F(k)$ du vecteur $\mathcal{Z}_F$ est un nombre complexe de module ρ_k et d'argument (phase) ϕ_k . Notons que dans notre cas, seules les valeurs du module de $\mathcal{Z}_F$ nous intéressent pour l'observation des spectres en fréquences.

La détermination des fréquences $\omega_k (= \frac{k}{2\pi T})$ et des amplitudes associées ρ_k fournit les caractéristiques spectrales du signal Z (cf. figure 9.2).

9.2.2.2 Échantillonnage d'un signal continu

Claude E. Shannon a énoncé en 1949 [Shannon et Weaver, 1949] une des plus importantes règles du traitement du signal numérique (dans un contexte plus vaste, celui de la « Théorie mathématique de l'information ») qui fixe les règles de validité de l'échantillonnage d'un signal continu en fonction de ses caractéristiques spectrales (largeur de bande spectrale).

Cette règle s'exprime, pour un signal $x(t)$ régulièrement échantillonné à la période d'échantillonnage T_e , par le fait que cette période d'échantillonnage doit respecter la condition :

$$T_e \leq \frac{1}{2 \cdot f_{max}} \quad (9.2)$$

où f_{max} est la fréquence maximale de $x(t)$ (la largeur de bande du spectre).

Le non respect de cette condition induira une perte d'information irréversible, on parle alors de **recouvrement spectral**² : parmi les fréquences du signal $x(t)$ contenues dans $[0; f_{max}]$, seules pourront être correctement restituées avec l'échantillonneur de période T_e (en première approximation), celles de la bande $[0; \frac{1}{2.T_e}]$.

Toute série temporelle de niveau de cours d'eau $Z(t)$ présente une bande spectrale donnée et une largeur de bande f_{max} associée. Le théorème de Shannon implique une limite du pouvoir d'observation d'un satellite survolant le cours d'eau à intervalle régulier T_e (ou T_{Sat}) : **en première approximation**, les mesures du satellite ne permettront pas de reconstituer l'information limnimétrique aux fréquences supérieures à $\frac{1}{2.T_e}$.

Cela se traduira dans le cas du satellite Topex/Poseidon par une bande spectrale observée $\pm \frac{1}{2.T_e} = \pm 0,05 \text{ jours}^{-1}$ et dans le cas d'ENVISAT par une bande spectrale observée $\pm \frac{1}{2.T_e} = \pm 0,014 \text{ jours}^{-1}$.

Pour illustrer ces propos, les chronogrammes de la figure 9.2 présentent à gauche trois séries temporelles mesurées in-situ (Manaus, Tabatinga et Uaracu) et à droite leurs spectres en fréquences (transformées de Fourier) respectifs.

²Le terme anglais « aliasing » est aussi souvent utilisé.

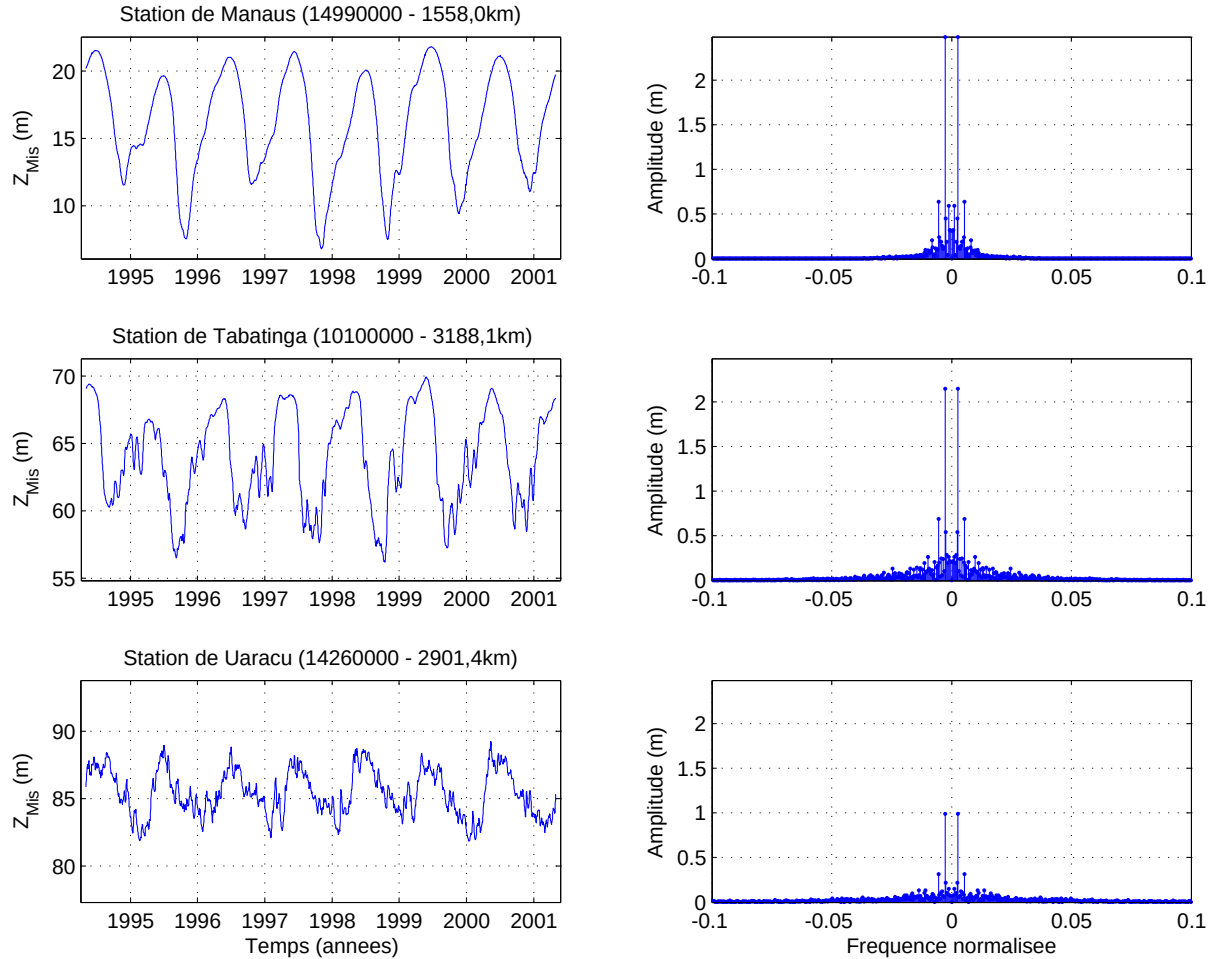


FIG. 9.2: Illustration de trois séries temporelles mesurées in-situ (échantillonnées à $T_e = 1$ jour) et de leurs spectres en fréquences (transformées de Fourier : amplitude (m) en ordonnées et fréquence normalisée (sans unité) en abscisses : la fréquence normalisée est exprimée en fraction de la fréquence d'échantillonnage ($F_e = 1/T_e$) des séries temporelles mesurées in-situ. L'amplitude maximum, liée au signal hydrologique annuel, correspond ainsi à une fréquence normalisée de $\frac{1/365}{1/T_e}$ soit $T_e/365$ ou encore $1/365$ dans notre cas.

On note que le spectre en fréquence de la station limnimétrique de Uaracu est plus étalé vers les hautes fréquences que le spectre de Manaus : ceci est directement lié aux perturbations hautes fréquences visibles sur le signal limnimétrique de Uaracu alors qu'elles sont absentes (amorties) sur le signal limnimétrique de Manaus.

On peut déduire que Topex/Poseidon (avec une période d'échantillonnage de 10 jours et une bande spectrale d'observation de $\pm 0,05 \text{ jours}^{-1}$ dans le cas où il n'y a pas de pertes de mesures) observera correctement la station de Manaus mais perdra de l'information sur les stations limnimétriques de Tabatinga et Uaracu, alors que ENVISAT (avec une période d'échantillonnage de 35 jours et une bande spectrale d'observation de $\pm 0,014 \text{ jours}^{-1}$) perdra de l'information sur ces trois stations.

9.2.2.3 Série temporelle à échantillonnage irrégulier

Comme nous l'avons illustré tout au long de ce mémoire, les séries temporelles alti-hydrologiques sont des signaux échantillonnés de manière périodique (si l'on considère stable la répétitivité de l'orbite des satellites) dans lesquels des mesures sont manquantes (échec du (re)tracking, filtrage, etc.). Du point de vue du traitement du signal, ces séries temporelles alti-hydrologiques doivent être considérées comme des signaux à échantillonnage irrégulier.

9.2.3 Méthodes de suréchantillonnage par approximation de signal à bande spectrale limitée

La méthode présentée ici est proposée par Hervé Carfantan du LA2T (Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse-Tarbes, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse) [Carfantan, 2007] en s'inspirant des travaux de Thomas Strohmer [Strohmer, 1997].

Cette méthode est applicable à des signaux irrégulièrement échantillonnés et éventuellement bruités et s'appuie sur la connaissance des composantes à basses fréquences du signal mesuré. On suppose donc que ces composantes à basses fréquences ne sont pas altérées par le sous-échantillonnage opéré par le processus de la mesure altimétrique (pas de recouvrement spectral sur ces fréquences).

Notons que dans la pratique, cette supposition sera difficile à vérifier et que l'adopter revient à émettre une hypothèse sur les fréquences mise en jeu dans les signaux naturels observés par les satellites.

L'objectif est ici d'estimer au mieux le signal naturel $Z(t)$ sous la forme d'un signal limnimétrique (échantillonné) $\tilde{Z}_{LR}(kT)$ (de période d'échantillonnage $T = 1 \text{ jour}$).

9.2.3.1 Méthode

Soit un signal hydrologique naturel $Z(t)$ sur lequel un satellite altimètre effectue un échantillonnage à intervalle régulier, tous les T_{Sat} jours. Le processus de mesure peut échouer dans certains cas, ou bien la mesure peut être rejetée *a posteriori* (filtrage, etc.); la série temporelle alti-hydrologique Z_{Sat} ainsi « construite » peut alors présenter des lacunes.

La première étape de la méthode consiste - de manière générale - à placer les mesures altimétriques Z_{Sat} sur une grille d'échantillonnage régulière et arbitrairement fine, de période T . Nous choisissons dans notre cas $T = 1 \text{ jour}$. Notons que cette opération a pour effet de déplacer les mesures selon l'axe des dates, elle est sans conséquences dans notre cas. Le résultat de cette opération est noté Z_{LR} .

La seconde étape de la méthode consiste à estimer le signal $\tilde{Z}_{LR}(kT)$ sur l'ensemble des points de la grille à partir des composantes à basse fréquence du signal Z_{LR} . Pour cela, nous nous appuyons sur l'interpolation à bande spectrale limitée (de type Shannon) qui consiste à construire une approximation $\tilde{Z}_{LR}(kT)$ du signal $Z_{LR}(kT)$ à partir des données sous échantillonnées Z_{Sat} , en faisant l'hypothèse que les basses fréquences du signal Z_{Sat} sont représentatives des basses fréquences du signal Z_{LR} . Autrement dit, nous reconstituons le signal limnimétrique sur la base des basses fréquences contenues dans les séries temporelles alti-hydrologiques observées par altimétrie radar, fréquences dont nous supposons qu'elles reflètent les basses fréquences de Z_{LR} et ne sont pas impactées par le recouvrement spectral.

Notons que l'on peut vouloir faire une approximation à bande spectrale limitée dans le cas où les données sont bruitées, c'est à dire que l'on cherche le signal $\tilde{Z}_{LR}$ à basses fréquences qui passe au mieux, au sens des moindres carrés, par les données Z_{Sat} que l'on considère comme support de l'interpolation.

Cette approximation peut se modéliser mathématiquement sous la forme :

$$\text{Trouver } \tilde{Z}_{LR} \text{ minimisant } \|Z_{Sat} - H.\tilde{Z}_{LR}\|^2 \text{ sous la contrainte } M.\tilde{Z}_{LR} = \tilde{Z}_{LR}$$

avec M , la matrice telle que $M.\tilde{Z}_{LR}$ corresponde aux N éléments basse fréquence de la transformée de Fourier de $\tilde{Z}_{LR}$. La contrainte garantit ainsi que $\tilde{Z}_{LR}$ ne comporte que des basses fréquences. et H la matrice diagonale pondérant les écarts entre les mesures Z_{Sat} et les valeurs reconstituées $\tilde{Z}_{LR}$.

La solution Z_{LR} de ce problème d'optimisation sous contrainte est solution du système :

$$A^T.A.\tilde{Z}_{LR} = A^T.Z_{Sat} \quad (9.3)$$

avec $A = H.M^T$ (une matrice dont la ligne n est constituée de 0 sauf à l'indice correspondant à la position de la $n^{\text{ème}}$ mesure altimétrique (dans le vecteur Z_{Sat}) correspondant à $\tilde{Z}_{LR}$).

De manière synthétique, nous pouvons dire que cette technique effectue un masquage des composantes hautes fréquences du signal Z_{Sat} afin de procéder à un ajustement, au sens des moindres carrés, entre les N premières composantes à basses fréquences de $\tilde{Z}_{LR}$ et les valeurs correspondantes de Z_{Sat} .

Il existe de nombreuses autres techniques de suréchantillonnage de signaux sous-échantillonnés [Moisan, 2001], [Giovannelli et al., 2002] et [Vandewalle et al., 2003] ; Leur mise en œuvre a été abordée pendant cette thèse mais n'est pas présentée ici.

9.2.3.2 Choix de la largeur de bande spectrale prise en compte

La méthode de suréchantillonnage à bande spectrale limitée est paramétrée par la fraction pN de la largeur de spectre du signal Z_{Sat} qui sera prise en compte. Ce paramètre pN définit la plage du spectre en fréquences pour laquelle on estime que le recouvrement spectral n'a pas d'effet notable.

Notons que dans les calculs, le paramètre pN est traduit en nombre d'échantillons N à prendre en compte dans le spectre en fréquences de Z_{Sat} , lors de l'opération de masquage matérialisée par la matrice M . Notons également que lorsque $pN = N$, alors la méthode revient à faire de l'interpolation (i.e. à passer par les points de mesure altimétrique).

La figure 9.3 illustre, pour trois valeurs différentes de pN ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{2}$), le résultat du suréchantillonnage appliqué à des séries temporelles de synthèse simulant l'échantillonnage d'un satellite avec une précision parfaite. On y constate que les meilleurs résultats sont obtenus pour lorsque $pN = \frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{3}$. Lorsque $pN = \frac{1}{2}$, le signal suréchantillonné présente des oscillations d'amplitudes très importantes nous indiquant que la méthode de suréchantillonnage a été mise en échec par la prise en compte d'une bande spectrale trop large et dont les hautes fréquences sont altérées par les effets du recouvrement spectral.

Les signaux sous-échantillonnés que nous avons contruits pour illustrer la figure 9.3 sont sous-échantillonnés une première fois à la période théorique de passage du satellite sur le cours d'eau, puis une seconde fois de manière aléatoire afin de simuler les taux de pertes de mesures. Nous avons pu constater par expérience qu'une valeur de $pN = \frac{1}{3}$ se situe à la limite de stabilité de la méthode de suréchantillonnage à bande spectrale limitée et engendre selon l'agencement des échantillons des oscillations plus ou moins importantes (qui n'apparaissent pas dans l'exemple présenté dans cette figure).

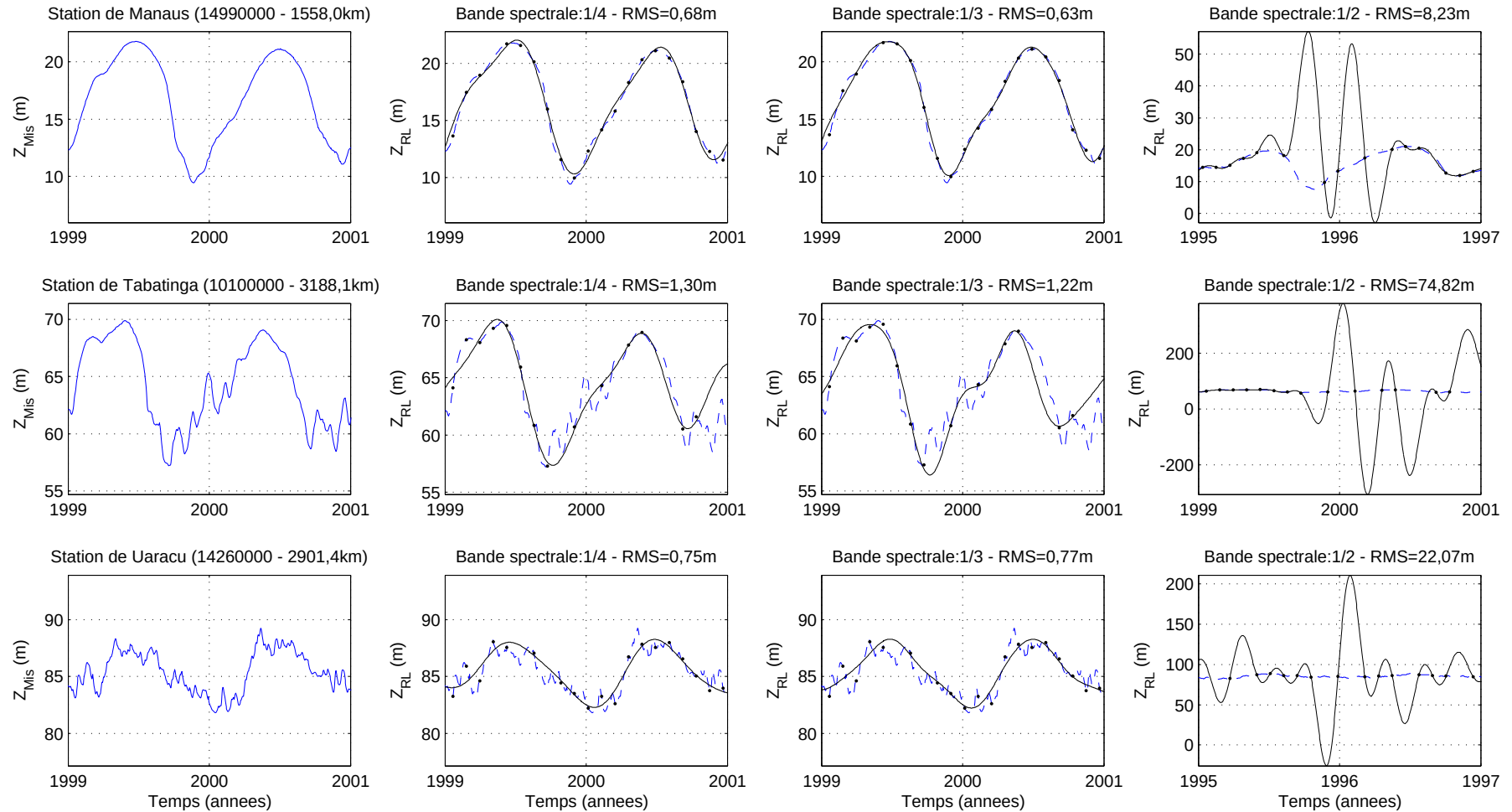


FIG. 9.3: Illustration de l'impact de la largeur de bande spectrale prise en compte pour mettre en œuvre la méthode d'interpolation à bande spectrale limitée, pour trois séries temporelles mesurées in-situ. Afin d'estimer l'erreur induite par la méthode de suréchantillonnage, en fonction de la largeur de bande spectrale prise en compte, on procède au sous-échantillonnage des séries temporelles mesurées in-situ (colonne de gauche), les échantillons résultants sont matérialisés par les points noirs. On tente ensuite de reconstituer les séries temporelles originales à l'aide de la technique d'interpolation à bande spectrale limitée ne prenant en compte successivement que $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{2}$ de la bande spectrale du signal sous-échantillonné. Le taux de $\frac{1}{4}$ présente le meilleur compromis entre précision et stabilité.

Nota : Le sous-échantillonnage employé ici simule le comportement du satellite ENVISAT avec une période d'échantillonnage effective $T_{\text{eff}} = 41,2$ jours (période théorique de $T_e = 35$ jours avec un taux de pertes de mesures de 15% similaire à celui du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT, cf. page 191). La simulation du taux de pertes est issue d'un processus aléatoire de sélection des échantillons. Les valeurs RMS présentées sont basées sur 7 années de mesures. Elles correspondent à un scénario d'échantillonnage particulier et diffèrent donc des valeurs du tableau 9.1 qui correspondent à une moyenne statistique de 20 scénarios d'échantillonnage.

Nous choisirons donc pour la suite des analyses un pourcentage de largeur de bande spectrale

$$pN = \frac{1}{4}$$

afin de prévenir d'éventuelles oscillations.

9.2.3.3 Applications

Le calcul de la solution du système (9.3) peut être mené de différentes manières appelées (1) calcul « matriciel direct », (2) calcul « matriciel+gradient conjugué » et (3) calcul « Fourier+gradient conjugué ».

La figure 9.4 illustre les résultats de ces trois approches qui donnent des résultats strictement équivalents. Nous choisissons d'utiliser la méthode par calcul « matriciel direct » qui présente le temps de calcul le plus rapide³.

La table 9.2 permet de comparer, pour trois stations limnimétriques et deux périodes d'échantillonnage⁴, les erreurs RMS de reconstitution introduites par les techniques « linéaire », « polynomiale de degré 4 avec contrainte d'énergie » et à « bande spectrale limitée » d'interpolation temporelle des séries temporelles alti-hydrologiques exactes (sans erreurs sur les mesures).

La méthode d'interpolation à bande spectrale limitée présente, en termes d'erreur RMS, des performances sensiblement moins bonnes que l'interpolation linéaire et l'interpolation polynomiale. Nous traitons dans la section suivante (conclusions) de certains de ces avantages comparatifs et des recherches ultérieures à mener.

Erreur des méthodes de suréchantillonnage des séries temporelles mesurées in-situ						
RMS (m)	14,3 jours			41,2 jours		
	linéaire	polynomiale	bande spectrale	linéaire	polynomiale	bande spectrale
Manaus	0,09	0,06	0,27	0,45	0,40	0,55
Tabatinga	0,28	0,28	0,62	0,87	0,75	0,83
Uaracu	0,38	0,41	0,55	0,70	0,80	0,81

TAB. 9.2: Table des valeurs RMS de l'erreur de reconstitution des méthodes de suréchantillonnage « linéaire », « polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie » et « à bande spectrale limitée » pour trois stations limnimétriques échantillonnées de façon exacte à 14,3 jours et 41,2 jours. Ces résultats sont basés sur 7 années de mesures et 20 scénarios d'échantillonnage pour chaque station limnimétrique.

9.2.4 Conclusions

Nous venons de présenter trois méthodes différentes permettant le suréchantillonnage de séries temporelles alti-hydrologiques à un pas de temps journalier. Elles sont de natures très différentes :

1. l'interpolation linéaire, bien que caractérisée par des résultats assez bons, introduit des discontinuités dans la dérivée du signal qui ne respectent pas la physique des signaux hydrologiques ; seules deux mesures consécutives sont prises en compte pour reconstruire une nouvelle mesure,

³Les deux autres méthodes, itératives par gradient conjugué, ne permettent que de s'approcher de la solution du système (par convergence des algorithmes) et peuvent donner des résultats significativement différents selon les problèmes à résoudre. Le choix de la méthode de résolution utilisée résulte donc d'un compromis entre la qualité des résultats recherchés (stabilité) et le coût en temps de calcul.

⁴14,3 jours et 41,2 jours correspondant respectivement à 10 jours avec un taux de pertes de mesures de 30% pour Topex/Poseidon, et 35 jours avec un taux de pertes de mesures de 15% pour ENVISAT (cf. chapitre 7).

2. l'interpolation polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie donne généralement les meilleurs résultats mais introduit elle aussi quelques discontinuités dans la dérivée liées au fait qu'elle est appliquée par parties⁵ : on utilise quatre mesures « encadrantes » consécutives pour reconstruire une nouvelle mesure,

Ces deux méthodes présentent le double inconvénient (1) d'introduire des discontinuités dans les dérivées des signaux suréchantillonnés et (2) de ne pas prendre en compte l'intégralité de l'information contenue dans le signal pour le calcul des nouvelles mesures.

3. l'interpolation à bande spectrale limitée, bien que présentant dans nos exemples les moins bons résultats, permet néanmoins de ne pas introduire de discontinuités dans les dérivées des signaux suréchantillonnés et présente l'avantage de prendre en compte le signal à suréchantillonner dans son intégralité pour construire toute nouvelle mesure.

Notre conclusion est donc que la technique d'interpolation à bande spectrale limitée présente des caractéristiques nécessaires pour mener à bien le suréchantillonnage des séries temporelles alti-hydrologiques mais que son utilisation nécessite de plus amples recherches.

Par exemple, il serait intéressant de développer une méthode d'estimation du pourcentage de bande spectral à utiliser. Ceci doit néanmoins s'appuyer sur la connaissance - même minimaliste - des signaux naturels que l'on observe par altimétrie radar et posera certainement quelques difficultés.

Enfin, nous n'avons illustré ces trois techniques que sur des exemples de séries temporelles non bruitées. Il est intéressant de noter que la technique d'interpolation à bande spectrale limitée peut être adaptée afin de suréchantillonner des signaux tout en pondérant le processus d'ajustement par moindres carrés à l'aide des valeurs d'incertitude associées individuellement à chacune des mesures altimétriques [Carfantan, 2007]. Toutefois, ces nouvelles recherches dépassent largement le cadre de cette thèse.

9.3 Quantification de la qualité hydrologique des produits alti-hydrologiques

Le processus de reconstitution d'une série temporelle limnimétrique (à pas de temps journalier) à partir d'une série temporelle alti-hydrologique introduit une erreur globale qui affecte la « qualité hydrologique » de la série temporelle limnimétrique reconstituée. Cette section est consacrée à l'étude de la façon dont la « qualité altimétrique » de la série temporelle alti-hydrologique se traduit en « qualité hydrologique » de la série temporelle limnimétrique reconstituée.

Comme nous l'avons vu précédemment, la « qualité hydrologique » de la série temporelle limnimétrique reconstituée dépend de trois facteurs méthodologiques :

- (1) l'incertitude sur les mesures alti-hydrologiques,
- (2) la période d'échantillonnage effective de la série temporelle alti-hydrologique,
- (3) la méthode de suréchantillonnage employée pour rééchantillonner à un pas journalier la série temporelle alti-hydrologique,

et d'un facteur naturel :

- (4) les caractéristiques du spectre en fréquence (ou largeur de bande) du signal hydrologique naturel ($Z(t)$),

Dans un premier temps (9.3.1), nous analyserons l'impact de ces différents facteurs : à partir de trois séries temporelles mesurées in-situ de caractéristiques spectrales différentes (facteur naturel) nous simulerons des scénarios faisant varier les différents facteurs méthodologiques et nous analyserons les résultats.

⁵Cf. section 5.2.1 pour plus de détails.

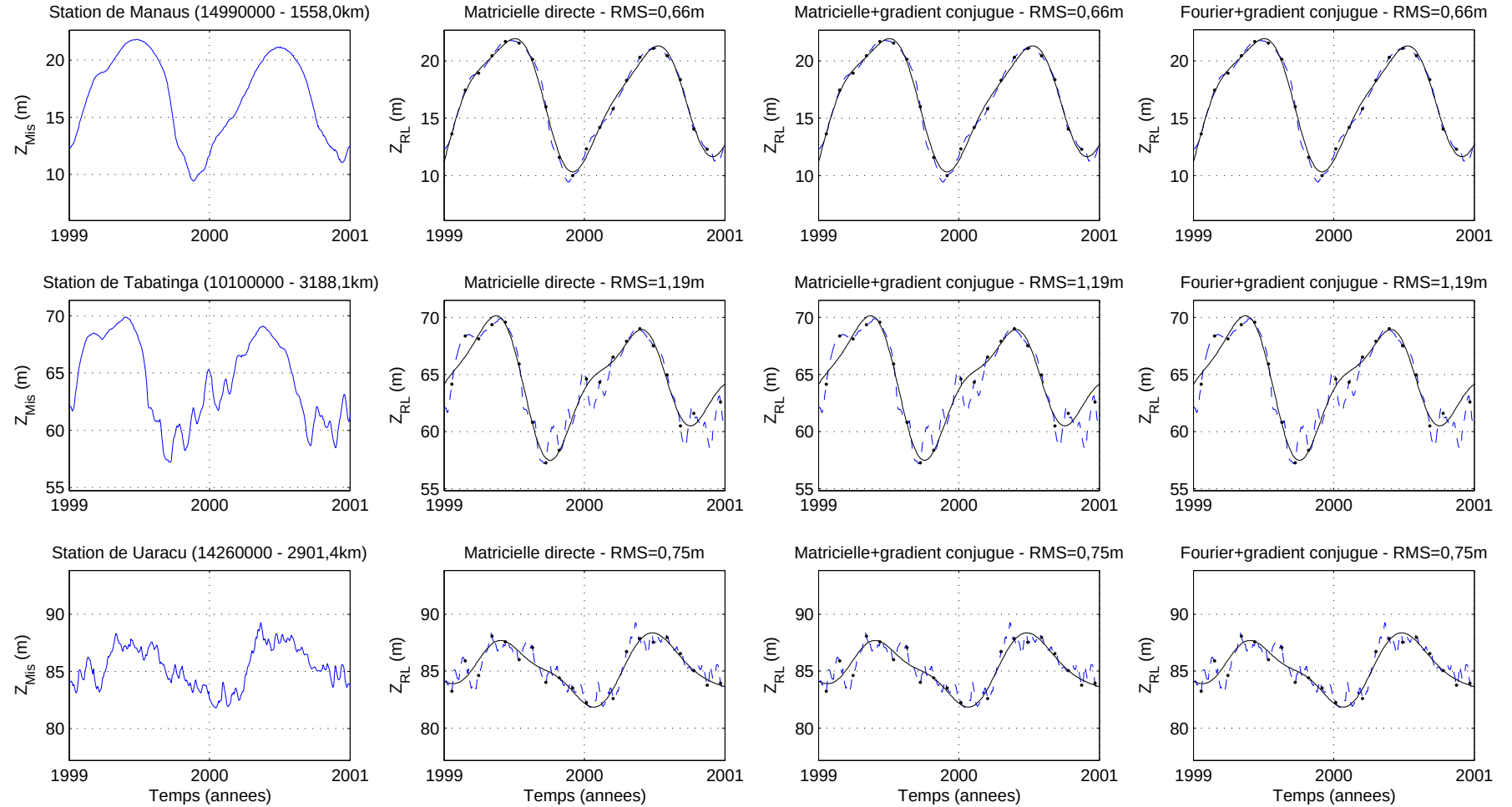


FIG. 9.4: Application de la méthode de suréchantillonnage par interpolation à « bande spectrale limitée » selon trois approches de résolution du système de l'équation (9.3). Afin d'estimer l'erreur induite par les méthodes de suréchantillonnage, on procède au sous-échantillonnage des séries temporelles mesurées in-situ (colonne de gauche) ; les échantillons résultants sont matérialisés par les points noirs. On tente ensuite de reconstituer les séries temporelles originales à l'aide de la technique d'interpolation à « bande spectrale limitée » en prenant en compte $\frac{1}{4}$ de la bande spectrale à basse fréquence du signal sous-échantillonné. Dans ces trois exemples de résolution du système (9.3), les résultats sont strictement équivalents (valeurs RMS égales à 10^{-6} m près). Nous adoptons la méthode de résolution « matricielle direct » plus économe en temps de calcul.

Nota : Le sous-échantillonnage employé ici simule le comportement du satellite ENVISAT avec une période d'échantillonnage effective $T_{\text{eff}} = 41,2$ jours (période théorique de $T_e = 35$ jours avec un taux de pertes de mesures de 15% similaire à celui du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT, cf. page 191). La simulation du taux de pertes est issue d'un processus aléatoire de sélection des échantillons. Les valeurs RMS présentées sont basées sur 7 années de mesures. Elles correspondent à un scénario d'échantillonnage particulier, et diffèrent donc des valeurs du tableau 9.1 qui correspondent à une moyenne statistique de 20 scénarios d'échantillonnage.

Dans un second temps (9.3.2), nous appliquerons ces développements pour associer à une série temporelle limnimétrique reconstituée à partir d'une série temporelle alti-hydrologique, la bande d'incertitude correspondante.

9.3.1 « Qualité hydrologique » des séries temporelles limnimétriques reconstituées à partir de séries temporelles alti-hydrologiques

Considérons une station virtuelle où la série temporelle mesurée in-situ est $Z(t)$.

Un produit alti-hydrologique nous fournit un échantillonnage $Z_{Sat}(t)$ avec une période d'échantillonnage effective T_{eff} et un bruit de mesure $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ (gaussien centré⁶).

À partir de ce produit alti-hydrologique, et d'une méthode de suréchantillonnage (cf. § 9.2) nous construisons une série temporelle limnimétrique reconstituée $\tilde{Z}_{LR}$.

Nous définissons la « qualité hydrologique » de cette série temporelle limnimétrique reconstituée par l'écart-type $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$ de l'erreur entre $\tilde{Z}_{LR}$ et $Z(t)$.

Afin d'étudier, pour une série temporelle mesurée in-situ donnée et une méthode de reconstitution donnée, l'impact de T_{eff} et $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ sur l'écart-type $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$, nous multiplierons les scénarios de reconstitution de la série limnimétrique en faisant varier les valeurs T_{eff} et $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ ⁷.

Nous appliquons cette méthode sur trois séries temporelles mesurées in-situ présentant des caractéristiques spectrales différentes (liés à des régimes hydrologiques différents ; cf. figure 9.2), issues des stations limnimétriques de Manaus, Tabatinga et Uaracu.

Nous utiliserons également les trois méthodes de suréchantillonnage présentées à la section 9.2.

9.3.1.1 Analyse pour une station et une méthode de suréchantillonnage

La figure 9.5 et la table 9.3 présentent, à titre d'exemple, les valeurs de la « qualité hydrologique » ($\sigma_{\varepsilon_{LR}}$) dans l'espace $(\sigma_{\varepsilon_{Sat}} ; T_{eff})$ pour la série temporelle mesurée in-situ issue de la station limnimétrique de Manaus dont le régime hydrologique est « amorti ». Pour différents scénarios de produits alti-hydrologiques (période d'échantillonnage effective T_{eff} et incertitude de mesure $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$), les séries temporelles limnimétriques sont reconstituées à l'aide de la technique d'interpolation « polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie ».

On constate que l'erreur de reconstitution $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$ croît lorsque l'incertitude des mesures altimétriques $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ croît ou lorsque la période d'échantillonnage effective T_{eff} croît.

Pour une période d'échantillonnage effective fixe de 1 jour (pas de sous-échantillonnage), l'erreur de reconstitution est logiquement égale à l'incertitude des mesures altimétriques.

Pour une incertitude donnée des mesures altimétriques (une ligne de la table 9.3), on constate que l'erreur de reconstitution commence par décroître quand la période d'échantillonnage effective augmente avant de se remettre à croître. Par exemple, pour une incertitude de 0,80m, l'erreur de reconstitution vaut 0,80m pour $T_{eff} = 1$ jour, 0,70m pour $T_{eff} = 20$ jours et 0,92m pour $T_{eff} = 50$ jours. Ceci s'explique par le fait que, en l'absence de variation rapide du signal entre deux mesures (ce qui est le cas pour un signal amorti comme celui de Manaus), l'interpolation temporelle diminue les valeurs d'erreur entre deux mesures consécutives.

On constate enfin que des produits alti-hydrologiques de qualités très différentes peuvent générer des séries temporelles limnimétriques reconstituées de même qualité hydrologique. On obtient ainsi la même erreur de reconstitution (0,70m) pour ($T_{eff} = 20$ jours et $\sigma_{\varepsilon_{Sat}} = 0,80$ m) et ($T_{eff} = 50$ jours et $\sigma_{\varepsilon_{Sat}} = 0,40$ m).

⁶Nous pouvons tout aussi bien ajouter un bruit de mesure gaussien décentré dans le cas où le modèle d'incertitude de la série temporelle alti-hydrologique est connu, cf. § 8.3.

⁷Pour chaque couple $(T_{eff} ; \sigma_{\varepsilon_{Sat}})$, nous générons 200 tirages aléatoires du produit alti-hydrologique permettant de calculer 200 réalisations de $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$.

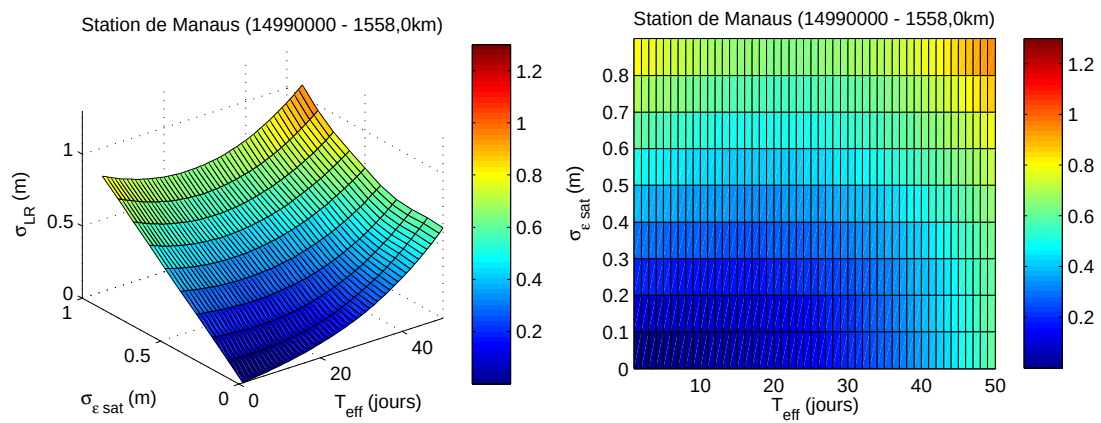


FIG. 9.5: Estimation de la « qualité hydrologique » ($\sigma_{\varepsilon_{LR}}$) en fonction des indicateurs de précision d'un produit alti-hydrologique ($\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ et T_{eff}).

		Valeurs de $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$					
$\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$	T_{eff}	1	10	20	30	40	50
3,0		3,01	2,68	2,61	2,65	2,44	2,62
2,0		2,00	1,80	1,71	1,73	1,63	1,86
1,5		1,49	1,32	1,27	1,32	1,29	1,40
1,0		1,00	0,88	0,83	0,88	0,86	1,04
0,8		0,80	0,71	0,70	0,72	0,69	0,92
0,6		0,60	0,54	0,52	0,55	0,54	0,80
0,4		0,40	0,36	0,36	0,39	0,39	0,71
0,2		0,20	0,18	0,19	0,27	0,27	0,65
0,0		0,00	0,04	0,08	0,21	0,22	0,63

TAB. 9.3: « Qualité hydrologique » en fonction des indicateurs de précision d'un produit alti-hydrologique.

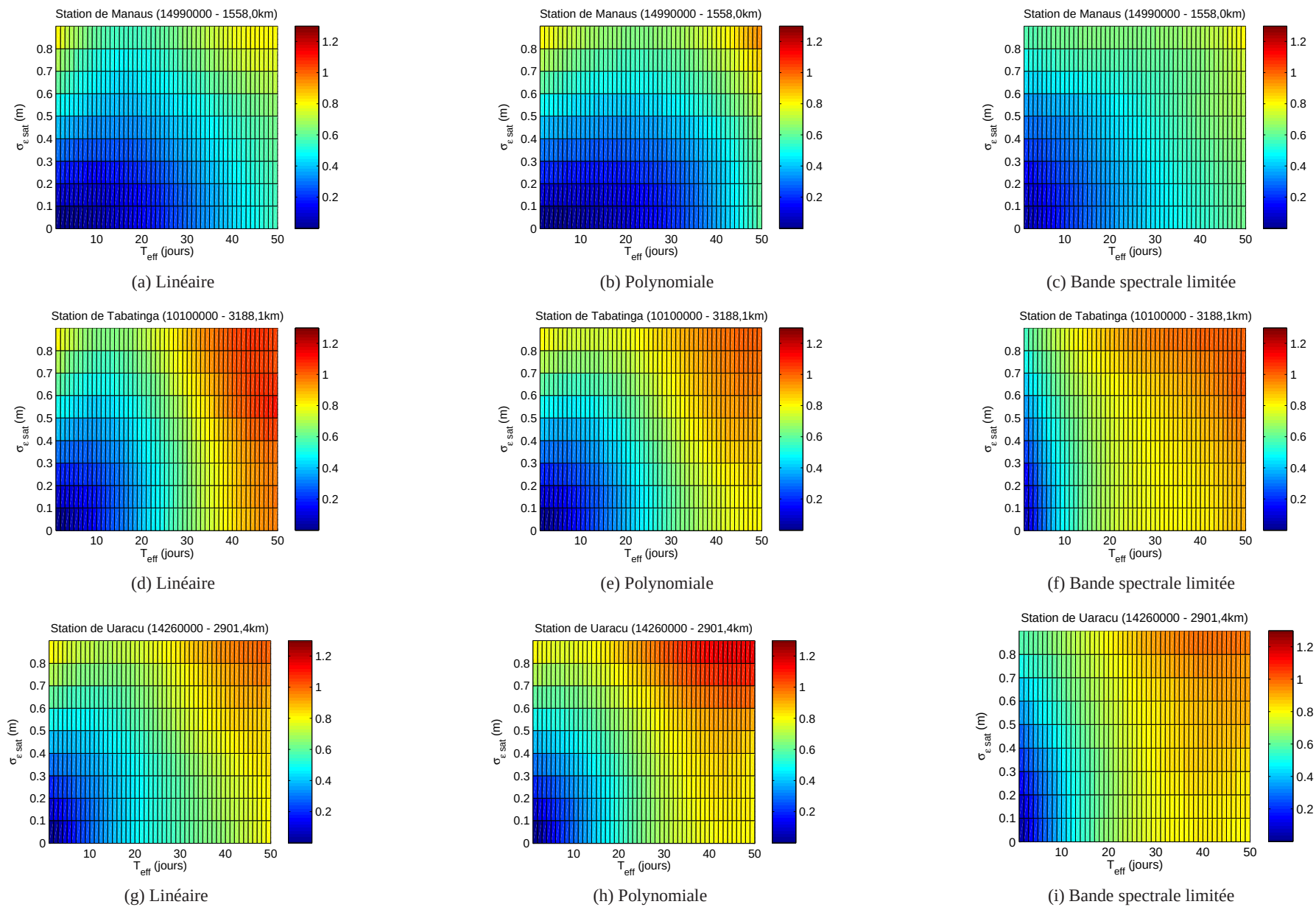


FIG. 9.6: Illustration des effets couplés, sur l'écart-type de l'erreur d'une série temporelle alti-hydrologique suréchantillonnée, d'une technique de suréchantillonnage, d'un bruit de mesure (gaussien centré) pour différentes valeurs de variance et d'un sous échantillonnage pour différentes périodes.

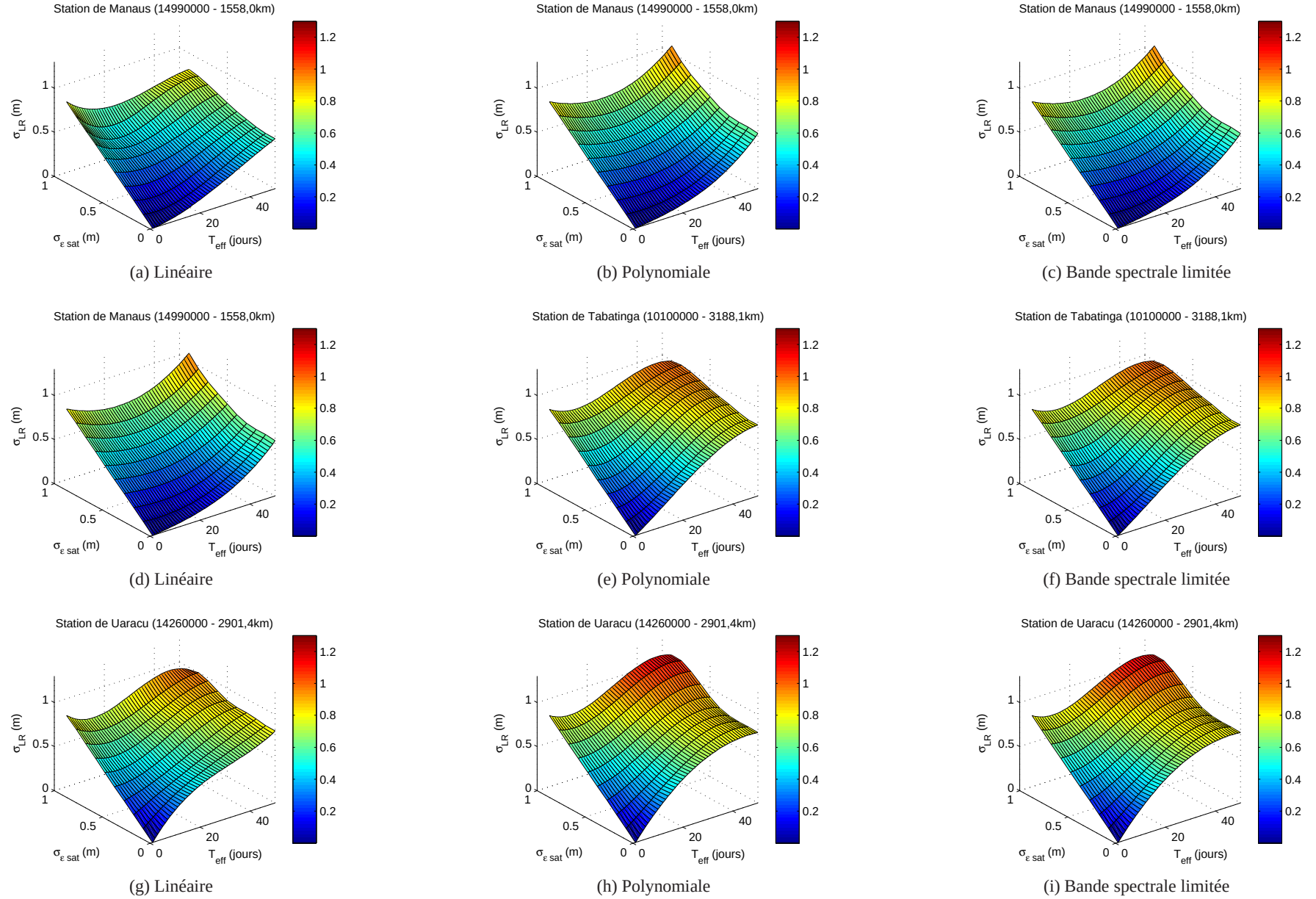


FIG. 9.7: Illustration des effets couplés, sur l'écart-type de l'erreur d'une série temporelle alti-hydrologique suréchantillonnée, d'une technique de suréchantillonnage, d'un bruit de mesure (gaussien centré) pour différentes valeurs de variance et d'un sous échantillonnage pour différentes périodes.

9.3.1.2 Comparaison des techniques d'interpolation

Les figures 9.6 et 9.7 présentent les valeurs de la « qualité hydrologique » ($\sigma_{\varepsilon_{LR}}$) dans l'espace ($\sigma_{\varepsilon_{Sat}} ; T_{\text{eff}}$) pour les trois séries temporelles mesurées in-situ issues des stations limnimétriques de Manaus (ligne du haut), Tabatinga (ligne centrale) et Uaracu (ligne du bas) dont les régimes hydrologiques vont de « amorti » (Manaus) à « fortement perturbé » (Uaracu). Les séries temporelles limnimétriques y sont reconstituées successivement à l'aide des techniques d'interpolation « linéaire » (colonne de gauche), « polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie » (colonne centrale) et « à bande spectrale limitée » (colonne de droite).

Les valeurs de $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$, l'écart-type du bruit additif, vont de 0,00m à 1,00m avec une résolution de 0,10m. Les valeurs de T_{eff} , la période d'échantillonnage effective, vont de 1 jour à 50 jours avec une résolution de 1 jour.

Comportement à $T_{\text{eff}} = 1$ jour : Les valeurs de $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$, pour $T_{\text{eff}} = 1$ jour (c'est à dire sans suréchantillonnage), sont égales à $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ dans le cas des méthode linéaires et polynomiales. Ceci s'explique tout simplement car ces deux techniques calculent un signal suréchantillonné qui passe par les mesures originales.

En revanche, le technique à bande spectrale limitée met en œuvre un ajustement au sens des moindres carrés qui permet d'atténuer de manière importante le bruit de mesure (diminution d'environ 45% de la variance). On remarquera également pour cette technique que lorsque $\sigma_{\varepsilon_{Sat}} = 0$, l'erreur résultante n'est pas nulle et se situe entre 5cm et 10cm.

Comportement à $\sigma_{\varepsilon_{Sat}} = 0$: Le comportement des trois techniques de suréchantillonnage à $\sigma_{\varepsilon_{Sat}} = 0$ dépend en grande partie du cours d'eau considéré. Ainsi, les relations entre $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$ et T_{eff} peuvent avoir des allures de fonctions linéaires ou puissance.

Analyse comparative des techniques d'interpolation : La figure 9.6 permet une comparaison d'ensemble des techniques d'interpolation sur un panel de trois stations limnimétriques assez contrastées. Avec des valeurs de $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$ globalement plus élevées, la méthode d'interpolation à bande spectrale limitée donne de moins bons résultats que les interpolations linéaire et polynomiale sur les trois stations Manaus et surtout Tabatinga et Uaracu.

Les techniques d'interpolation linéaire et polynomiale donnent des résultats sensiblement similaires.

Pour la suite des analyses, nous utiliserons la méthode de suréchantillonnage polynomiale.

9.3.1.3 Analyse de la « qualité hydrologique » d'un même produit alti-hydrologique sur différents cours d'eau

La figure 9.8 est un extrait de la figure 9.6 pour la méthode de suréchantillonnage « polynomiale de degré 4 avec contrainte d'énergie ». Elle permet d'analyser pour un produit alti-hydrologique de qualité donnée (T_{eff} et $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$) la qualité hydrologique résultante des séries temporelles limnimétriques reconstituées sur les trois stations de Manaus (amorti), Tabatinga (intermédiaire), Uaracu (perturbé).

Pour cela, on positionne sur la figure correspondant à la station considérée, le point de coordonnées [$T_{\text{eff}} ; \hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$] correspondant au produit alti-hydrologique. On en déduit alors la valeur de la « qualité hydrologique » $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$ de la série temporelle limnimétrique reconstituée.

On constate que les produits alti-hydrologiques AVISO/TP/Ocean et RLH/ENVISAT, bien que de caractéristiques de qualité altimétrique très différentes, se révèlent être de qualités hydrologiques comparables sur les stations de Manaus et Tabatinga. Sur la station de Uaracu, le produit AVISO/TP/Ocean donnerait des résultats sensiblement meilleurs que le produit RLH/ENVISAT.

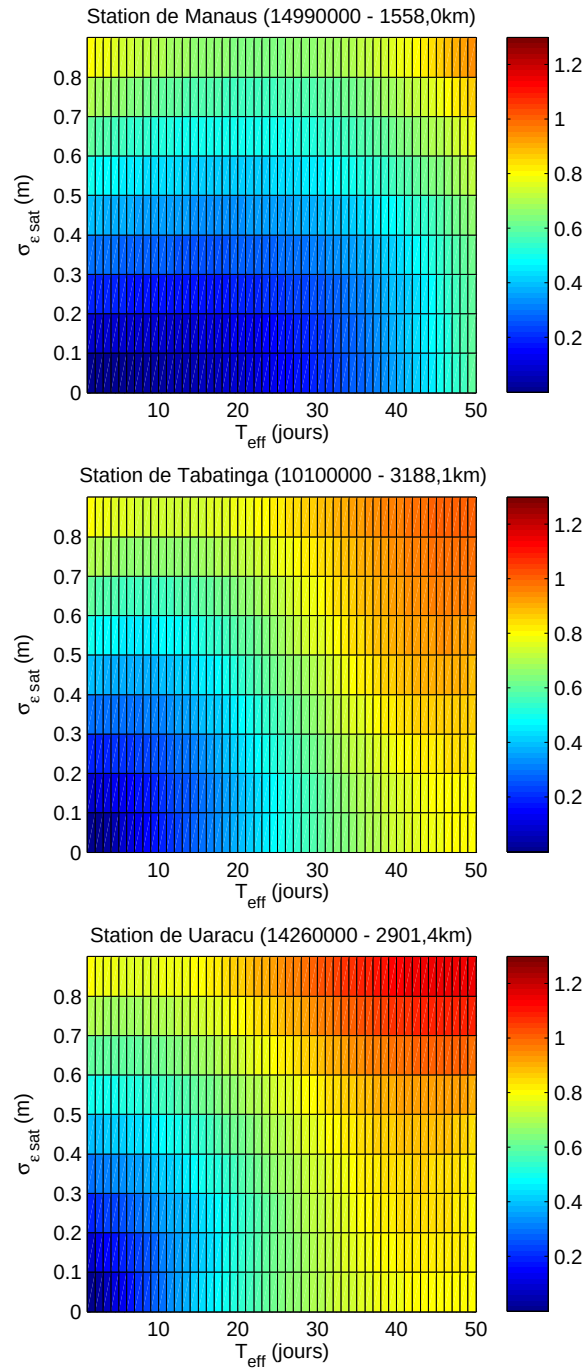


FIG. 9.8: Extrait de la figure 9.6 (colonne centrale) pour la méthode de suréchantillonnage « polynomiale de degré 4 avec contrainte d'énergie ».

Station	Fleuve	AVISO/TP/Ocean	RLH/ENVISAT
		$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}} = 1,27\text{m}$ $T_{\text{eff}} = 21,5 \text{ jours}$	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}} = 0,71\text{m}$ $T_{\text{eff}} = 41,6 \text{ jours}$
Manaus	Negro	1,13	1,18
Tabatinga	Solimões	1,27	1,22
Uaracu	Uaupes	1,25	1,54

TAB. 9.4: Qualité hydrologique des séries temporelles limnimétriques reconstituées à partir des produits alti-hydrologiques AVISO/TP/Ocean et RLH/ENVISAT sur les stations de Manaus, Tabatinga et Uaracu (performances globales des produits alti-hydrologiques : AVISO/TP/Ocean [1,27m ; 21,5 jours] ; RLH/ENVISAT [0,71m ; 41,6 jours]).

9.3.2 Application à l'hydrologie : détermination de l'incertitude associée à une série temporelle limnimétrique reconstituée à partir d'un produit alti-hydrologique

Les développements précédents (chapitre 8) nous ont permis, à partir d'une série temporelle alti-hydrologique fournie par un produit alti-hydrologique sur une station virtuelle avec l'incertitude associée aux mesures, de reconstituer la série limnimétrique à cette station virtuelle.

Nous allons dans cette section proposer une méthode de détermination de la bande d'incertitude associée à cette série temporelle limnimétrique reconstituée. On considérera pour cela les deux stations virtuelles de la fin du chapitre 8 (cf. figure 8.12) qui sont représentées dans la figure 9.10. Elles sont situées sur le Solimões à quelques kilomètres à l'amont de sa confluence avec le Negro. Sur ces stations virtuelles, le spectre de fréquences de la série limnimétrique est le même que le spectre de fréquences de la station limnimétrique de Manaus située à quelques dizaines de kilomètres.

Pour chaque station virtuelle, nous connaissons les indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique correspondant (cf. chapitre 7) et nous pouvons déterminer sur la figure 9.9 l'indicateur de qualité hydrologique $\sigma_{\varepsilon_{LR}}$ résultant. Ces résultats sont présentés dans la table de la figure 9.9.

On y observe notamment l'important impact de la période d'échantillonnage effective sur la « qualité hydrologique » : l'utilisation conjointe des mesures altimétriques collectées sur deux traces d'ENVISAT permet d'améliorer les résultats de 19cm par rapport à l'emploi des mesures collectées sur une seule trace⁸.

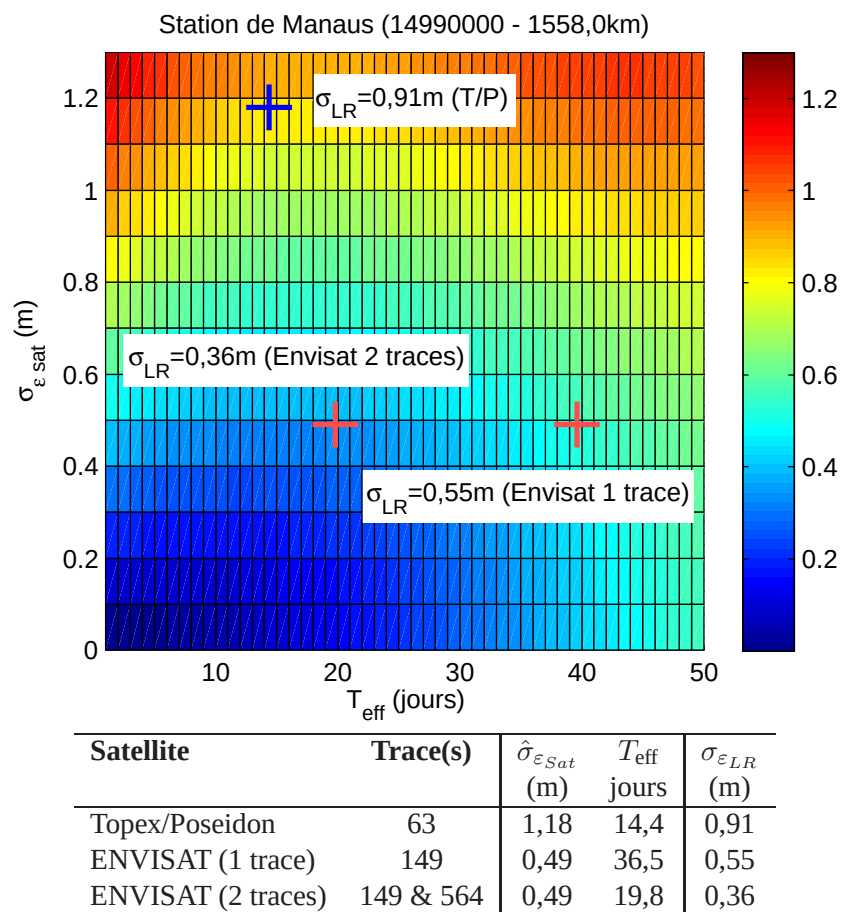


FIG. 9.9: Estimation de la « qualité hydrologique » ($\sigma_{\varepsilon_{LR}}$) en fonction des indicateurs de précision d'un produit alti-hydrologique ($\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ et T_{eff}). Nous utilisons ici le modèle de la station de Manaus dont la série temporelle mesurée in-situ présente un spectre en fréquence très proche de celui des séries temporelles de niveaux à ces deux stations virtuelles.

⁸Une illustration de ces deux traces est donnée à la figure 9.10.

La figure 9.11 illustre, pour les produits alti-hydrologiques « AVISO » et « River & Lake Hydrology », comment à partir des mesures alti-hydrologiques accompagnées de leur incertitude (chronogramme du haut) on peut reconstituer par suréchantillonnage la série temporelle limnimétrique et lui associer la bande d'incertitude issue de la table 9.9.

On vérifie (figure du bas) que la série temporelle mesurée in-situ passe statistiquement par cette bande d'incertitude.

9.3.2.1 Analyse

Cette méthode de détermination de la bande d'incertitude associée à la série temporelle limnimétrique reconstituée doit être considérée comme une première approche qui nécessite des développements ultérieurs. On constate notamment que dans le cas de Topex/Poseidon (cf. figure 9.11) la bande d'incertitude de largeur constante est nettement supérieure en hautes eaux aux intervalles d'incertitude des mesures. Il conviendrait donc de déterminer des largeurs de bande différentes entre basses eaux, moyennes eaux et hautes eaux.

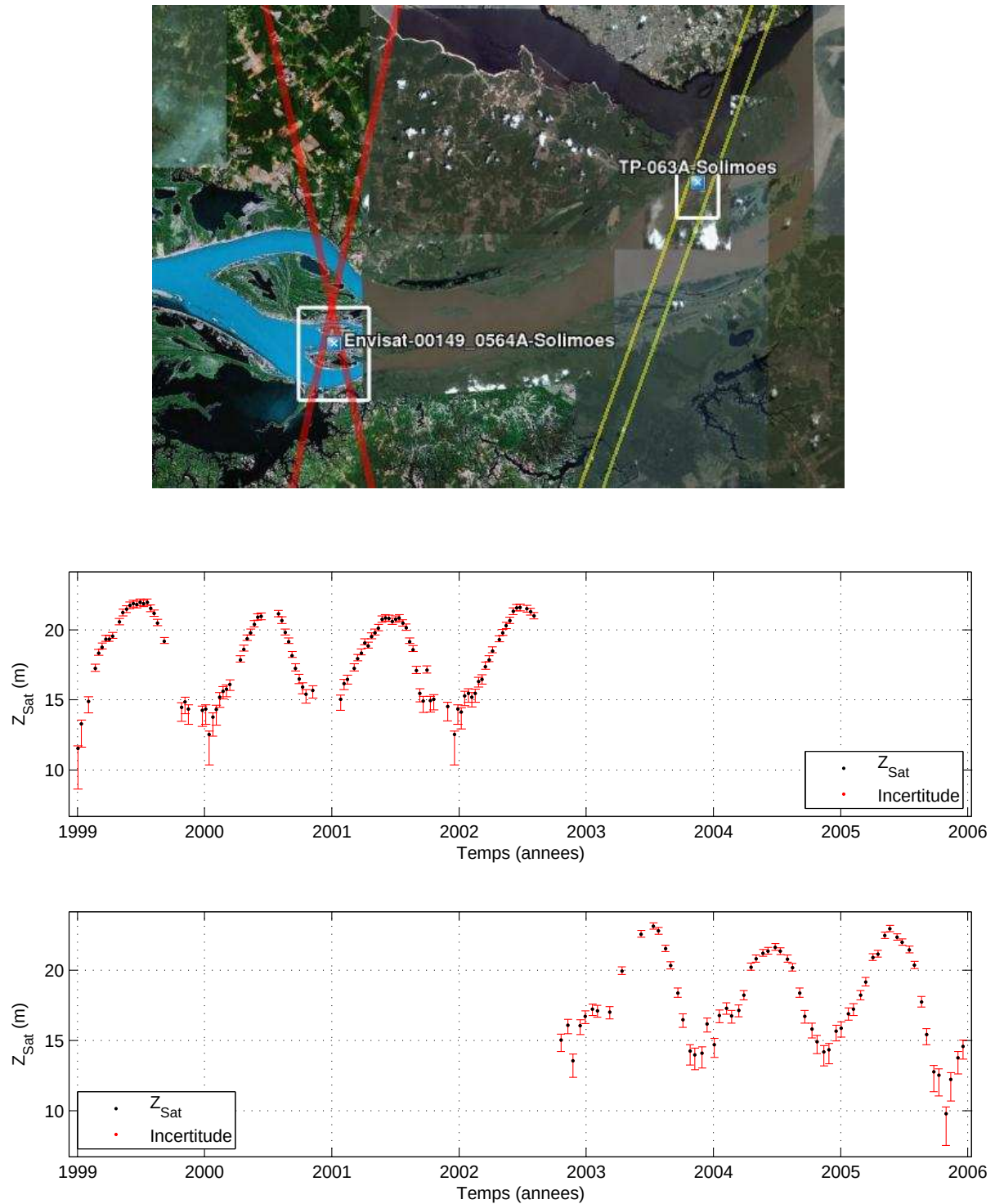


FIG. 9.10: Illustration de séries temporelles alti-hydrologiques avec valeurs d'incertitude associées.

Les deux séries temporelles alti-hydrologiques sont issues de deux stations virtuelles voisines (distantes de 30km) sur le fleuve Solimões. En haut : station virtuelle sur la trace 63 de Topex/Poseidon (produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR) ; En bas : station virtuelle sur les traces 149 et 564 d'ENVISAT (produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT). Cette dernière série temporelle est construite par agglomération des mesures altimétriques collectées sur les deux traces 149 et 564, et présente une période d'échantillonnage inférieure à 35 jours (nominalement $\frac{35}{2}$ jours).

On peut constater pour ces deux séries temporelles alti-hydrologiques que l'incertitude sur les mesures est plus grande pendant les périodes de basses eaux.

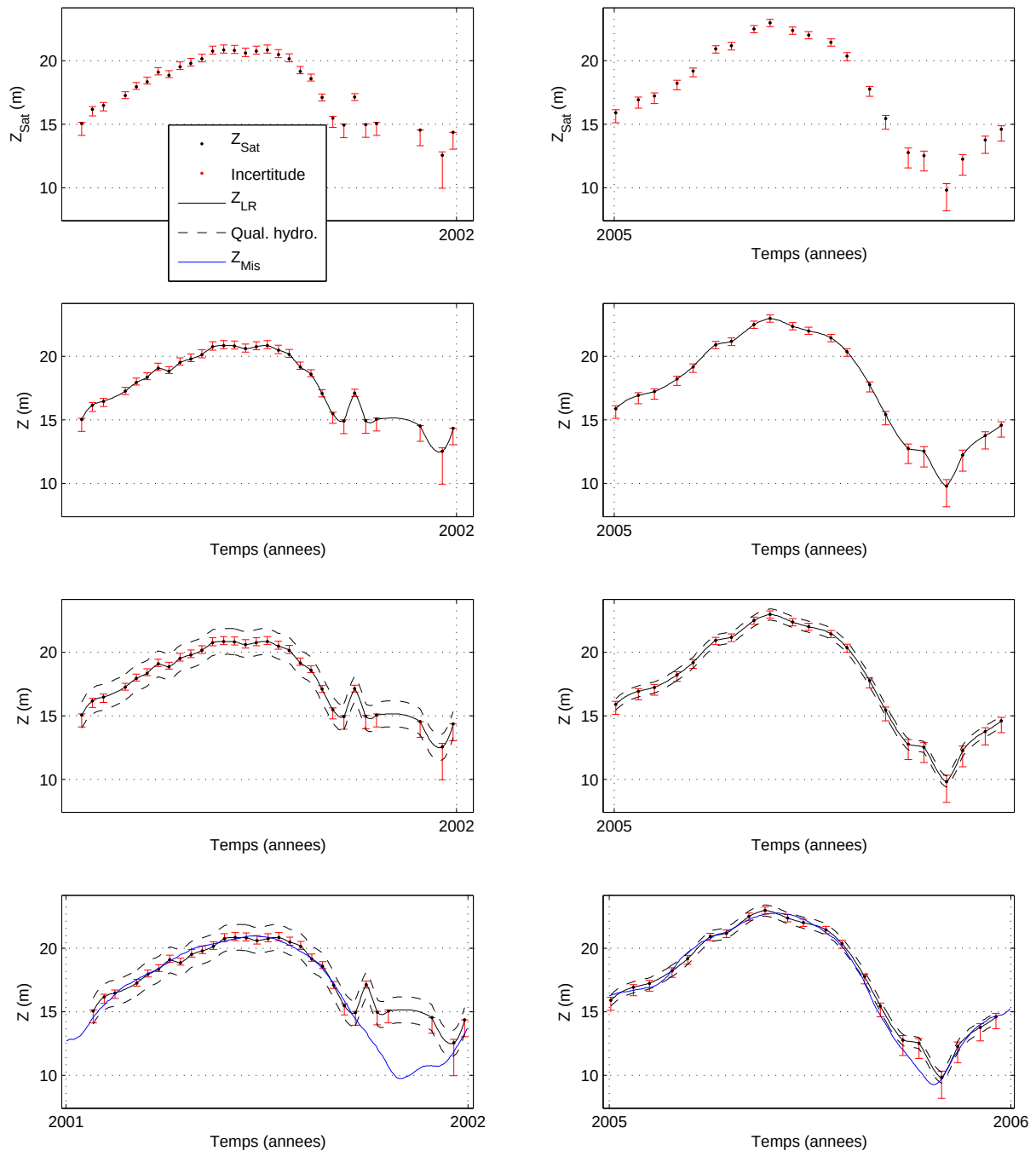


FIG. 9.11: Illustration de séries temporelles limnimétriques reconstituées avec leurs bandes d'incertitude. Les deux séries temporelles alti-hydrologiques sont issues de deux stations virtuelles voisines (distantes de 30km) sur le fleuve Solimões. Colonne de gauche : station virtuelle sur la trace 63 de Topex/Poseidon (produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR) ; Colonne de droite : station virtuelle sur les traces 149 et 564 d'ENVISAT (produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT). Le suréchantillonnage permet de reconstituer les séries temporelles limnimétriques. On peut alors leur associer une bande d'incertitude.

Chapitre 10

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Sommaire

10.1 Conclusion	268
10.2 Perspectives	271
10.2.1 Améliorations de la méthode	271
10.2.2 Nouvelles questions de recherche	271

10.1 Conclusion

Les vingt dernières années ont vu un développement très actif de l'altimétrie satellitaire radar et ont démontré son fort potentiel, encore sous-exploité sur les eaux continentales. La communauté scientifique des technologies spatiales et la communauté scientifique de l'hydrologie sont face à un double enjeu :

- de quantification de l'incertitude associée aux mesures de niveau des cours d'eau par altimétrie radar, pour les utiliser dans différentes applications hydrologiques,
- d'amélioration de la performance des technologies et des algorithmiques de mesures sur les eaux continentales.

L'élaboration d'une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques est une étape indispensable à cet effort collectif, étape à laquelle le présent travail de thèse a été dédié.

Les objectifs de cette thèse étaient doubles (extrait du chapitre 1) :

L'objectif principal était de définir une méthode de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques sous l'angle altimétrique (précision et taux de pertes de mesures) comme sous l'angle hydrologique (incertitude, période d'échantillonnage effective et qualité de reconstitution du signal limnimétrique).

L'objectif associé était de mettre en œuvre cette méthode pour :

- fournir une caractérisation « objective » de la qualité de différents produits alti-hydrologiques et faire ainsi le point sur l'état actuel de la précision de l'altimétrie radar sur les cours d'eau,
- comparer les performances de différentes chaînes de filtrage automatique, de fenêtrage géographique et de (re)tracking des formes d'onde,
- développer une méthode de calcul de l'incertitude associée à chaque mesure alti-hydrologique, de façon à fournir aux hydrologues des produits mobilisables en connaissance de cause,
- développer une méthode de reconstitution d'une série temporelle limnimétrique au pas de temps journalier à partir du produit alti-hydrologique sur une station virtuelle, et de détermination de la bande d'incertitude associée.

La Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques s'articule en six grandes étapes présentées en détail aux chapitres 5 et 6.

Les trois premières permettent, par confrontation systématique à une série temporelle in-situ reconstituée, de quantifier l'erreur approximée d'une série temporelle alti-hydrologique ainsi que les indicateurs de précision approximés ($\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$, $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $RMSE_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$) et les indicateurs d'échantillonnage (T_{eff} et η_{eff}).

Etape 1 : Reconstitution d'une série temporelle in-situ (Z_{Ris}) à la station virtuelle à partir des mesures in-situ issues de stations limnimétriques amont et aval.

Etape 2 : Construction de la série temporelle de l'erreur approximée des mesures altimétriques ($\tilde{\varepsilon}_{Sat}$) par comparaison des mesures altimétriques (Z_{Sat}) aux mesures in-situ reconstituées (Z_{Ris}).

Etape 3 : Calcul des indicateurs de précision approximés ($\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$, $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $RMSE_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$) et des indicateurs d'échantillonnage finaux (T_{eff} et η_{eff}).

Les trois dernières étapes de la méthode permettent d'estimer des indicateurs finaux¹ de qualité d'un produit alti-hydrologique sur une station virtuelle, par soustraction de la part d'erreur imputable aux mesures in-situ et à la méthode de reconstitution.

Etape 4 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ $\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$.

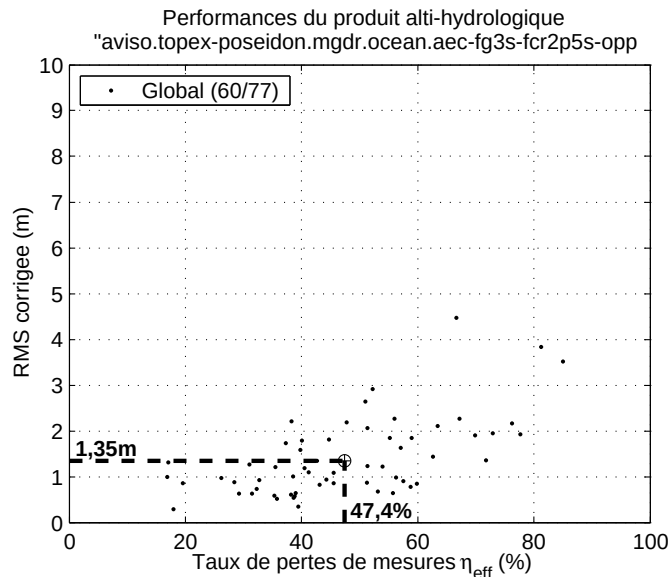
Etape 5 : Estimation des indicateurs de précision des mesures in-situ reconstituées $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$. Par quantification de l'erreur des mesures in-situ reconstituées (ε_{Rec}) sur des stations limnimétriques de test ; modélisation des indicateurs ($\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$) à partir de caractéristiques hydromorphologiques

¹Les indicateurs d'échantillonnage finaux sont indépendants de la qualité des mesures in-situ ou des mesures in-situ reconstituées et sont donc obtenus dès la fin de l'étape 3 de la méthode.

de la station virtuelle déterminables *a priori* ; estimation de leurs valeurs pour chacune des stations virtuelles du produit alti-hydrologique.

Etape 6 : Estimation des indicateurs de précision finaux ($\hat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$, $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ et $R\hat{M}S_{\varepsilon_{Sat}}$) à partir de l'équation (4.19) et analyse des possibles cas de rejets.

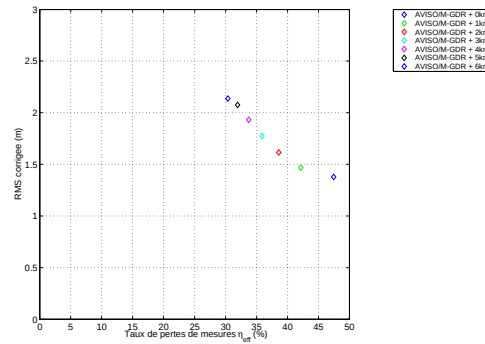
Cette méthode, appliquée pour un produit alti-hydrologique donné, sur un grand nombre de stations virtuelles du bassin amazonien, permet une caractérisation statistique de la qualité de ce produit alti-hydrologique (cf. figure ci-après). La méthode s'avère reproductible et stable.



Dans une deuxième partie, nous avons mis en œuvre de cette méthode pour différentes finalités.

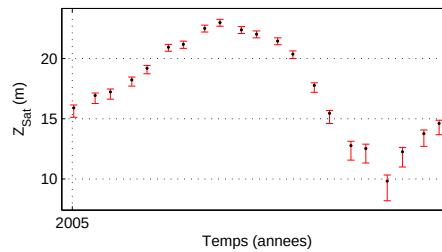
1. Nous avons quantifié et analysé la qualité de dix produits alti-hydrologiques issus de différentes missions d'altimétrie radar (Topex/Poseidon, ERS-2 et ENVISAT). La qualité de ces produits alti-hydrologiques est représentée dans le plan $RMS = f(\eta_{eff})$. Les résultats de cette analyse de la qualité montrent pour tous les produits alti-hydrologiques une précision métrique pour un ensemble de stations virtuelles définies sur des cours d'eau dont la largeur varie de 500m à ~ 15 km. Des différences de performances significatives ont été mises en évidence entre ces produits.
2. Nous avons mis en œuvre la méthode pour quantifier l'impact sur la qualité des séries temporelles alti-hydrologiques de différents éléments de la chaîne de fabrication de ces produits alti-hydrologiques :
 - Stratégies de fenêtrage géographique : nous avons montré qu'un fenêtrage ajusté sur les berges du fleuve donnait les meilleures performances en terme de précision. Un élargissement des fenêtres géographiques permet de diminuer le taux de pertes de mesures au prix d'une dégradation de la précision.
 - Algorithmes de retracking : nous avons montré la puissance de la méthode pour comparer sur une base commune les performances de différents algorithmes de retracking et sélectionner le plus efficace.
 - Chaînes de filtrage automatiques : nous avons montré qu'une chaîne de filtrage automatique composée d'un filtrage global à « 3 sigmas » suivi d'un filtrage calendaire à « 2,5 sigmas » puis de la sélection d'une mesure représentative (médiane) par passage, permettait d'optimiser la précision d'un produit alti-hydrologique.

Ces différentes avancées permettront aux spécialistes de l'altimétrie radar de construire des produits alti-hydrologiques, destinés aux hydrologues, en maîtrisant ces trois éléments de la chaîne de fabrication de leurs produits.



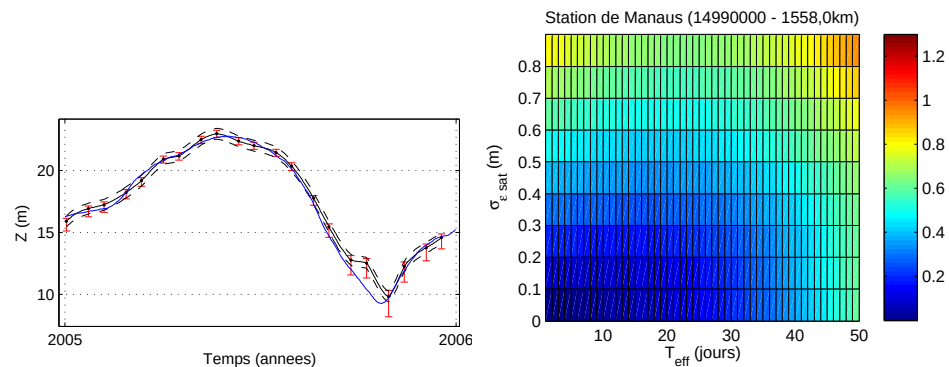
Comparaison des performances de 7 méthodes de fenêtrage géographique (cf. chapitre 7, page 214).

- Le résultat de l'analyse de la qualité d'un produit alti-hydrologique permet de dériver une information sur l'incertitude des mesures. Nous avons développé (voir chapitre 8) une méthode permettant d'associer à chaque mesure altimétrique une valeur d'incertitude qui lui est propre. De cette façon, les séries temporelles alti-hydrologiques que l'on délivre aux utilisateurs finaux (hydrologues, gestionnaires, etc.) peuvent être pleinement qualifiées en terme de qualité et sont alors exploitables en connaissance de cause.



Série temporelle alti-hydrologique avec valeurs d'incertitude (cf. chapitre 8).

- Enfin, nous avons abordé au chapitre 9 la question de la « qualité hydrologique » des produits alti-hydrologiques sous l'angle de la capacité qu'ils donnent à reconstituer des séries temporelles limnimétriques au pas de temps journalier. Nous avons proposé différentes méthodes de suréchantillonnage des séries temporelles alti-hydrologiques pour reconstituer les séries temporelles limnimétriques aux stations virtuelles. Nous avons également proposé une méthode de quantification de l'impact de la période d'échantillonnage effective T_{eff} et de l'incertitude de mesures satellites $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ sur la qualité de cette reconstitution en fonction du spectre en fréquences du signal hydrologique. Elle permet d'associer une bande d'incertitude à la série temporelle limnimétrique reconstituée.



Série temporelle limnimétrique reconstituée avec sa bande d'incertitude (cf. chapitre 9).

Suite aux travaux de cette thèse, nous disposons donc de méthodes robustes pour associer à chaque mesure d'un produit alti-hydrologique une valeur d'incertitude correspondante et pour quantifier de manière objective les gains de performances permis par de nouvelles algorithmiques ou de nouvelles technologies de mesure altimétrique sur les cours d'eau.

10.2 Perspectives

À ce stade, les perspectives s'articulent en deux volets : d'une part les améliorations de la méthode, d'autre part de nouvelles questions de recherche.

10.2.1 Améliorations de la méthode

1. Un des principaux objectifs à venir sera d'appliquer de manière systématique la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques à tout produit alti-hydrologique pour en caractériser de façon objective les performances. Parmi les prochains produits à caractériser, nous pouvons citer les produits développés par le projet HydroWeb construits à partir des données de plusieurs satellites altimètres (notamment Topex/Poseidon et ENVISAT), le produit issu de la mission d'altimétrie LiDAR ICESat, les produits Jason-2 en cours d'élaboration, etc.
2. De manière à démontrer le caractère générique de la méthode il est nécessaire de mener des analyses de la qualité des mesures altimétriques sur d'autres grands bassins du globe : un travail en ce sens est envisagé sur le bassin du fleuve Niger. Les indicateurs de qualité d'un même produit pour différents bassins seront comparés et analysés.
3. Une limitation actuelle de la méthode est liée aux caractéristiques du bassin amazonien, et réside dans l'impossibilité de quantifier la précision absolue des mesures altimétriques. En effet, seul un nivellement de haute précision permettrait une analyse de cette précision absolue. Le bassin amazonien a toutefois permis d'étudier la précision des mesures altimétriques sur une large gamme de fleuves. On devra rechercher les moyens technologiques permettant d'assurer ce référentiel de précision absolue. Le système fluvial Solimões-Amazone orienté Ouest-Est semble particulièrement bien adapté pour cela.
4. Le développement d'une bibliothèque de méthodes de reconstitution des séries temporelles in-situ pourra faire l'objet de travaux plus approfondis, notamment en collaboration avec des hydrauliciens et des hydrologues afin de prendre en compte au mieux les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau. Ces nouvelles méthodes devraient être applicables à une large gamme de cours d'eau, ce qui n'est pas le cas de notre méthode de reconstitution par interpolation polynomiale qui semble plutôt adaptée aux grands fleuves de plaine (cf. chapitre 5).
5. Nous avons abordé au chapitre 8 plusieurs méthodes de suréchantillonnage des séries temporelles alti-hydrologiques permettant de construire des séries temporelles limnimétriques reconstituées journalières. Parmi ces méthodes, les méthodes de suréchantillonnage spectrales (à bande spectrale limitée) devraient faire l'objet de travaux supplémentaires permettant une utilisation plus fine de leurs paramètres (largeur de bande spectrale) et l'intégration complète de l'information sur l'incertitude associée aux mesures altimétriques.

10.2.2 Nouvelles questions de recherche

10.2.2.1 Présent et futur de l'altimétrie radar

La série Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2 et Jason-3 : Le satellite Jason-2, lancé en juin 2008, a dernièrement pris le relais de son aîné Jason-1. Jason-2 est équipé de l'altimètre Poseidon 3, qui a les mêmes caractéristiques générales que Poseidon 2 qui équipe Jason-1 tout en ayant un bruit instrumental plus réduit.

Un mode expérimental permet à Jason-2 de d'améliorer son système de tracking, notamment sur les zones côtières, les continents et glaces (source AVISO). Cette particularité de Poseidon 3 est encourageante et devrait permettre d'améliorer la qualité des mesures pour le suivi des eaux continentales par rapport à ce que propose déjà Topex/Poseidon.

La continuité devrait être assurée avec le futur satellite de la même famille Jason-3 dont le lancement est prévu pour 2013-2014.

Sentinel-3 : Le lancement du satellite Sentinel-3, développé dans le cadre du programme GMES (ESA/Commission Européenne), est prévu en 2012. Sentinel-3 appartient à une série de 5 satellites dont les thématiques sont variées : mesures radars SAR (continuité des mesures ERS-1/2 et ENVISAT), mesures optiques en mode spectral, surveillance de la Terre et à l'océanographie opérationnelle, pollution atmosphérique en orbite géostationnaire et étude de la chimie atmosphérique en orbite basse.

Les objectifs de la mission s'appliquent à l'océan, aux surfaces continentales et à la cryosphère. Il est prévu, parmi les applications sur les surfaces continentales, de mesurer le niveau de la surface des rivières et des lacs.

SWOT : Le satellite SWOT (Surface Water Ocean Topography), à l'état de projet, est prévu pour 2013-2016 dans le cadre d'un partenariat entre le CNES et la NASA. L'objectif de la mission SWOT serait de réunir les besoins des communautés hydrologiques et océanographiques en un seul satellite. Pour ce faire, le satellite embarquera deux instruments complémentaires : un altimètre nadir ainsi qu'un radar interférométrique (cf. figure 10.1).

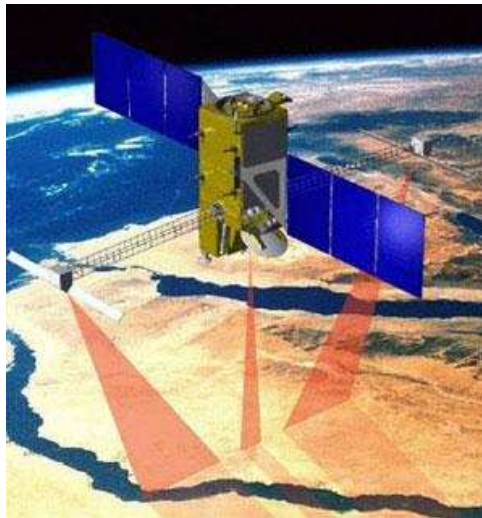


FIG. 10.1: Aperçu de la mission SWOT.

10.2.2.2 Fusion des données altimétriques et données in-situ

À mesure que la qualité des produits alti-hydrologiques s'améliorera, la fusion de ces données avec les données in-situ deviendra un enjeu majeur pour les hydrologues.

Les échantillonnages spatio-temporels des mesures issues des réseaux hydrométriques d'une part (suivi temporel très fin (journalier) et répartition spatiale très lâche) et des satellites altimètres d'autre part (suivi temporel lâche, et couverture spatiale plus dense) sont très différents et complémentaires. De plus, la fusion de données altimétriques issues de multiples missions présentant des échantillonnages spatio-temporels très différents permettrait de renforcer la cohérence de ces mesures.

Un enjeu majeur de l'exploitation de ces données, in-situ et/ou altimétriques, à l'échelle d'un réseau hydrographique est de développer les méthodes pour reconstituer, en tout instant t et en tout endroit x (abscisse curviligne), le niveau du cours d'eau $Z(x, t)$.

Selon la qualité des mesures altimétriques considérées, il sera possible de reconstituer, sur un tronçon fluvial donné, une vue partielle du signal hydrologique $Z(x, t)$ plus ou moins fidèle à la réalité à partir d'un interpolateur de type « suréchantillonneur à bande spectrale limitée » (cf. § 9.2.3). Les possibilités d'amélioration de cet estimateur dépendront des caractéristiques d'échantillonnage spatio-temporel et de la précision des mesures altimétriques, de la complexité du signal hydrologique à estimer et de l'efficacité de l'interpolateur bidimensionnel de $Z(x, t)$.

Le potentiel d'un tel estimateur est considérable, par la connaissance qu'il permet de synthétiser et par la vue de l'hydrodynamique qu'il donne du réseau hydrographique. Ceci est une clé pour la valorisation de l'altimétrie satellitaire radar par les hydrologues.

La figure 10.2 illustre ce que l'on pourrait obtenir à partir d'un modèle d'estimation de $Z(x, t)$ pour le système fluvial Amazone-Solimões, il est basé sur des mesures in-situ (ANA) sur lesquelles nous avons superposé l'échantillonnage spatio-temporel des satellites Topex/Poseidon et ENVISAT.

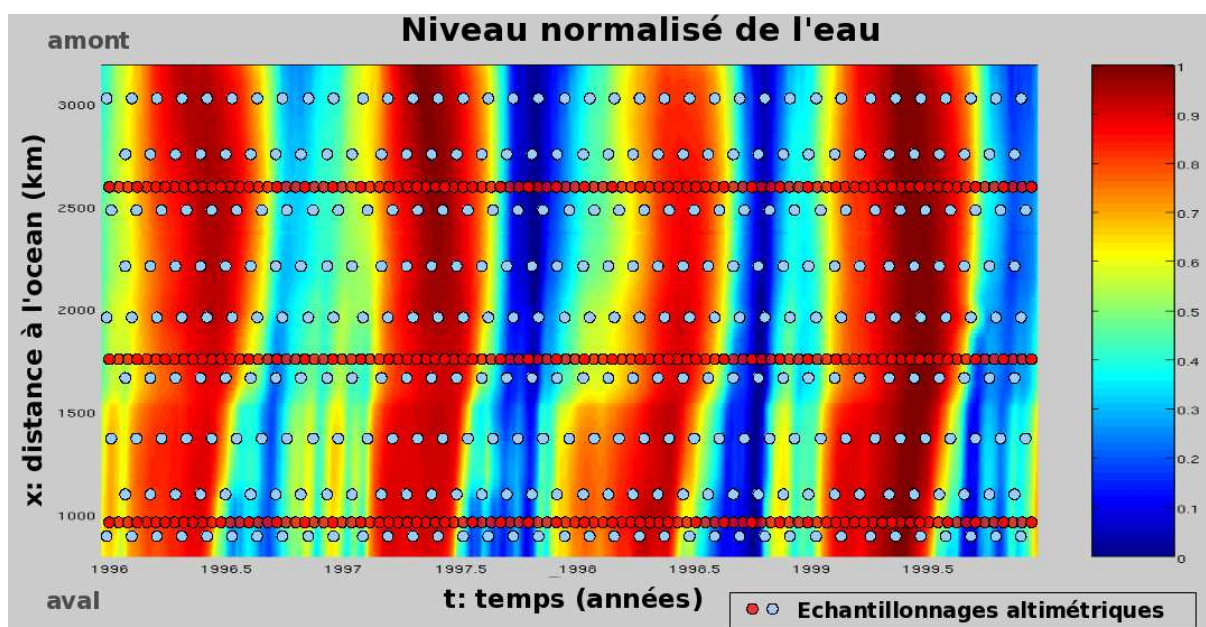


FIG. 10.2: Exemple de reconstitution du champ $Z(x, t)$ centré (suppression de la pente moyenne) et normalisé sur le tronçon Amazone-Solimões. L'interpolation spatiale est réalisée à partir des mesures in-situ et à l'aide de l'interpolateur polynomial de degré 4 présenté en section 5.2 (le suréchantillonnage, est dans cet exemple, opéré uniquement selon l'axe x des abscisses curvilignes, l'échantillonnage temporel journalier des mesures in-situ étant suffisant pour cette illustration). En superposition, et à titre purement illustratif, les points rouges et bleus suggèrent respectivement les échantillonnages spatio-temporels, bien différents et mais certainement complémentaires, des satellites Topex/Poseidon/Jason-1/Jason-2 d'une part et ERS-2/ENVISAT d'autre part.

10.2.2.3 Développements technologiques

Les pistes de développement technologiques de l'altimétrie sont très nombreuses et prometteuses : altimétrie LiDAR, interférométrie « across-track » (SWOT), interférométrie « along-track » pour la mesure des vitesses de surface.

Un enjeu à dix, quinze ou vingt ans serait de rassembler sur une même plateforme les technologies de mesure permettant de quantifier de façon simultanée les variables de surface des cours d'eau (niveaux, largeurs, pentes, vitesses de surface, etc.) et, sur cette base, de développer la capacité d'estimation des débits des cours d'eau.

L'approche que nous avons développée dans cette thèse visant à une caractérisation rigoureuse de la précision des mesures altimétriques, doit s'appliquer de la même façon à la caractérisation de la précision de chacune de ces variables.

Quatrième partie

Annexes

Annexe A

Descriptif des stations virtuelles définies sur le bassin amazonien

Sommaire

A.1	Reconstitution des séries temporelles de niveaux aux confluences entre les principaux cours d'eau du bassin amazonien	277
A.2	Stations virtuelles du projet CASH	278
A.3	Stations virtuelles du produit alti-hydrologique [~Birkett 2002]	278
A.4	Stations virtuelles définies pour les produits alti-hydrologiques RLH/ENVISAT et RLH/ERS-2	279
A.5	Stations virtuelles définies dans le cadre de la thèse	282

Cette section récapitule les caractéristiques des stations virtuelles des produits alti-hydrologiques traités dans le cadre de la thèse.

A.1 Reconstitution des séries temporelles de niveaux aux confluences entre les principaux cours d'eau du bassin amazonien

La reconstitution des séries temporelles de niveaux aux confluences entre les principaux cours d'eau du bassin amazonien permet d'améliorer la qualité des reconstitutions de séries temporelles in-situ aux stations virtuelles altimétriques (cf. sections ci-après). En effet, la connaissance de la série temporelle in-situ reconstituée à la confluence des affluents sur lesquels nous avons défini des stations virtuelles (fleuves Madeira, Purus, Japura, Jurua, etc.) permet une reconstitution à ces stations virtuelles plus fiable.

La table ci-dessous décrit les codes des stations limnimétriques ANA que nous avons utilisées pour reconstituer les séries temporelles in-situ à ces points de confluence.

Code confluence	Affluent	Lieu	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
fozamazonas ¹	Amazon	Atlantique	00000001			
fozpurus	Purus	Solimoes	13150000	13155000	14050000	14100000
fozjapura	Japura	Solimoes	11500000	12351000	12900001	13150000
fozjurua	Jurua	Solimoes	11500000	12351000	12900001	13150000
fozmadeira	Madeira	Amazon	14100000	15030000	16350002	17050001
fozjutai	Jutai	Solimoes	11400000	11500000	12351000	12900001
fozica	Iça	Solimoes	11400000	11500000	12351000	12900001
fozjavari	Javari	Solimoes	10100000	11400000	11500000	
fozbranco	Branco	Negro	14420000	14480002	14840000	14990000
encontrodasaguas	Negro/Solimoes	Amazon	14050000	14100000	15030000	16350002
foztarauca	Tarauca	Jurua	12520000	12550000	12700000	12840000

¹ Cette série temporelle de niveaux correspondant à l'embouchure de l'Amazone dans l'océan Atlantique est définie comme présentant un niveau des eaux nul quel que soit la date considérée, son code station à été défini comme 00000001.

Les séries temporelles in-situ reconstituées résultantes ont été intégrées dans notre base de données de niveaux des cours d'eau et les « codes de confluences » présentés dans cette table sont utilisés dans les définitions des stations virtuelles des tables ci-après en tant que « code station ».

A.2 Stations virtuelles du projet CASH

Définition des stations virtuelles du projet CASH

Stations virtuelles	Orbite	Traces	Fleuve	Lat. min.	Lat. max.	Lon. min.	Lon. max.	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
TP-CASH-063A-Negro	TPa/J1	63	Negro	-3,2060	-3,1520	-59,9780	-59,9330	foznegro	14990000		
TP-CASH-063A-Solimoes	TPa/J1	63	Solimoes	-3,2960	-3,2240	-60,0090	-59,9610	16350002	15030000	14100000	14050000
TP-CASH-076A-Demini	TPa/J1	76	Demini	-0,5260	-0,4840	-62,9120	-62,8680	14480002			
TP-CASH-076A-Negro	TPa/J1	76	Negro	-1,1060	-1,0230	-62,7270	-62,6520	14990000	14840000	14480002	14420000
TP-CASH-076A-Solimoes	TPa/J1	76	Solimoes	-3,8700	-3,8090	-61,7270	-61,6720	14100000	14050000	13155000	13150000
TP-CASH-139A-Amazon	TPa/J1	139	Amazon	-2,5820	-2,5560	-56,9160	-56,8880	17900000	17050001	16350002	15030000
TP-CASH-152A-Amazon	TPa/J1	152	Amazon	-3,2680	-3,2450	-59,0880	-59,0610	14100000	15030000	16350002	17050001
TP-CASH-228A-Amazon	TPa/J1	228	Amazon	-2,5640	-2,5000	-56,5360	-56,4710	17900000	17050001	16350002	15030000
TP-CASH-241A-Branco	TPa/J1	241	Branco	-0,4600	-0,4270	-61,8200	-61,8070	fozbranco	14790000	14710000	
TP-CASH-241A-Negro	TPa/J1	241	Negro	-1,2400	-1,1890	-62,1270	-62,0500	14990000	14840000	14480002	14420000

Paramètres géographiques, morphologiques et hydrologiques des stations virtuelles du projet CASH

Station virtuelle	Nb SL	dsppa (km)	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\mathcal{W}_R$ (m)	$\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$ (m)	ΔZ_{20km} (m)
TP-CASH-063A-Negro	2	-6,14	6,14	8,71	1545,6	0,19	3970	14,83	-
TP-CASH-063A-Solimoes	4	-51,20	51,20	128,64	1562,7	0,38	1670	14,84	-
TP-CASH-076A-Demini	1	-139,56	139,56	139,56	2142,4	1,00	330	8,91	19,4
TP-CASH-076A-Negro	4	30,05	30,05	146,88	1972,8	1,51	16700	9,09	8,5
TP-CASH-076A-Solimoes	4	51,88	51,88	96,38	1786,1	0,41	2350	15,98	14,4
TP-CASH-139A-Amazon	4	-22,77	22,77	154,77	1106,9	1,02	3760	10,66	0,0
TP-CASH-152A-Amazon	4	72,88	72,88	227,01	1438,6	1,03	3410	14,25	13,5
TP-CASH-228A-Amazon	4	25,64	25,64	146,65	1058,5	0,50	6510	10,06	0,0
TP-CASH-241A-Branco	3	109,42	109,42	154,00	1985,3	1,80	1610	11,53	15,9
TP-CASH-241A-Negro	4	-60,25	60,25	165,48	1899,7	1,51	17610	10,79	5,6

A.3 Stations virtuelles du produit alti-hydrologique [~Birkett 2002]

Définition des stations virtuelles du produit alti-hydrologique [~Birkett 2002]

Stations virtuelles	Orbite	Traces	Fleuve	Lat. min.	Lat. max.	Lon. min.	Lon. max.	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
TPA-063A-Negro-Bir	TPa/J1	63	Negro	-3,4300	-3,2100	-60,0420	-59,9620	foznegro	14990000		
TPA-063B-Solimoes-Bir	TPa/J1	63	Solimoes	-3,8500	-3,0800	-60,1920	-59,9160	16350002	15030000	14100000	14050000
TPA-076A-Purus-Bir	TPa/J1	76	Purus	-4,2200	-4,1700	-61,5770	-61,5610	fozpurus	13990000	13980000	13962000
TPA-076B-Purus-Bir	TPa/J1	76	Purus	-4,2200	-4,1700	-61,5770	-61,5610	fozpurus	13990000	13980000	13962000
TPA-089A-Embira-Bir	TPa/J1	89	Embira	-8,0000	-7,9400	-70,1990	-70,1760	foztarauca	12680000	12650000	12640000
TPA-102A-Jurua-Bir	TPa/J1	102	Jurua	-6,6100	-6,5900	-69,2090	-69,2010	12840000	12700000	12550000	12520000
TPA-102A-Solimoes-Bir	TPa/J1	102	Solimoes	-4,0700	-4,0400	-70,1290	-70,1180	12351000	11500000	11400000	10100000
TPA-102B-Jurua-Bir	TPa/J1	102	Jurua	-6,6500	-6,5000	-69,2410	-69,1870	12840000	12700000	12550000	12520000
TPA-152A-Amazon-Bir	TPa/J1	152	Amazon	-3,2600	-3,2100	-59,0860	-59,0690	14100000	15030000	16350002	17050001
TPA-178A-Purus-Bir	TPa/J1	178	Purus	-7,7700	-7,6900	-65,9730	-65,9440	13880000	13870000	13750000	13700000
TPA-178B-Purus-Bir	TPa/J1	178	Purus	-7,7300	-7,6900	-65,9730	-65,9580	13880000	13870000	13750000	13700000
TPA-241A-Solimoes-Bir	TPa/J1	241	Solimoes	-4,1000	-3,9500	-63,1150	-63,0640	13155000	13150000	12900001	12351000
TPA-254A-Solimoes-Bir	TPa/J1	254	Solimoes	-3,2500	-3,1500	-64,7790	-64,7430	13150000	12900001	12351000	11500000
TPA-254B-Solimoes-Bir	TPa/J1	254	Solimoes	-3,3700	-3,3300	-64,7140	-64,7010	13150000	12900001	12351000	11500000

Paramètres géographiques, morphologiques et hydrologiques des stations virtuelles du produit alti-hydrologique [~Birkett 2002]

Station virtuelle	Nb SL	dsppa (km)	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\mathcal{W}_R$ (m)	$\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$ (m)	ΔZ_{20km} (m)
TPA-063A-Negro-Bir	2	-6,19	6,19	8,73	1545,7	0,19	5620	14,83	-
TPA-063B-Solimoes-Bir	4	-49,70	49,70	128,57	1561,2	0,38	2840	14,83	24,5
TPA-076A-Purus-Bir	4	-38,64	38,64	65,22	1817,3	0,57	830	16,53	5,8
TPA-076B-Purus-Bir	4	-38,64	38,64	65,22	1817,3	0,57	830	16,53	5,8
TPA-089A-Embira-Bir	4	50,41	50,41	153,84	4421,5	1,75	120	11,19	44,6
TPA-102A-Jurua-Bir	4	191,03	191,03	438,61	3888,8	1,00	250	15,98	30,0
TPA-102A-Solimoes-Bir	4	12,41	12,41	170,35	3175,7	0,55	1640	13,56	21,5
TPA-102B-Jurua-Bir	4	191,03	191,03	438,61	3888,8	1,00	250	15,98	52,6
TPA-152A-Amazon-Bir	4	72,88	72,88	227,01	1438,6	1,03	3410	14,25	23,8
TPA-178A-Purus-Bir	4	241,59	241,59	390,35	3394,0	2,04	380	18,75	37,1
TPA-178B-Purus-Bir	4	241,59	241,59	390,35	3394,0	2,04	380	18,75	37,3
TPA-241A-Solimoes-Bir	4	-10,86	10,86	109,22	1967,7	0,54	4240	15,07	29,7
TPA-254A-Solimoes-Bir	4	-21,55	21,55	164,94	2202,4	1,28	1860	15,26	8,1
TPA-254B-Solimoes-Bir	4	0,35	0,35	59,47	2180,5	0,71	920	15,43	3,5

A.4 Stations virtuelles définies pour les produits alti-hydrologiques RLH/ENVISAT et RLH/ERS-2

Les stations virtuelles pour les deux produits alti-hydrologiques RLH/ENVISAT et RLH/ERS-2 sont les mêmes (et ont les mêmes paramètres géographiques, morphologiques et hydrologiques), seul le préfixe les noms de leurs stations virtuelles changent selon la mission considérée : « ENVISAT » pour le premier et « ERS-2 » pour le second.

Les stations virtuelles détaillées sont celles d'ENVISAT.

Définition des stations virtuelles des produits alti-hydrologiques RLH/ENVISAT et RLH/ERS-2

Stations virtuelles	Orbite	Traces	Fleuve	Latitude		Longitude		Stations limnimétriques reconstitution			
				min.	max.	min.	max.	1	2	3	4
Envisat-00149_0564A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	149 564	Solimoes	-3,3720	-3,3090	-60,2400	-60,1920	14050000	14100000	15030000	16350002
Envisat-0020A-Amazone	ERS1/2/Envisat	20	Amazon	-3,1520	-3,1190	-59,4720	-59,4490	14100000	15030000	16350002	17050001
Envisat-0020A-Madeira	ERS1/2/Envisat	20	Madeira	-4,3760	-4,3100	-59,7400	-59,7110	15850000	15860000	15900000	15940000
Envisat-0020B-Amazone	ERS1/2/Envisat	20	Amazon	-3,2240	-3,1940	-59,4900	-59,4620	14100000	15030000	16350002	17050001
Envisat-0035A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	35	Solimoes	-2,7160	-2,6690	-66,8300	-66,8080	10100000	11400000	12351000	12900001
Envisat-0063_0478A-Amazone	ERS1/2/Envisat	63 478	Amazon	-3,3680	-3,3030	-58,8020	-58,7600	14100000	15030000	16350002	17050001
Envisat-0078A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	78	Solimoes	-3,4660	-3,4350	-68,8810	-68,8600	10100000	11400000	12351000	
Envisat-0106A-Madeira	ERS1/2/Envisat	106	Madeira	-5,8830	-5,8400	-61,5130	-61,4830	15670000	15700000	15850000	
Envisat-0106A-Negro	ERS1/2/Envisat	106	Negro	-2,7580	-2,5560	-60,8270	-60,7510	14480002	14840000	14990000	15030000
Envisat-0106A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	106	Solimoes	-3,6290	-3,5860	-61,0110	-60,9900	13155000	14050000	14100000	15030000
Envisat-0121_0536A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	121 536	Solimoes	-3,3720	-3,3100	-68,1510	-68,0940	10100000	11400000	12351000	12900001
Envisat-0149A-Madeira	ERS1/2/Envisat	149	Madeira	-4,7210	-4,5950	-59,9480	-59,8940	15850000	15860000	15900000	15940000
Envisat-0149A-Negro	ERS1/2/Envisat	149	Negro	-3,0950	-3,0460	-60,2870	-60,2540	14480002	14840000	14990000	15030000
Envisat-0192A-Madeira	ERS1/2/Envisat	192	Madeira	-8,4810	-8,4350	-63,5220	-63,5010	15320002	15400000	15630000	
Envisat-0192A-Negro	ERS1/2/Envisat	192	Negro	-1,4090	-1,2970	-61,9640	-61,9220	14400000	14480002	14840000	14990000
Envisat-0192A-Purus	ERS1/2/Envisat	192	Purus	-4,8700	-4,8470	-62,7210	-62,7040	13910000	13955000	13962000	13980000
Envisat-0192A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	192	Solimoes	-3,8800	-3,8070	-62,5060	-62,4750	12900001	13150000	13155000	14050000
Envisat-0192B-Madeira	ERS1/2/Envisat	192	Madeira	-8,5780	-8,5570	-63,5430	-63,5280	15320002	15400000	15630000	
Envisat-0192C-Madeira	ERS1/2/Envisat	192	Madeira	-8,6180	-8,5920	-63,5530	-63,5360	15320002	15400000	15630000	
Envisat-0192_0321A-Purus	ERS1/2/Envisat	192 321	Purus	-4,9830	-4,9650	-62,7430	-62,7160	13910000	13955000	13962000	13980000
Envisat-0192_0321B-Purus	ERS1/2/Envisat	192 321	Purus	-4,9410	-4,9160	-62,7400	-62,7200	13910000	13955000	13962000	13980000
Envisat-0207A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	207	Solimoes	-4,0100	-3,9490	-69,4300	-69,3870	10100000	11400000	12351000	
Envisat-0207B-Solimoes	ERS1/2/Envisat	207	Solimoes	-4,1820	-4,0780	-69,4250	-69,3477	10100000	11400000	12351000	
Envisat-0235A-Madeira	ERS1/2/Envisat	235	Madeira	-5,6360	-5,6080	-61,1580	-61,1310	15670000	15700000	15850000	15860000
Envisat-0235A-Negro	ERS1/2/Envisat	235	Negro	-1,3720	-1,1630	-62,1422	-62,0660	14400000	14480002	14840000	14990000
Envisat-0235A-Purus	ERS1/2/Envisat	235	Purus	-4,0190	-3,9900	-61,5120	-61,4900	13962000	13980000	13990000	14050000
Envisat-0235A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	235	Solimoes	-3,7490	-3,7100	-61,5720	-61,5500	13150000	13155000	14050000	14100000
Envisat-0278A-Negro	ERS1/2/Envisat	278	Negro	-0,6550	-0,5990	-63,2320	-63,2060	14400000	14480002	14840000	
Envisat-0278A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	278	Solimoes	-3,8280	-3,8080	-63,9290	-63,9160	12351000	12900001	13150000	13155000
Envisat-0321A-Madeira	ERS1/2/Envisat	321	Madeira	-6,7180	-6,6790	-62,3520	-62,3340	15630000	15670000	15700000	
Envisat-0321A-Negro	ERS1/2/Envisat	321	Negro	-0,3710	-0,2850	-63,7640	-63,7300	14400000	14480002	14840000	
Envisat-0321A-Purus	ERS1/2/Envisat	321	Purus	-4,8710	-4,8320	-62,7630	-62,7400	13910000	13955000	13962000	13980000
Envisat-0321A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	321	Solimoes	-3,9900	-3,9310	-62,9700	-62,9300	12900001	13150000	13155000	14050000
Envisat-0321B-Solimoes	ERS1/2/Envisat	321	Solimoes	-4,0310	-4,0100	-62,9440	-62,9260	12900001	13150000	13155000	14050000
Envisat-0321_0650A-Madeira	ERS1/2/Envisat	321 650	Madeira	-6,5810	-6,5320	-62,3800	-62,3590	15630000	15670000	15700000	
Envisat-0364A-Negro	ERS1/2/Envisat	364	Negro	-0,4850	-0,4211	-64,6340	-64,6040	14330000	14420000	14400000	14480002
Envisat-0364A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	364	Solimoes	-2,9270	-2,8860	-65,1740	-65,1430	11400000	12351000	12900001	13150000
Envisat-0392A-Amazone	ERS1/2/Envisat	392	Amazon	-2,5560	-2,4990	-57,1840	-57,1580	15030000	16350002	17050001	17900000
Envisat-0392B-Amazone	ERS1/2/Envisat	392	Amazon	-2,5980	-2,5840	-57,1890	-57,1800	15030000	16350002	17050001	17900000
Envisat-0392C-Amazone	ERS1/2/Envisat	392	Amazon	-2,6410	-2,6200	-57,1990	-57,1870	15030000	16350002	17050001	17900000
Envisat-0407A-Madeira	ERS1/2/Envisat	407	Madeira	-8,3810	-8,3310	-63,4250	-63,3990	15320002	15400000	15630000	
Envisat-0407A-Negro	ERS1/2/Envisat	407	Negro	-0,5160	-0,4030	-65,1740	-65,1370	14330000	14400000	14480002	
Envisat-0407A-Purus	ERS1/2/Envisat	407	Purus	-5,6340	-5,6020	-64,0310	-64,0060	13870000	13880000	13910000	13955000
Envisat-0407_0822A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	407 822	Solimoes	-3,3780	-3,3080	-64,5480	-64,5030	12351000	12900001	13150000	13155000
Envisat-0435A-Amazone	ERS1/2/Envisat	435	Amazon	-2,6430	-2,5710	-56,7980	-56,7650	16350002			
Envisat-0450A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	450	Solimoes	-2,4100	-2,3810	-66,4910	-66,4750	10100000	11400000	12351000	12900001
Envisat-0493A-Madeira	ERS1/2/Envisat	493	Madeira	-9,2830	-9,2420	-64,6600	-64,6330	15320002	15400000	15630000	
Envisat-0493A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	493	Solimoes	-2,5280	-2,5030	-66,1510	-66,1310	11400000	12351000	12900001	13150000
Envisat-0493B-Solimoes	ERS1/2/Envisat	493	Solimoes	-2,4090	-2,3790	-66,1760	-66,1580	11400000	12351000	12900001	13150000
Envisat-0521A-Amazone	ERS1/2/Envisat	521	Amazon	-3,0050	-2,9050	-58,1650	-58,1160	14100000	15030000	16350002	17050001
Envisat-0536A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	536	Solimoes	-3,1090	-3,0730	-68,0840	-68,0640	10100000	11400000	12351000	12900001
Envisat-0564A-Madeira	ERS1/2/Envisat	564	Madeira	-5,3100	-5,2910	-60,6630	-60,6490	15670000	15700000	15850000	15860000
Envisat-0564A-Negro	ERS1/2/Envisat	564	Negro	-3,1290	-3,0200	-60,1890	-60,1440	14990000			
Envisat-0579A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	579	Solimoes	-2,7660	-2,7430	-67,5320	-67,5170	10100000	11400000	12351000	12900001
Envisat-0607A-Amazone	ERS1/2/Envisat	607	Amazon	-3,2120	-3,0890	-59,5560	-59,5070	14100000	15030000	16350002	17050001
Envisat-0607A-Madeira	ERS1/2/Envisat	607	Madeira	-4,0730	-4,0200	-59,3510	-59,3240	15860000	15900000	15940000	fozmadeira
Envisat-0650A-Madeira	ERS1/2/Envisat	650	Madeira	-6,8050	-6,7650	-62,4320	-62,4120	15630000	15670000	15700000	
Envisat-0650A-Negro	ERS1/2/Envisat	650	Negro	-1,9420	-1,8910	-61,3590	-61,3300	14480002	14840000	14990000	15030000
Envisat-0650A-Purus	ERS1/2/Envisat	650	Purus	-4,3120	-4,2760	-61,8810	-61,8600	13962000	13980000	13990000	
Envisat-0650A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	650	Solimoes	-3,8970	-3,8700	-61,7910	-61,7720	13150000	13155000	14050000	14100000
Envisat-0650B-Purus	ERS1/2/Envisat	650	Purus	-4,3490	-4,3250	-61,8890	-61,8740	13962000	13980000	13990000	
Envisat-0650B-Solimoes	ERS1/2/Envisat	650	Solimoes	-3,9920	-3,9500	-61,8140	-61,7890	13150000	13155000	14050000	14100000
Envisat-0650C-Purus	ERS1/2/Envisat	650	Purus	-4,4190	-4,3590	-61,9060	-61,8790	13955000	13962000	13980000	13990000
Envisat-0665A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	665	Solimoes	-3,4640	-3,4350	-68,8200	-68,7990	10100000	11400000	12351000	
Envisat-0693A-Madeira	ERS1/2/Envisat	693	Madeira	-5,2230	-5,2010	-60,5260	-60,5090	15670000	15700000	15850000	15860000
Envisat-0693A-Negro	ERS1/2/Envisat	693	Negro	-2,1390	-1,9580	-61,2510	-61,1760	14480002	14840000	14990000	15030000
Envisat-0693A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	693	Solimoes	-3,6340	-3,5490	-60,8920	-60,8560	13155000	14050000	14100000	15030000
Envisat-0736A-Madeira	ERS1/2/Envisat	736	Madeira	-9,2210	-9,1720	-64,4080	-64,3850	15320002	15400000	15630000	

Stations virtuelles	Orbite	Traces	Fleuve	Latitude		Longitude		Stations limnimétriques reconstitution			
				min.	max.	min.	max.	1	2	3	4
Envisat-0736A-Negro	ERS1/2/Envisat	736	Negro	-1,1350	-0,9860	-62,6250	-62,5710	14400000	14480002	14840000	14990000
Envisat-0736A-Purus	ERS1/2/Envisat	736	Purus	-5,7680	-5,7460	-63,6420	-63,6230	13880000	13910000	13955000	
Envisat-0736A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	736	Solimoes	-3,9520	-3,9020	-63,2400	-63,2180	12351000	12900001	13150000	13155000
Envisat-0736B-Purus	ERS1/2/Envisat	736	Purus	-5,7410	-5,7210	-63,6360	-63,6180	13880000	13910000	13955000	
Envisat-0736C-Purus	ERS1/2/Envisat	736	Purus	-5,7050	-5,6830	-63,6280	-63,6090	13880000	13910000	13955000	
Envisat-0779A-Madeira	ERS1/2/Envisat	779	Madeira	-6,0960	-6,0690	-61,7730	-61,7510	15630000	15670000	15700000	15850000
Envisat-0779A-Negro	ERS1/2/Envisat	779	Negro	-1,0130	-0,7720	-62,9440	-62,8670	14400000	14480002	14840000	
Envisat-0779A-Purus	ERS1/2/Envisat	779	Purus	-4,6540	-4,6290	-62,0890	-62,0720	13910000	13955000	13962000	13980000
Envisat-0779A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	779	Solimoes	-3,7740	-3,7350	-62,2870	-62,2650	12900001	13150000	13155000	14050000
Envisat-0779B-Solimoes	ERS1/2/Envisat	779	Solimoes	-3,9180	-3,8940	-62,2520	-62,2320	12900001	13150000	13155000	14050000
Envisat-0822A-Negro	ERS1/2/Envisat	822	Negro	-0,3720	-0,2750	-63,8940	-63,8540	14400000	14480002	14840000	
Envisat-0850A-Amazone	ERS1/2/Envisat	850	Amazon	-2,4190	-2,2370	-56,4400	-56,3770	15030000	16350002	17050001	17900000
Envisat-0865A-Madeira	ERS1/2/Envisat	865	Madeira	-7,3020	-7,2580	-62,9470	-62,9220	15400000	15630000	15670000	
Envisat-0865A-Negro	ERS1/2/Envisat	865	Negro	-0,4280	-0,3590	-64,4660	-64,4370	14330000	14420000	14400000	14480002
Envisat-0865A-Purus	ERS1/2/Envisat	865	Purus	-5,5990	-5,5780	-63,3190	-63,3000	13880000	13910000	13955000	
Envisat-0865A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	865	Solimoes	-3,8930	-3,8510	-63,6980	-63,6750	12351000	12900001	13150000	13155000
Envisat-0893A-Amazone	ERS1/2/Envisat	893	Amazon	-2,1900	-2,0920	-56,1870	-56,1450	15030000	16350002	17050001	17900000
Envisat-0908A-Negro	ERS1/2/Envisat	908	Negro	-0,4050	-0,3500	-65,3350	-65,3100	14330000	14400000	14480002	
Envisat-0908A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	908	Solimoes	-2,5720	-2,5310	-65,8130	-65,7890	11400000	12351000	12900001	13150000
Envisat-0936A-Amazone	ERS1/2/Envisat	936	Amazon	-2,8460	-2,7850	-57,9680	-57,9420	14100000	15030000	16350002	17050001
Envisat-0951A-Madeira	ERS1/2/Envisat	951	Madeira	-8,8690	-8,8260	-64,0350	-64,0070	15320002	15400000	15630000	
Envisat-0951A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	951	Solimoes	-2,7830	-2,6350	-65,4150	-65,3520	11400000	12351000	12900001	13150000
Envisat-0951B-Solimoes	ERS1/2/Envisat	951	Solimoes	-2,5240	-2,4830	-65,4370	-65,4110	11400000	12351000	12900001	13150000
Envisat-0979A-Amazone	ERS1/2/Envisat	979	Amazon	-2,4310	-2,3780	-57,5570	-57,5300	15030000	16350002	17050001	17900000
Envisat-0994A-Solimoes	ERS1/2/Envisat	994	Solimoes	-2,6430	-2,5380	-67,2720	-67,2250	10100000	11400000	12351000	12900001

Paramètres géographiques, morphologiques et hydrologiques des stations virtuelles des produits alti-hydrologiques RLH/ENVISAT et RLH/ERS-2

Station virtuelle	Nb SL	dsppa (km)	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\mathcal{W}_R$ (m)	$\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$ (m)	ΔZ_{20km} (m)
Envisat-00149_0564A-Solimoes	4	45,14	45,14	123,58	1587,5	0,38	2200	14,92	15,6
Envisat-0020A-Amazone	4	26,03	26,03	172,55	1485,5	1,03	2310	14,54	2,5
Envisat-0020A-Madeira	4	-15,61	15,61	63,34	1571,1	0,94	3610	14,73	23,0
Envisat-0020B-Amazone	4	26,03	26,03	172,55	1485,5	1,03	1400	14,54	10,8
Envisat-0035A-Solimoes	4	-158,00	158,00	338,78	2599,7	1,08	1700	13,65	12,8
Envisat-0063_0478A-Amazone	4	106,53	106,53	249,27	1405,0	1,03	4620	14,00	5,0
Envisat-0078A-Solimoes	3	-13,14	13,14	116,63	2951,1	0,54	1870	13,61	22,1
Envisat-0106A-Madeira	3	-29,66	29,66	66,94	1885,1	0,67	1210	16,32	25,7
Envisat-0106A-Negro	4	-106,95	106,95	176,37	1665,0	1,27	17460	14,90	36,7
Envisat-0106A-Solimoes	4	32,47	32,47	83,80	1690,1	0,37	3620	15,45	15,4
Envisat-0121_0536A-Solimoes	4	98,65	98,65	308,08	2839,3	1,08	2810	13,46	22,8
Envisat-0149A-Madeira	4	34,37	34,37	71,57	1618,8	0,94	1910	15,16	-
Envisat-0149A-Negro	4	-29,07	29,07	123,22	1587,1	1,27	3120	15,07	51,9
Envisat-0192A-Madeira	3	80,50	80,50	168,10	2379,6	0,48	1310	15,68	28,5
Envisat-0192A-Negro	4	-40,06	40,06	159,47	1879,5	1,51	11150	11,29	27,6
Envisat-0192A-Purus	4	19,77	19,77	119,23	2098,4	1,18	500	17,45	8,6
Envisat-0192A-Solimoes	4	-51,14	51,14	113,90	1889,1	0,59	3540	15,40	15,0
Envisat-0192B-Madeira	3	59,29	59,29	154,70	2400,8	0,48	880	15,74	35,3
Envisat-0192C-Madeira	3	54,45	54,45	150,90	2405,7	0,48	730	15,75	38,9
Envisat-0192_0321A-Purus	4	36,94	36,94	134,43	2081,2	1,18	600	17,45	13,5
Envisat-0192_0321B-Purus	4	29,03	29,03	128,80	2089,2	1,18	510	17,45	14,3
Envisat-0207A-Solimoes	3	-119,28	119,28	212,60	3057,2	0,54	3090	13,62	16,3
Envisat-0207B-Solimoes	3	92,86	92,86	212,13	3095,2	0,54	2560	13,64	12,3
Envisat-0235A-Madeira	4	32,29	32,29	93,76	1823,1	1,05	1780	16,20	23,4
Envisat-0235A-Negro	4	-60,42	60,42	169,36	1899,9	1,51	18170	10,77	10,5
Envisat-0235A-Purus	4	-20,08	20,08	64,08	1798,7	0,58	1440	16,40	3,8
Envisat-0235A-Solimoes	4	-41,60	41,60	93,91	1764,2	0,41	2250	15,95	9,4
Envisat-0278A-Negro	3	-53,00	53,00	138,33	2055,8	0,75	5200	8,79	18,6
Envisat-0278A-Solimoes	4	100,49	100,49	181,59	2080,4	0,54	1430	15,39	37,3
Envisat-0321A-Madeira	3	-131,89	131,89	158,50	2072,6	0,93	1220	17,05	9,0
Envisat-0321A-Negro	3	-122,74	122,74	178,18	2125,6	0,75	7200	8,53	19,4
Envisat-0321A-Purus	4	13,80	13,80	110,22	2104,4	1,18	620	17,45	25,7
Envisat-0321A-Solimoes	4	1,23	1,23	52,54	1955,6	0,59	3010	15,06	17,1
Envisat-0321B-Solimoes	4	-0,77	0,77	46,83	1957,6	0,54	1090	15,06	14,2
Envisat-0321_0650A-Madeira	3	-114,99	114,99	153,13	2055,7	0,93	1240	17,19	11,7
Envisat-0364A-Negro	4	24,20	24,20	97,51	2228,6	0,77	4760	7,20	23,2
Envisat-0364A-Solimoes	4	-75,85	75,85	231,38	2256,7	1,28	1990	14,82	24,3
Envisat-0392A-Amazone	4	-46,24	46,24	190,58	1130,4	1,02	5310	10,95	0,0
Envisat-0392B-Amazone	4	-46,24	46,24	190,58	1130,4	1,02	940	10,95	0,0
Envisat-0392C-Amazone	4	-46,24	46,24	190,58	1130,4	1,02	1520	10,95	0,0
Envisat-0407A-Madeira	3	96,71	96,71	175,38	2363,4	0,48	1260	15,64	24,0
Envisat-0407A-Negro	3	-13,07	13,07	93,96	2299,7	0,51	3030	8,13	28,2
Envisat-0407A-Purus	4	-129,72	129,72	306,64	2529,7	2,24	590	17,44	23,1
Envisat-0407_0822A-Solimoes	4	10,95	10,95	120,46	2169,9	0,54	2480	15,45	21,7
Envisat-0435A-Amazone	1	-0,90	0,90	0,90	1085,0	1,00	5190	10,38	0,0
Envisat-0450A-Solimoes	4	-69,10	69,10	284,99	2510,8	1,08	1790	13,51	11,8
Envisat-0493A-Madeira	3	-103,31	103,31	182,58	2563,4	0,64	1190	15,97	46,7
Envisat-0493A-Solimoes	4	3,25	3,25	119,13	2438,4	1,28	950	13,36	12,3
Envisat-0493B-Solimoes	4	0,00	0,00	0,00	2441,7	1,08	1970	13,34	13,6
Envisat-0521A-Amazone	4	-206,42	206,42	277,81	1290,5	1,03	3600	12,91	28,8
Envisat-0536A-Solimoes	4	128,32	128,32	325,58	2809,6	1,08	830	13,41	12,0
Envisat-0564A-Madeira	4	-38,59	38,59	93,75	1741,9	1,05	960	16,72	28,5
Envisat-0564A-Negro	1	-17,25	17,25	17,25	1575,2	1,00	9580	14,96	28,7
Envisat-0579A-Solimoes	4	218,61	218,61	351,82	2719,3	1,08	1750	13,27	38,9
Envisat-0607A-Amazone	4	17,29	17,29	154,82	1494,2	1,03	6850	14,59	45,3
Envisat-0607A-Madeira	4	-34,00	34,00	70,46	1510,1	1,07	2990	13,56	20,1
Envisat-0650A-Madeira	3	125,41	125,41	161,48	2086,2	0,93	2460	16,92	11,1
Envisat-0650A-Negro	4	86,42	86,42	178,58	1753,0	1,27	4010	13,86	41,1
Envisat-0650A-Purus	3	13,25	13,25	45,67	1859,2	0,57	630	16,54	7,9
Envisat-0650A-Solimoes	4	36,47	36,47	93,21	1801,5	0,41	1370	15,98	4,3

Station virtuelle	Nb SL	dsppa (km)	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\mathcal{W}_R$ (m)	$\mathcal{A}_{Z_{Ris}}$ (m)	ΔZ_{20km} (m)
Envisat-0650B-Purus	3	7,85	7,85	38,39	1864,5	0,57	700	16,55	10,3
Envisat-0650B-Solimoes	4	30,18	30,18	90,51	1807,8	0,41	1920	15,97	4,2
Envisat-0650C-Purus	4	0,93	0,93	35,80	1871,5	0,58	660	16,55	14,4
Envisat-0665A-Solimoes	3	-6,40	6,40	92,22	2944,4	0,54	1820	13,61	13,8
Envisat-0693A-Madeira	4	-19,43	19,43	79,06	1722,7	1,05	1300	16,67	20,5
Envisat-0693A-Negro	4	107,82	107,82	182,85	1731,6	1,27	4920	14,19	25,8
Envisat-0693A-Solimoes	4	-42,53	42,53	85,64	1675,1	0,37	3980	15,37	0,0
Envisat-0736A-Madeira	3	-67,70	67,70	163,20	2527,8	0,64	1660	15,94	42,8
Envisat-0736A-Negro	4	42,85	42,85	161,38	1960,0	1,51	14600	9,21	25,5
Envisat-0736A-Purus	3	-16,54	16,54	128,44	2416,6	2,24	470	17,02	31,7
Envisat-0736A-Solimoes	4	-37,18	37,18	148,42	1994,0	0,54	3200	15,13	15,4
Envisat-0736B-Purus	3	-27,09	27,09	151,90	2427,1	2,24	410	17,04	28,1
Envisat-0736C-Purus	3	-33,63	33,63	163,54	2433,7	2,24	750	17,05	24,6
Envisat-0779A-Madeira	4	0,70	0,70	44,17	1940,0	0,67	1240	17,14	22,5
Envisat-0779A-Negro	3	-4,60	4,60	59,97	2007,5	0,75	11560	8,90	10,4
Envisat-0779A-Purus	4	12,99	12,99	91,32	1935,5	0,56	1220	16,49	1,1
Envisat-0779A-Solimoes	4	-25,42	25,42	101,51	1863,4	0,59	2640	15,63	15,3
Envisat-0779B-Solimoes	4	-20,32	20,32	96,76	1858,3	0,59	1080	15,68	7,3
Envisat-0822A-Negro	3	-136,99	136,99	182,13	2139,8	0,75	7680	8,51	22,5
Envisat-0850A-Amazone	4	64,35	64,35	168,08	1019,8	0,50	7910	9,63	32,5
Envisat-0865A-Madeira	3	27,91	27,91	123,30	2183,7	0,93	1800	15,71	18,8
Envisat-0865A-Negro	4	44,20	44,20	121,30	2208,6	0,77	4080	7,00	30,2
Envisat-0865A-Purus	3	50,35	50,35	179,50	2349,7	1,80	580	16,99	13,3
Envisat-0865A-Solimoes	4	-96,14	96,14	179,04	2053,0	0,54	2950	15,33	6,7
Envisat-0893A-Amazone	4	-18,20	18,20	122,44	927,0	0,50	6260	8,71	0,0
Envisat-0908A-Negro	3	-35,32	35,32	129,25	2322,0	0,51	3640	8,26	27,5
Envisat-0908A-Solimoes	4	33,65	33,65	206,77	2408,1	1,28	2070	13,57	8,3
Envisat-0936A-Amazone	4	-178,98	178,98	276,21	1263,1	1,03	4470	12,60	3,2
Envisat-0951A-Madeira	3	-21,70	21,70	113,45	2481,8	0,64	1320	15,89	38,7
Envisat-0951A-Solimoes	4	-122,10	122,10	247,02	2302,9	1,28	2550	14,41	11,4
Envisat-0951B-Solimoes	4	89,14	89,14	244,02	2352,6	1,28	2370	13,99	7,9
Envisat-0979A-Amazone	4	-110,45	110,45	251,83	1194,6	1,02	3530	11,70	65,4
Envisat-0994A-Solimoes	4	-235,65	235,65	353,26	2677,3	1,08	3290	13,44	9,6

A.5 Stations virtuelles définies dans le cadre de la thèse

Définition des stations virtuelles définies dans le cadre de la thèse

Stations virtuelles	Orbite	Traces	Fleuve	Lat. min.	Lat. max.	Lon. min.	Lon. max.	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
TP-013A-Javari	TPa/J1	13	Javari	-4,5072	-4,4810	-71,7741	-71,7465	fozjavari	10500000	10200000	
TP-026A-Javari	TPa/J1	26	Javari	-5,0327	-5,0109	-72,6216	-72,5954	fozjavari	10500000	10200000	
TP-026A-Jurua	TPa/J1	26	Jurua	-7,1898	-7,1659	-71,8409	-71,8148	12700000	12550000	12520000	
TP-063A-Guapore	TPa/J1	63	Guapore	-12,6225	-12,6050	-63,4172	-63,4044	15200000	15150000	15130000	15120001
TP-063A-Madeira	TPa/J1	63	Madeira	-5,3143	-5,2958	-60,7252	-60,7027	15860000	15850000	15700000	15630000
TP-063A-Negro	TPa/J1	63	Negro	-3,2138	-3,1180	-59,9853	-59,9178	foznegro	14990000		
TP-063A-Solimoes	TPa/J1	63	Solimoes	-3,2483	-3,2141	-59,9828	-59,9543	16350002	15030000	14100000	14050000
TP-063B-Madeira	TPa/J1	63	Madeira	-5,4173	-5,3780	-60,7625	-60,7321	15860000	15850000	15700000	15630000
TP-063B-Solimoes	TPa/J1	63	Solimoes	-3,2970	-3,2645	-60,0013	-59,9729	16350002	15030000	14100000	14050000
TP-063C-Madeira	TPa/J1	63	Madeira	-5,4919	-5,4653	-60,7891	-60,7635	15860000	15850000	15700000	15630000
TP-076A-Madeira	TPa/J1	76	Madeira	-5,5870	-5,5706	-61,0833	-61,0547	15860000	15850000	15700000	15630000
TP-076A-Negro	TPa/J1	76	Negro	-1,1255	-0,8752	-62,7588	-62,6520	14990000	14840000	14480002	14420000
TP-076A-Purus	TPa/J1	76	Purus	-4,1533	-4,1223	-61,6037	-61,5707	fozpurus	13990000	13980000	13962000
TP-076A-Solimoes	TPa/J1	76	Solimoes	-3,8731	-3,8475	-61,7011	-61,6744	14100000	14050000	13155000	13150000
TP-089A-Ica	TPa/J1	89	Ica	-2,9036	-2,8907	-68,3642	-68,3427	fozica	11450000	11444900	
TP-089A-Japura	TPa/J1	89	Japura	-1,6582	-1,6332	-67,9204	-67,8927	fozjapura	12872000	12850000	12845000
TP-089A-Solimoes	TPa/J1	89	Solimoes	-3,4090	-3,3927	-68,5446	-68,5219	12351000	11500000	11400000	10100000
TP-089A-Tarauca	TPa/J1	89	Tarauca	-6,8232	-6,7868	-69,7760	-69,7456	foztarauca	12680000	12650000	12640000
TP-089B-Jurua	TPa/J1	89	Jurua	-6,5690	-6,5255	-69,6834	-69,6495	12840000	12700000	12550000	12520000
TP-089B-Tarauca	TPa/J1	89	Tarauca	-6,8760	-6,8336	-69,7952	-69,7629	foztarauca	12680000	12650000	12640000
TP-089C-Negro	TPa/J1	89	Negro	0,8856	0,9111	-67,0089	-66,9877	14110000			
TP-089C-Tarauca	TPa/J1	89	Tarauca	-7,3525	-7,3061	-69,9687	-69,9344	foztarauca	12680000	12650000	12640000
TP-089D-Negro	TPa/J1	89	Negro	1,2484	1,2722	-66,8794	-66,8619	14110000			
TP-089F-Tarauca	TPa/J1	89	Tarauca	-7,6344	-7,6011	-70,0714	-70,0416	foztarauca	12680000	12650000	12640000
TP-089G-Tarauca	TPa/J1	89	Tarauca	-7,9127	-7,8940	-70,1736	-70,1467	foztarauca	12680000	12650000	12640000
TP-089I-Tarauca	TPa/J1	89	Tarauca	-7,9574	-7,9292	-70,1899	-70,1606	foztarauca	12680000	12650000	12640000
TP-102A-Jurua	TPa/J1	102	Jurua	-6,6052	-6,5888	-69,2171	-69,1896	12840000	12700000	12550000	12520000
TP-102A-Purus	TPa/J1	102	Purus	-9,0981	-9,0817	-68,3030	-68,2848	13750000	13700000	13410000	13180000
TP-102A-Solimoes	TPa/J1	102	Solimoes	-4,3799	-4,3550	-70,0238	-69,9938	10500000	10100000	11400000	11500000
TP-102B-Solimoes	TPa/J1	102	Solimoes	-4,0705	-3,9953	-70,1552	-70,1047	12351000	11500000	11400000	10100000
TP-139A-Amazone	TPa/J1	139	Amazon	-2,5917	-2,5529	-56,9141	-56,8838	17900000	17050001	16350002	15030000
TP-139_254A-Guapore	TPa/J1	139	Guapore	-13,5555	-13,5367	-60,9676	-60,9190	15150000	15130000	15120001	15050000
TP-152A-Amazone	TPa/J1	152	Amazon	-3,2707	-3,2337	-59,0828	-59,0563	14100000	15030000	16350002	17050001
TP-152A-Branco	TPa/J1	152	Branco	2,1425	2,1659	-61,0132	-60,9847	14620000			
TP-152A-Madeira	TPa/J1	152	Madeira	-3,6140	-3,5629	-58,9614	-58,9329	fozmadeira	15940000	15900000	15860000
TP-152B-Branco	TPa/J1	152	Branco	3,3426	3,3589	-61,4392	-61,4150	14495000			
TP-165A-Japura	TPa/J1	165	Japura	-2,0739	-2,0273	-65,2269	-65,2030	fozjapura	12872000	12850000	12845000
TP-165A-Negro	TPa/J1	165	Negro	-0,4833	-0,4276	-64,6695	-64,6257	14840000	14480002	14420000	14400000
TP-165A-Purus	TPa/J1	165	Purus	-8,8465	-8,8264	-67,6812	-67,6551	13750000	13700000	13410000	13180000
TP-165A-Solimoes	TPa/J1	165	Solimoes	-2,4745	-2,4465	-65,3768	-65,3472	13150000	12900001	12351000	11500000
TP-165B-Solimoes	TPa/J1	165	Solimoes	-2,5030	-2,4776	-65,3858	-65,3598	13150000	12900001	12351000	11500000
TP-165C-Solimoes	TPa/J1	165	Solimoes	-2,5498	-2,5083	-65,4042	-65,3691	13150000	12900001	12351000	11500000
TP-178A-Guapore	TPa/J1	178	Guapore	-12,4733	-12,4536	-64,2099	-64,1829	15200000	15150000	15130000	15120001
TP-178A-Japura	TPa/J1	178	Japura	-1,6556	-1,6247	-68,1666	-68,1346	fozjapura	12872000	12850000	12845000
TP-178A-Jurua	TPa/J1	178	Jurua	-5,0840	-5,0676	-66,9426	-66,8943	12842000	12840000	12700000	12550000
TP-178A-Jutai	TPa/J1	178	Jutai	-3,4383	-3,4219	-67,5232	-67,4969	fozjutai	12240000	12200000	12150000
TP-178A-Madeira	TPa/J1	178	Madeira	-9,5253	-9,5066	-65,3133	-65,2872	15320002			
TP-178A-Purus	TPa/J1	178	Purus	-7,6850	-7,6686	-66,0001	-65,9515	13880000	13870000	13750000	13700000
TP-178A-Solimoes	TPa/J1	178	Solimoes	-2,8648	-2,8205	-67,7387	-67,7000	12900001	12351000	11500000	11400000
TP-178A-Uaupes	TPa/J1	178	Uaupes	0,4117	0,4281	-68,9015	-68,8699	14260000	14280001	14330000	
TP-178C-Jutai	TPa/J1	178	Jutai	-3,4682	-3,4518	-67,5115	-67,4892	fozjutai	12240000	12200000	12150000
TP-178D-Jutai	TPa/J1	178	Jutai	-3,5086	-3,4717	-67,5055	-67,4688	fozjutai	12240000	12200000	12150000
TP-178F-Jutai	TPa/J1	178	Jutai	-3,5554	-3,5328	-67,4831	-67,4550	fozjutai	12240000	12200000	12150000
TP-228A-Amazone	TPa/J1	228	Amazon	-2,5120	-2,4576	-56,5296	-56,4884	17900000	17050001	16350002	15030000
TP-241A-Branco	TPa/J1	241	Branco	2,8291	2,8552	-60,6496	-60,6202	14620000			
TP-241A-Madeira	TPa/J1	241	Madeira	-10,1362	-10,0887	-65,3240	-65,2860	15320002			
TP-241A-Negro	TPa/J1	241	Negro	-1,3619	-1,1741	-62,1422	-62,0517	14990000	14840000	14480002	14420000
TP-241A-Solimoes	TPa/J1	241	Solimoes	-4,0619	-4,0427	-63,1100	-63,0847	13155000	13150000	12900001	12351000
TP-241B-Branco	TPa/J1	241	Branco	3,1307	3,1671	-60,5358	-60,5073	14620000			
TP-241B-Madeira	TPa/J1	241	Madeira	-10,4207	-10,4015	-65,4308	-65,4029	15320002			
TP-241B-Purus	TPa/J1	241	Purus	-5,7171	-5,7008	-63,7051	-63,6799	13955000	13910000	13880000	13870000
TP-241C-Branco	TPa/J1	241	Branco	-0,4888	-0,4236	-61,8348	-61,7910	fozbranco	14790000	14710000	
TP-241C-Purus	TPa/J1	241	Purus	-5,6827	-5,6664	-63,6932	-63,6659	13955000	13910000	13880000	13870000
TP-241C-Solimoes	TPa/J1	241	Solimoes	-4,0887	-4,0703	-63,1192	-63,0954	13155000	13150000	12900001	12351000
TP-241D-Purus	TPa/J1	241	Purus	-5,6248	-5,6055	-63,6719	-63,6455	13955000	13910000	13880000	13870000
TP-254A-Madeira	TPa/J1	254	Madeira	-8,1540	-8,1293	-62,9869	-62,9607	15700000	15670000	15630000	15400000
TP-254A-Purus	TPa/J1	254	Purus	-5,6564	-5,6364	-63,8915	-63,8699	13955000	13910000	13880000	13870000
TP-254A-Solimoes	TPa/J1	254	Solimoes	-3,3492	-3,3285	-64,7220	-64,6974	13150000	12900001	12351000	11500000
TP-254B-Japura	TPa/J1	254	Japura	-2,9228	-2,8696	-64,8885	-64,8468	fozjapura	12872000	12850000	12845000
TP-254B-Purus	TPa/J1	254	Purus	-5,6029	-5,5797	-63,9130	-63,8887	13955000	13910000	13880000	13870000
TP-254B-Solimoes	TPa/J1	254	Solimoes	-3,2723	-3,2378	-64,7568	-64,7267	13150000	12900001	12351000	11500000
TP-254C-Japura	TPa/J1	254	Japura	-2,8611	-2,8191	-64,9058	-64,8720	fozjapura	12872000	12850000	12845000
TP-254C-Solimoes	TPa/J1	254	Solimoes	-3,2060	-3,1169	-64,7954	-64,7440	13150000	12900001	12351000	11500000
TP-254D-Japura	TPa/J1	254	Japura	-2,7258	-2,7061	-64,9441	-64,9212	fozjapura	12872000	12850000	12845000
TP-254E-Japura	TPa/J1	254	Japura	-2,6133	-2,5472	-65,0044	-64,9586	fozjapura	12872000	12850000	12845000
TP-254F-Japura	TPa/J1	254	Japura	-2,2199	-2,1996	-65,1257	-65,1019	fozjapura	12872000	12850000	12845000
TP-254G-Japura	TPa/J1	254	Japura	-2,1564	-2,1348	-65,1554	-65,1234	fozjapura	12872000	12850000	12845000

Paramètres géographiques, morphologiques et hydrologiques des stations virtuelles définies dans le cadre de la thèse

Station virtuelle	Nb SL	dsppa (km)	dspp (km)	mgd (km)	acurv (km)	etdn (m)	$\mathcal{W}_R$ (m)	$\mathcal{A}_{Z_{RiS}}$ (m)	ΔZ_{20km} (m)
TP-013A-Javari	3	-220,21	220,21	327,23	3657,7	1,97	180	14,62	39,3
TP-026A-Javari	3	64,91	64,91	286,60	3922,9	1,97	150	13,12	52,9
TP-026A-Jurua	3	-38,82	38,82	293,66	4678,6	1,66	140	11,42	40,0
TP-063A-Guapore	4	94,71	94,71	260,32	3375,4	1,61	560	6,41	15,5
TP-063A-Madeira	4	-51,10	51,10	124,31	1754,4	1,08	950	16,87	11,7
TP-063A-Negro	2	-6,19	6,19	8,73	1545,7	0,19	3970	14,83	-
TP-063A-Solimoes	4	-49,73	49,73	128,57	1561,2	0,38	1670	14,83	-
TP-063B-Madeira	4	-61,40	61,40	129,07	1764,7	1,08	1790	16,85	13,6
TP-063B-Solimoes	4	-52,98	52,98	128,67	1564,5	0,38	2840	14,85	-
TP-063C-Madeira	4	-75,70	75,70	133,20	1779,0	1,08	1330	16,78	19,5
TP-076A-Madeira	4	39,50	39,50	130,08	1815,9	1,08	1140	16,48	27,8
TP-076A-Negro	4	30,01	30,01	146,83	1972,8	1,51	16700	9,09	14,9
TP-076A-Purus	4	-38,68	38,68	65,22	1817,3	0,57	760	16,53	6,2
TP-076A-Solimoes	4	51,83	51,83	96,38	1786,1	0,41	2350	15,98	11,0
TP-089A-Ica	3	-72,25	72,25	165,99	2867,3	2,14	620	6,78	11,6
TP-089A-Japura	4	-161,07	161,07	265,36	2712,9	0,79	2200	11,48	31,7
TP-089A-Solimoes	4	45,79	45,79	159,18	2892,2	0,63	1080	13,89	55,0
TP-089A-Tarauca	4	-36,22	36,22	187,69	4092,1	2,46	120	14,48	39,1
TP-089B-Jurua	4	72,69	72,69	370,40	4007,1	1,00	330	15,52	16,5
TP-089B-Tarauca	4	-39,26	39,26	190,01	4095,2	2,46	120	14,52	47,2
TP-089C-Negro	1	62,37	62,37	62,37	2729,6	1,00	1140	10,17	22,7
TP-089C-Tarauca	4	48,70	48,70	168,00	4215,9	2,46	250	13,33	33,1
TP-089D-Negro	1	-4,81	4,81	4,81	2796,8	1,00	1500	10,17	29,5
TP-089F-Tarauca	4	-53,30	53,30	159,01	4317,9	1,75	110	11,77	45,0
TP-089G-Tarauca	4	77,76	77,76	165,66	4394,1	1,75	80	11,48	38,9
TP-089I-Tarauca	4	56,40	56,40	157,23	4415,5	1,75	120	11,27	43,2
TP-102A-Jurua	4	190,99	190,99	438,60	3888,8	1,00	250	15,98	30,5
TP-102A-Purus	4	74,36	74,36	218,97	4127,6	1,37	230	17,04	82,0
TP-102A-Solimoes	4	12,41	12,41	131,64	3175,7	0,55	2330	13,69	12,1
TP-102B-Solimoes	4	-31,21	31,21	233,09	3219,3	0,55	1640	14,41	24,8
TP-139A-Amazone	4	-22,77	22,77	154,77	1106,9	1,02	3760	10,66	0,0
TP-139_254A-Guapore	4	-22,84	22,84	174,65	3815,2	0,48	170	4,59	28,4
TP-152A-Amazone	4	72,88	72,88	227,01	1438,6	1,03	3410	14,25	18,7
TP-152A-Branco	1	89,29	89,29	89,29	2315,3	1,00	1090	8,76	74,5
TP-152A-Madeira	4	-33,88	33,88	79,65	1432,4	1,13	3670	13,02	3,9
TP-152B-Branco	1	-54,24	54,24	54,24	2590,2	1,00	230	5,55	51,3
TP-165A-Japura	4	59,60	59,60	177,71	2365,4	1,57	2620	12,41	4,9
TP-165A-Negro	4	20,64	20,64	100,33	2232,1	0,77	4560	7,35	22,4
TP-165A-Purus	4	-80,58	80,58	225,32	3989,7	1,37	140	17,59	34,2
TP-165A-Solimoes	4	97,27	97,27	228,57	2344,4	1,28	1530	13,99	8,5
TP-165B-Solimoes	4	97,27	97,27	228,57	2344,4	1,28	2120	13,99	11,5
TP-165C-Solimoes	4	97,27	97,27	228,57	2344,4	1,28	1170	13,99	16,3
TP-178A-Guapore	4	-32,80	32,80	240,64	3252,3	1,61	420	9,30	31,6
TP-178A-Japura	4	181,84	181,84	276,61	2741,4	0,79	2330	11,65	47,9
TP-178A-Jurua	4	-65,80	65,80	339,38	3093,7	1,56	210	15,06	23,2
TP-178A-Jutai	4	-12,19	12,19	123,32	2756,1	0,86	410	6,73	26,9
TP-178A-Madeira	1	32,05	32,05	32,05	2698,8	1,00	1060	16,72	80,9
TP-178A-Purus	4	241,59	241,59	390,35	3394,0	2,04	320	18,75	41,1
TP-178A-Solimoes	4	37,98	37,98	188,14	2749,0	0,76	2170	14,46	55,6
TP-178A-Uaupes	3	56,89	56,89	113,13	2844,5	0,50	920	7,80	38,2
TP-178C-Jutai	4	-29,76	29,76	153,65	2773,7	0,86	740	6,48	23,8
TP-178D-Jutai	4	-34,92	34,92	159,63	2778,9	0,86	560	6,41	21,0
TP-178F-Jutai	4	-57,77	57,77	178,73	2801,7	0,86	430	6,28	18,0
TP-228A-Amazone	4	25,64	25,64	146,65	1058,5	0,50	6510	10,06	0,0
TP-241A-Branco	1	-2,51	2,51	2,51	2407,1	1,00	1060	8,76	14,4
TP-241A-Madeira	1	-54,01	54,01	54,01	2784,9	1,00	1030	16,72	55,5
TP-241A-Negro	4	-60,27	60,27	165,48	1899,7	1,51	17610	10,79	26,3
TP-241A-Solimoes	4	-10,90	10,90	109,33	1967,7	0,54	1210	15,07	24,9
TP-241B-Branco	1	-46,07	46,07	46,07	2450,6	1,00	660	8,76	22,5
TP-241B-Madeira	1	-91,64	91,64	91,64	2822,5	1,00	870	16,72	53,0
TP-241B-Purus	4	-42,94	42,94	242,02	2443,0	2,24	510	17,13	16,8
TP-241C-Branco	3	109,37	109,37	153,99	1985,4	1,80	1610	11,53	15,9
TP-241C-Purus	4	-51,94	51,94	253,18	2452,0	2,24	440	17,16	14,5
TP-241C-Solimoes	4	-10,90	10,90	109,33	1967,7	0,54	1280	15,07	28,2
TP-241D-Purus	4	-63,71	63,71	265,41	2463,7	2,24	660	17,20	12,7
TP-254A-Madeira	4	-86,20	86,20	216,82	2297,8	0,46	1190	15,23	19,5
TP-254A-Purus	4	-96,08	96,08	290,08	2496,1	2,24	550	17,32	19,0
TP-254A-Solimoes	4	0,31	0,31	57,71	2180,5	0,71	920	15,43	3,4
TP-254B-Japura	4	-35,08	35,08	193,04	2239,5	1,57	2030	14,83	9,7
TP-254B-Purus	4	-112,29	112,29	298,98	2512,3	2,24	430	17,38	27,1
TP-254B-Solimoes	4	-13,21	13,21	146,45	2194,1	1,28	1340	15,33	6,3
TP-254C-Japura	4	-45,75	45,75	200,71	2250,2	1,57	1370	14,68	10,4
TP-254C-Solimoes	4	-21,57	21,57	164,98	2202,4	1,28	1860	15,26	8,6
TP-254D-Japura	4	-63,98	63,98	207,63	2268,4	1,57	1440	14,38	11,0
TP-254E-Japura	4	-86,54	86,54	209,11	2291,0	1,57	1720	13,94	20,7
TP-254F-Japura	4	90,40	90,40	196,93	2334,6	1,57	1070	13,05	19,2
TP-254G-Japura	4	76,30	76,30	189,30	2348,7	1,57	1790	12,78	26,6

Annexe B

Tables et figures de tous les produits alti-hydrologiques

Sommaire

B.1	Produits alti-hydrologiques « prêts à l'emploi »	286
B.2	Produits alti-hydrologiques générés dans le cadre de la thèse	290

B.1 Figures et tables des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques « prêts à l'emploi »

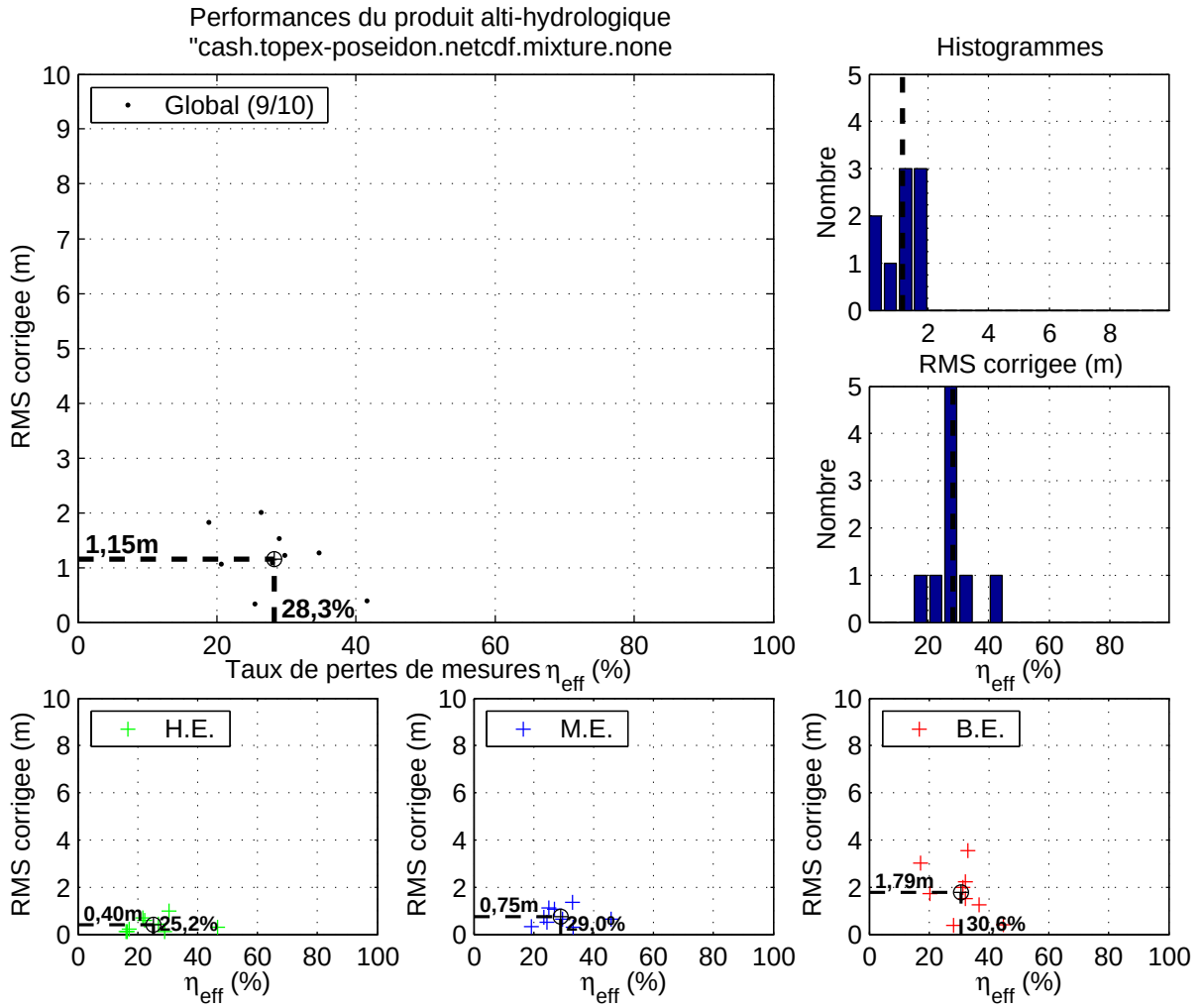


FIG. B.1: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique CASH (Topex/Poseidon).

Indicateurs de qualité moyens aux 9 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CASH/netcdf/mixture/none »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\hat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\hat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\mu}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,15	1,06	0,40	13,9	28,3	1,19	1,10	1,11	0,28
Hautes eaux	0,40	0,40	0,00	13,5	25,2	0,42	0,43	0,71	0,12
Moyennes eaux	0,75	0,70	0,05	14,1	29,0	0,79	0,75	0,76	0,28
Basses eaux	1,79	1,24	1,19	14,5	30,6	1,81	1,27	1,90	0,28

$\bar{\eta}_d = 87,6\%$; $\bar{\mathcal{I}}_H = 96,9\%$; $\bar{N}_{CA} = 8,0$; $\bar{M}_a = 230,2$ ($\bar{\eta}_a = 92,0\%$)

TAB. B.1: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cash.topex-poseidon.netcdf-mixture ».

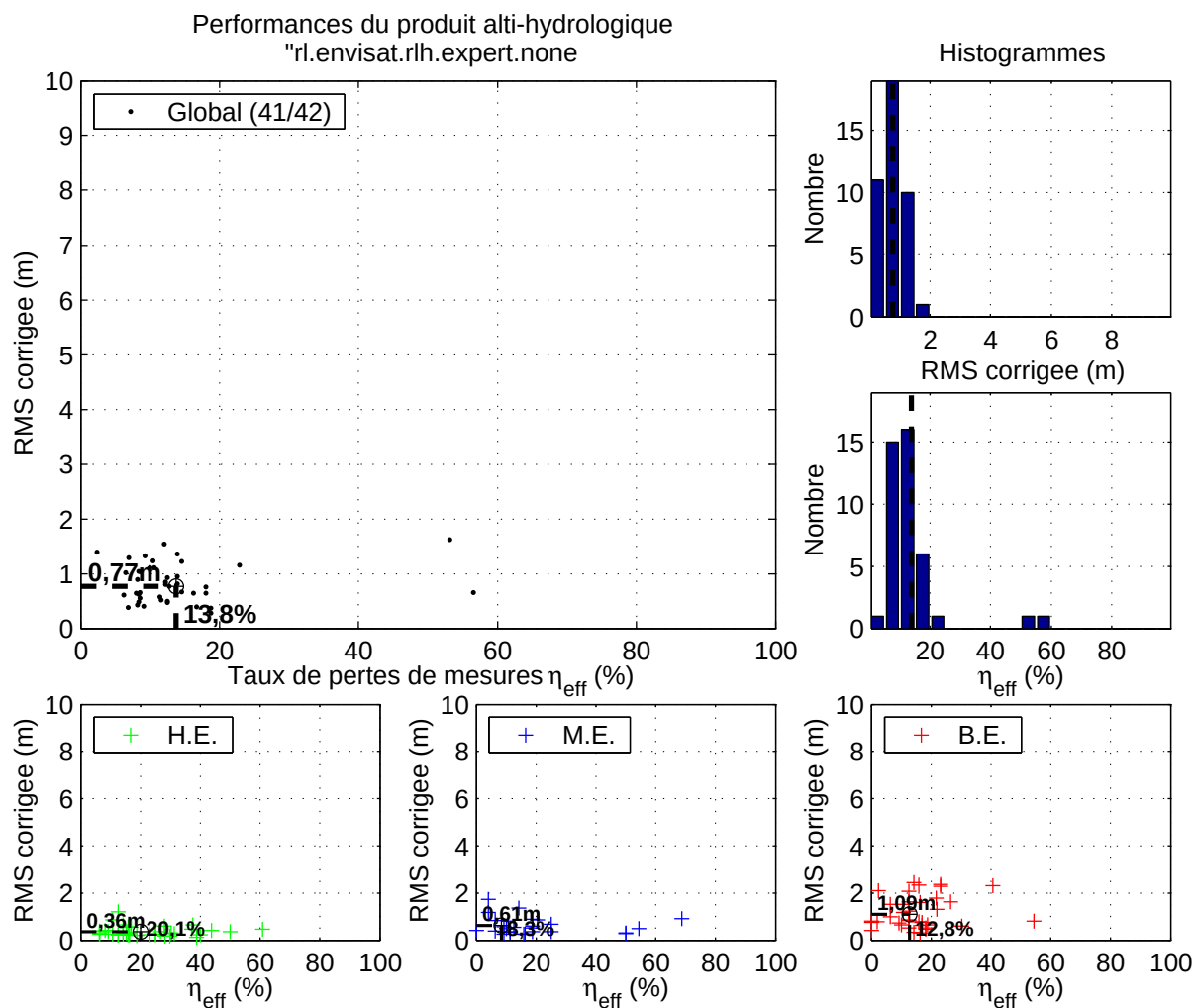


FIG. B.2: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ENVISAT.

Indicateurs de qualité moyens aux 41 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « River and Lake/rlh/expert/none »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	0,77	0,71	0,15	41,6	13,8	0,82	0,77	1,04	0,31
Hautes eaux	0,36	0,36	-0,00	45,6	20,1	0,38	0,39	0,90	0,13
Moyennes eaux	0,61	0,52	0,07	41,3	8,3	0,64	0,58	0,96	0,30
Basses eaux	1,09	0,87	0,39	41,2	12,8	1,12	0,93	1,29	0,38
$\overline{\eta_d} = 89,3\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 94,7\% ; \tilde{N}_{CA} = 3,6 ; \overline{M_a} = 43,5 (\overline{\eta_a} = 93,6\%)$									

TAB. B.2: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « rl.envisat.rlh.expert ».

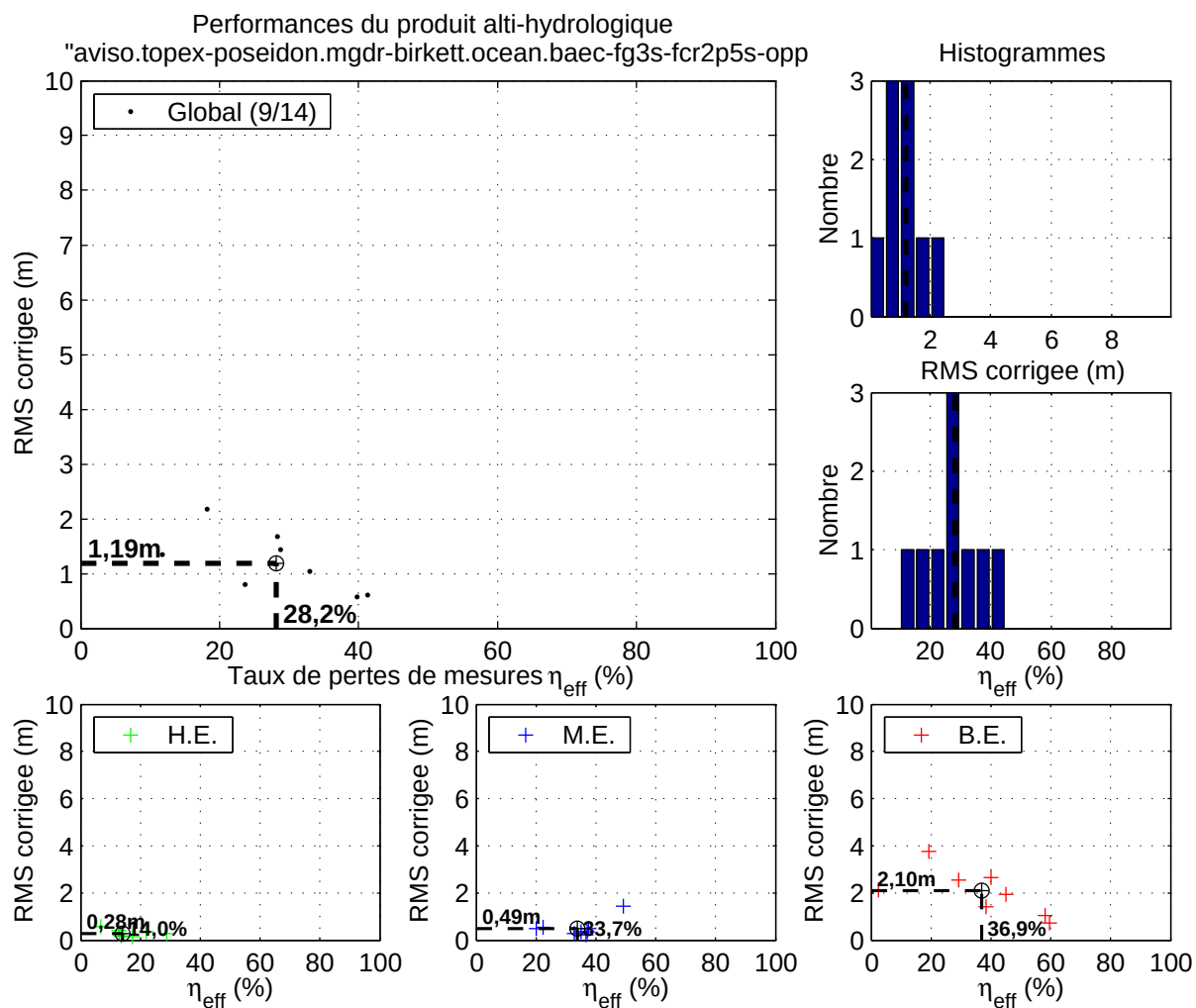


FIG. B.4: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique [~Birkett 2002].

Indicateurs de qualité moyens aux 9 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr-birkett/ocean/baec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$R\hat{M}S_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,19	1,12	0,39	14,0	28,2	1,23	1,17	0,39	0,30
Hautes eaux	0,28	0,28	-0,00	11,6	14,0	0,31	0,31	-0,00	0,13
Moyennes eaux	0,49	0,47	-0,04	15,2	33,7	0,54	0,52	-0,04	0,31
Basses eaux	2,10	1,59	1,33	16,9	36,9	2,12	1,63	1,32	0,32

$\overline{\eta_d} = 81,5\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 96,6\%$; $\tilde{N}_{CA} = 7,0$; $\overline{M_a} = 213,8$ ($\overline{\eta_a} = 82,3\%$)

TAB. B.4: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique [~Birkett 2002].

B.2 Figures et tables des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques générés dans le cadre de la thèse

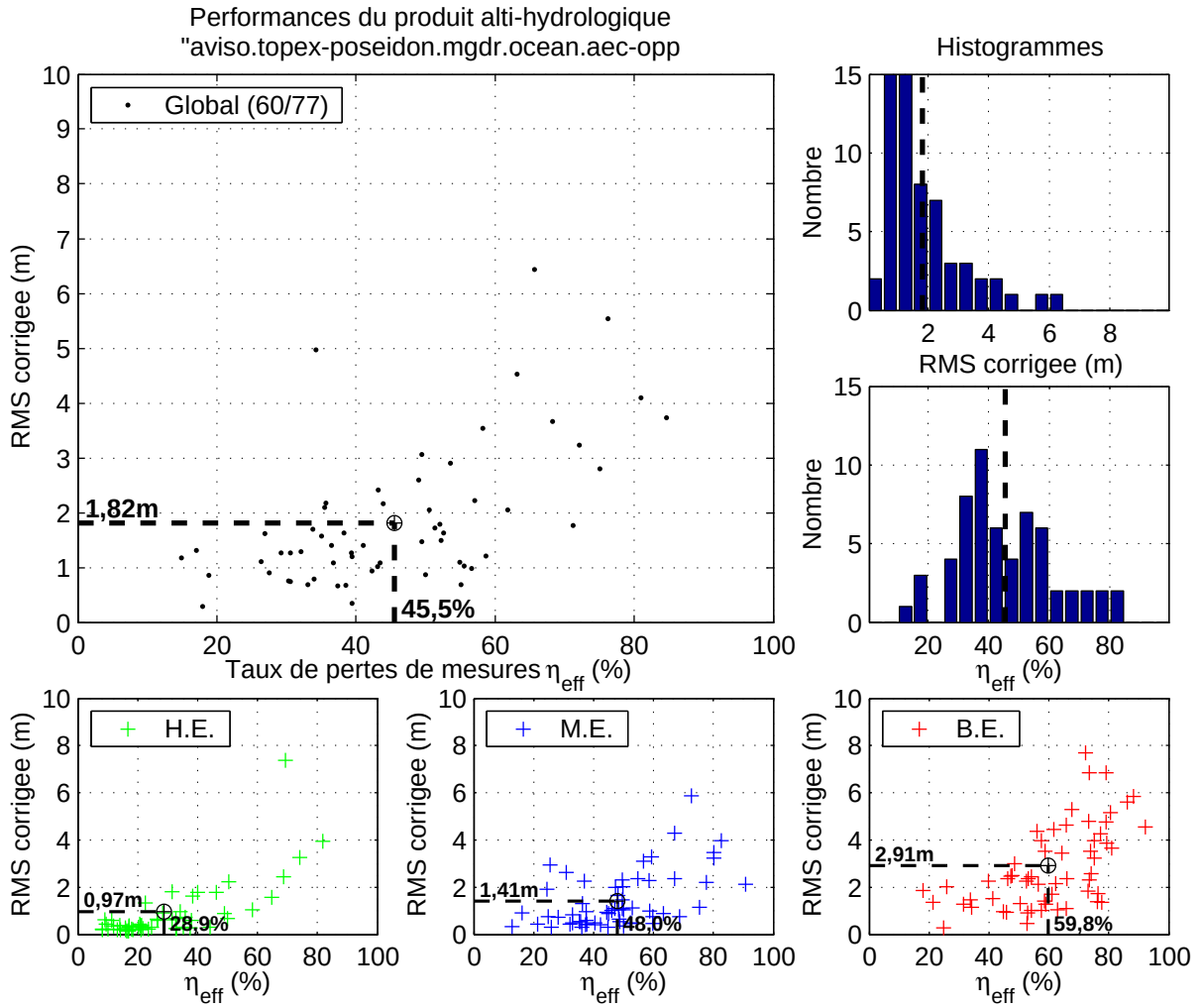


FIG. B.5: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 60 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	RMS_{ε} (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,82	1,74	0,41	20,7	45,5	1,87	1,80	0,08	0,37
Hautes eaux	0,97	0,97	-0,00	15,8	28,9	1,00	1,01	-0,33	0,21
Moyennes eaux	1,41	1,30	0,31	22,9	48,0	1,46	1,36	-0,03	0,38
Basses eaux	2,91	2,32	1,39	31,0	59,8	2,91	2,36	1,06	0,38

$\bar{\eta}_d = 77,8\%$; $\bar{\mathcal{I}}_H = 95,4\%$; $\bar{N}_{CA} = 6,7$; $\bar{M}_a = 158,8$ ($\bar{\eta}_a = 79,3\%$)

TAB. B.5: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp ».

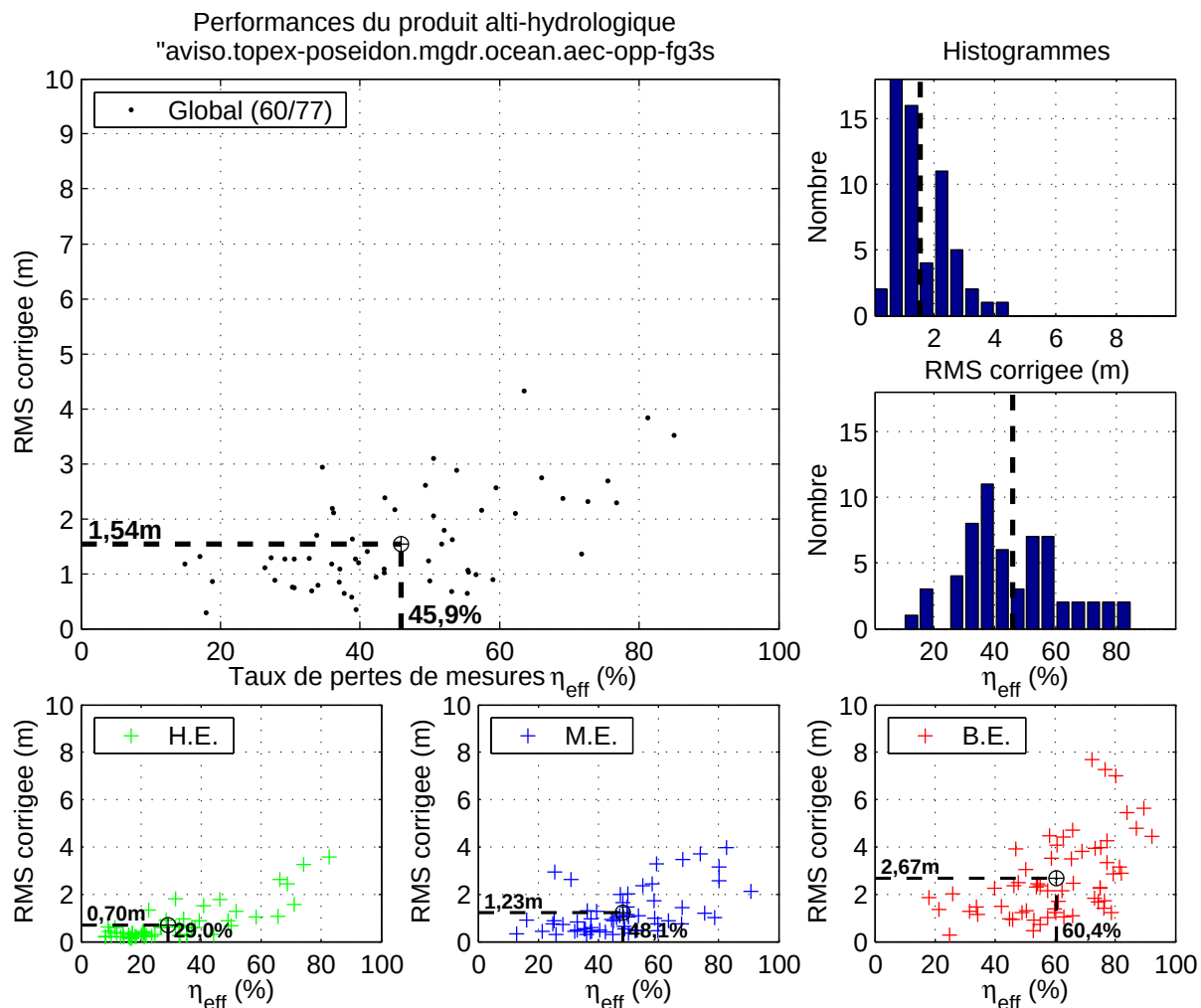


FIG. B.6: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fg3s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 60 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-opp-fg3s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$R\hat{M}S_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,54	1,46	0,40	20,9	45,9	1,59	1,52	0,10	0,37
Hautes eaux	0,70	0,70	-0,00	15,9	29,0	0,73	0,74	-0,30	0,21
Moyennes eaux	1,23	1,14	0,24	23,0	48,1	1,28	1,21	-0,06	0,38
Basses eaux	2,67	2,00	1,50	32,1	60,4	2,69	2,05	1,20	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,4\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,7 ; \overline{M_a} = 157,8 (\overline{\eta_a} = 79,3\%)$									

TAB. B.6: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fg3s ».

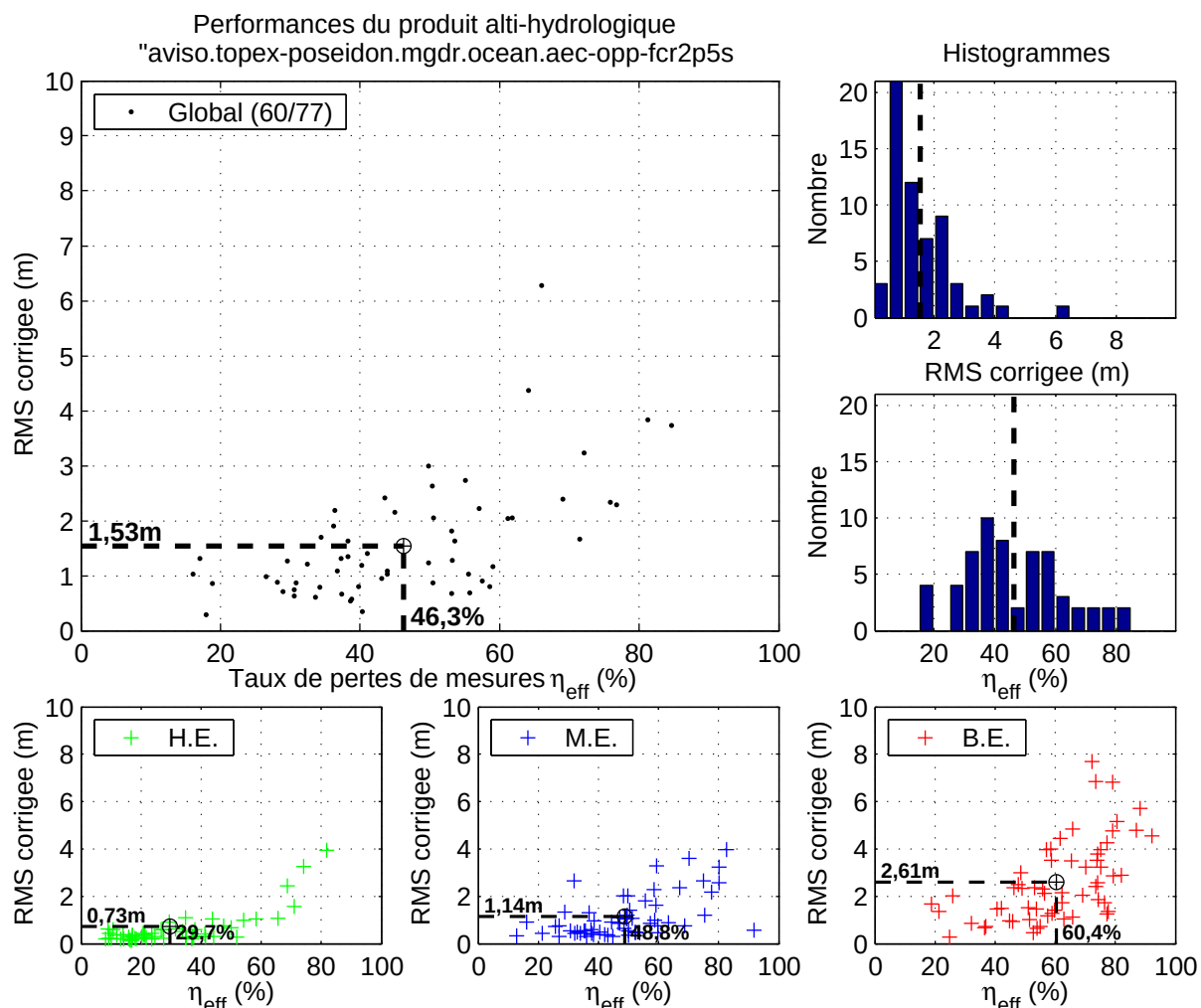


FIG. B.8: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fcr2p5s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 60 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-opp-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$R\hat{M}S_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,53	1,46	0,39	21,0	46,3	1,59	1,51	0,05	0,37
Hautes eaux	0,73	0,74	-0,00	16,0	29,7	0,76	0,77	-0,34	0,21
Moyennes eaux	1,14	1,04	0,26	23,5	48,8	1,19	1,10	-0,08	0,38
Basses eaux	2,61	2,00	1,37	31,5	60,4	2,62	2,05	1,03	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,4\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,7 ; \overline{M}_a = 156,6 (\overline{\eta_a} = 79,3\%)$									

TAB. B.8: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fcr2p5s ».

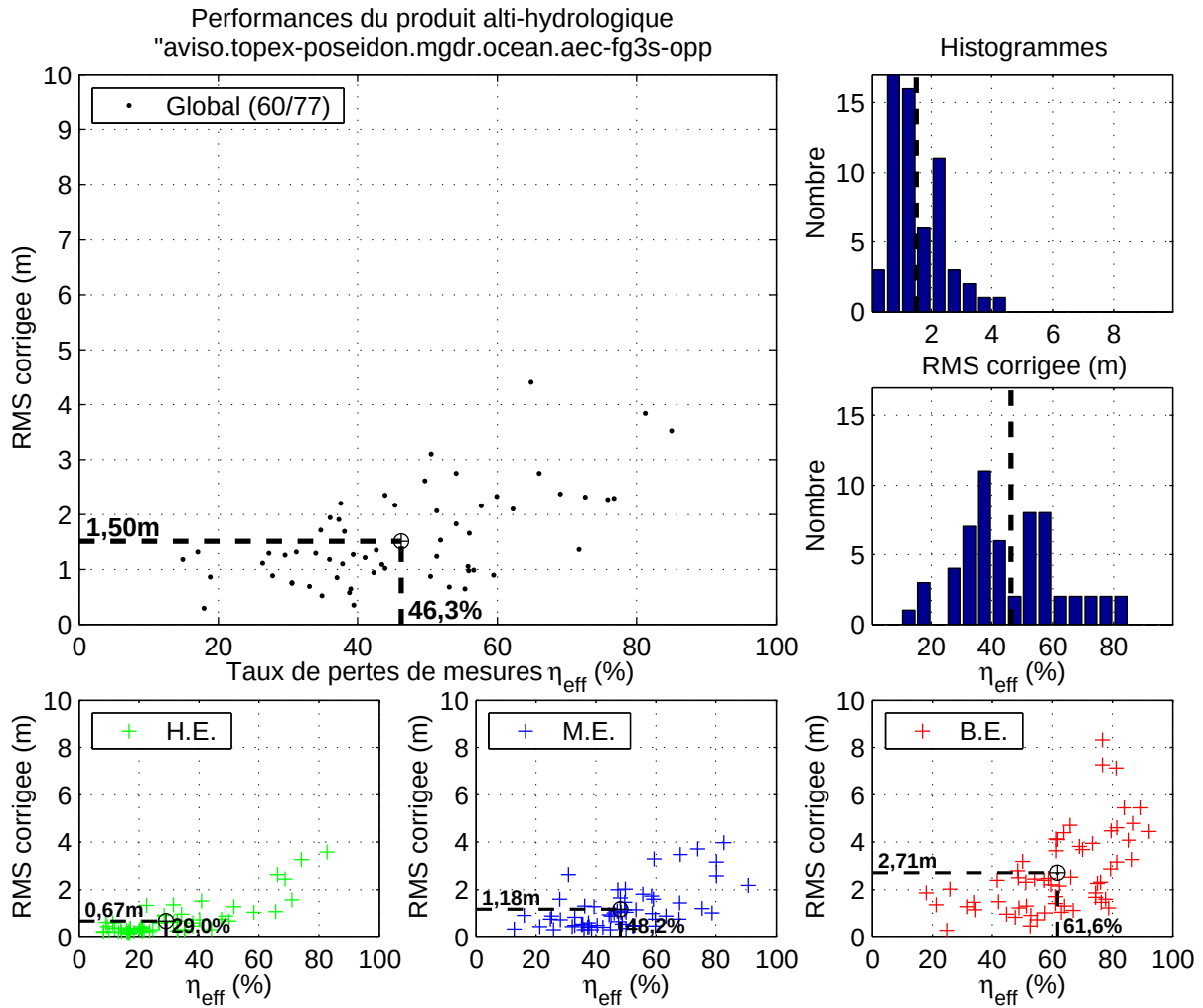


FIG. B.9: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fg3s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 60 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-fg3s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$R\hat{M}S_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,50	1,43	0,40	21,1	46,3	1,56	1,48	0,10	0,37
Hautes eaux	0,67	0,67	-0,00	15,9	29,0	0,70	0,71	-0,30	0,21
Moyennes eaux	1,18	1,09	0,22	23,0	48,2	1,22	1,15	-0,08	0,38
Basses eaux	2,71	1,94	1,61	33,7	61,6	2,72	1,99	1,31	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,4\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,7 ; \overline{M_a} = 156,6 (\overline{\eta_a} = 79,2\%)$									

TAB. B.9: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fg3s-opp ».

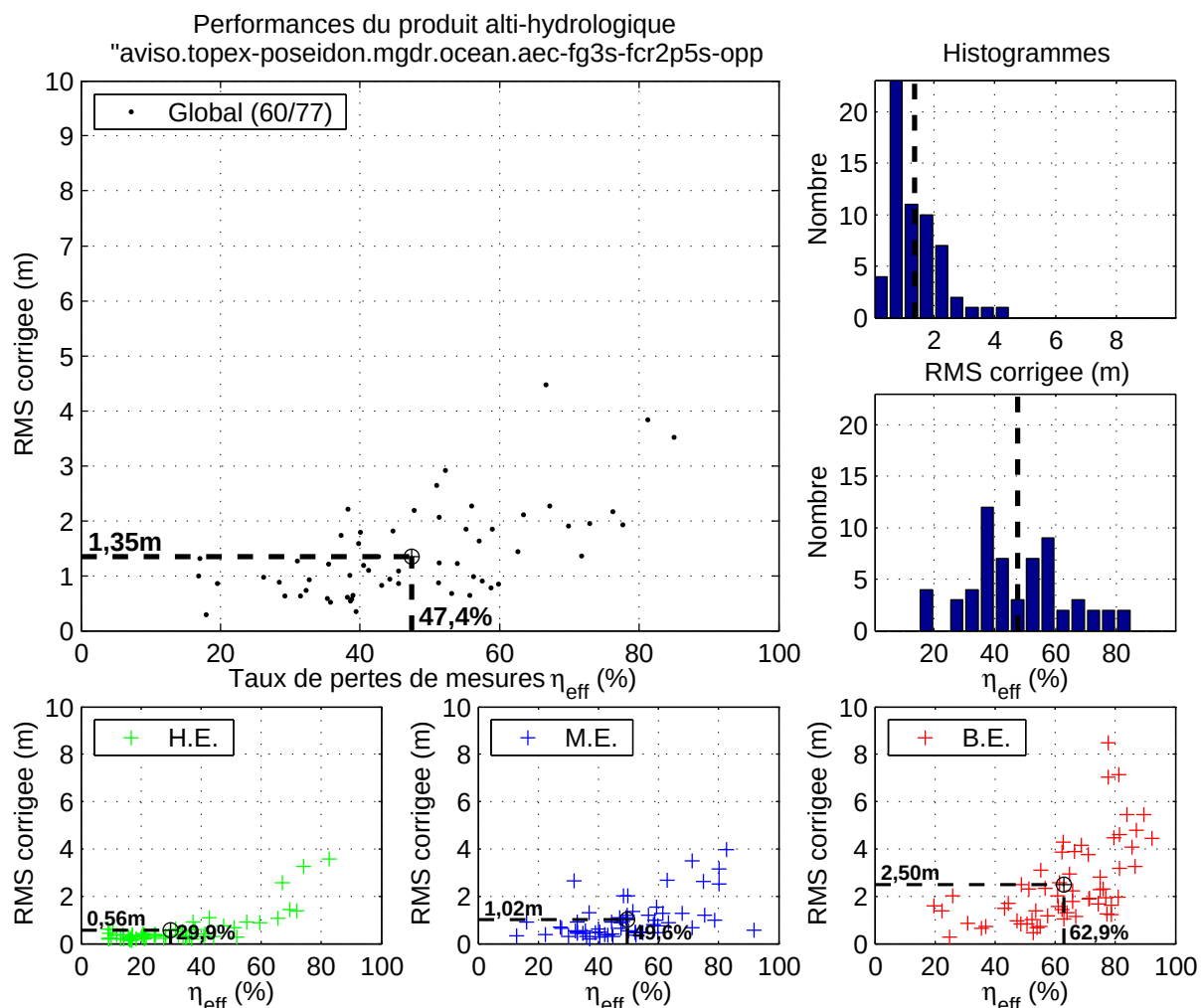


FIG. B.10: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 60 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\hat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,35	1,27	0,40	21,5	47,4	1,41	1,33	0,07	0,37
Hautes eaux	0,56	0,56	0,00	16,1	29,9	0,59	0,60	-0,33	0,21
Moyennes eaux	1,02	0,93	0,26	23,8	49,6	1,07	1,00	-0,07	0,38
Basses eaux	2,50	1,71	1,58	34,7	62,9	2,52	1,77	1,25	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,8\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,4\%$; $\tilde{N}_{CA} = 6,7$; $\overline{M_a} = 152,9$ ($\overline{\eta_a} = 79,3\%$)									

TAB. B.10: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

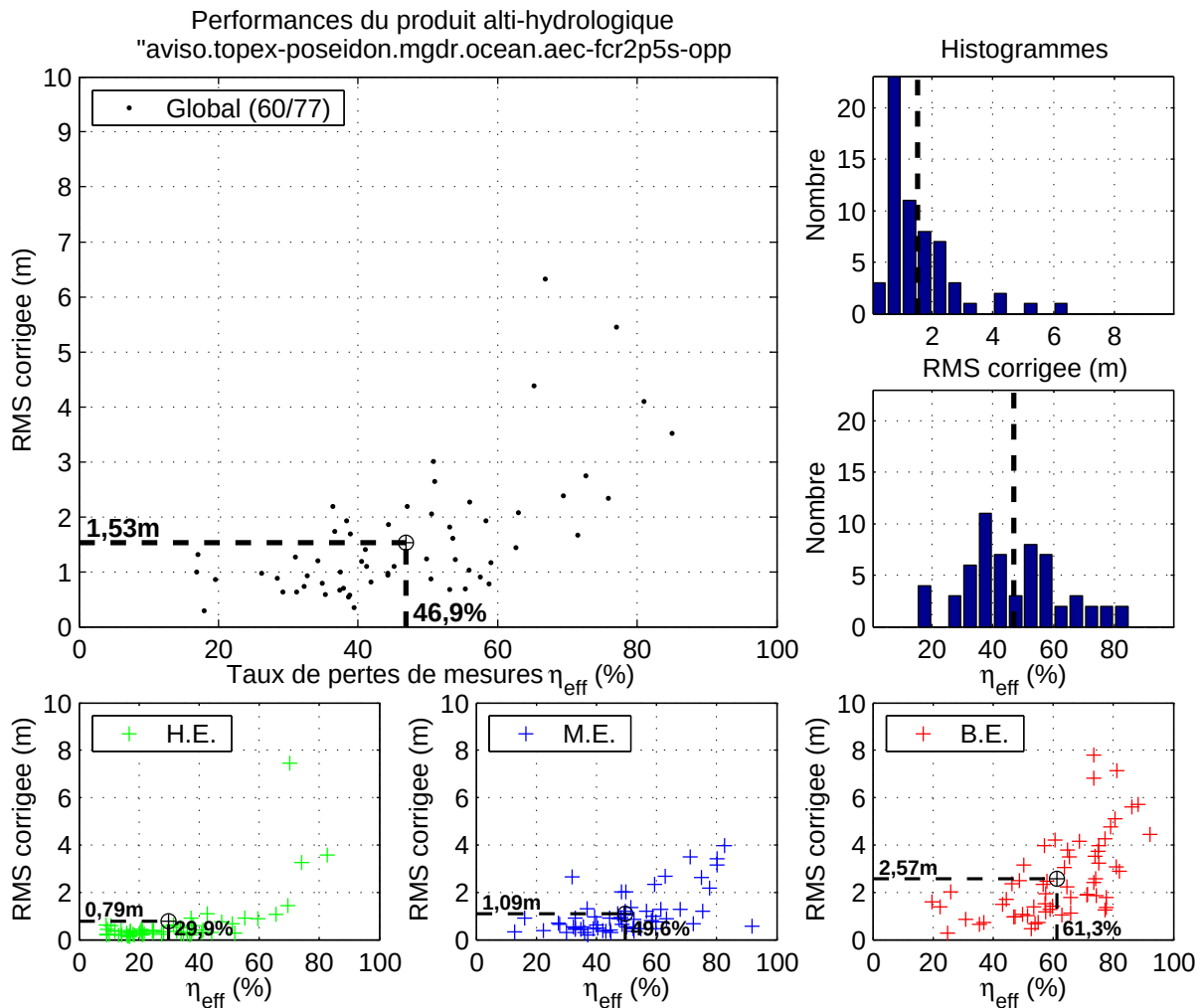


FIG. B.11: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 60 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « AVISO/mgdr/ocean/aec-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,53	1,45	0,41	21,3	46,9	1,59	1,51	0,02	0,37
Hautes eaux	0,79	0,79	0,00	16,1	29,9	0,82	0,83	-0,39	0,21
Moyennes eaux	1,09	0,97	0,31	23,8	49,6	1,14	1,03	-0,08	0,38
Basses eaux	2,57	1,92	1,41	32,1	61,3	2,58	1,97	1,02	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,4\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,7 ; \overline{M_a} = 154,6 (\overline{\eta_a} = 79,4\%)$									

TAB. B.11: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fcr2p5s-opp ».

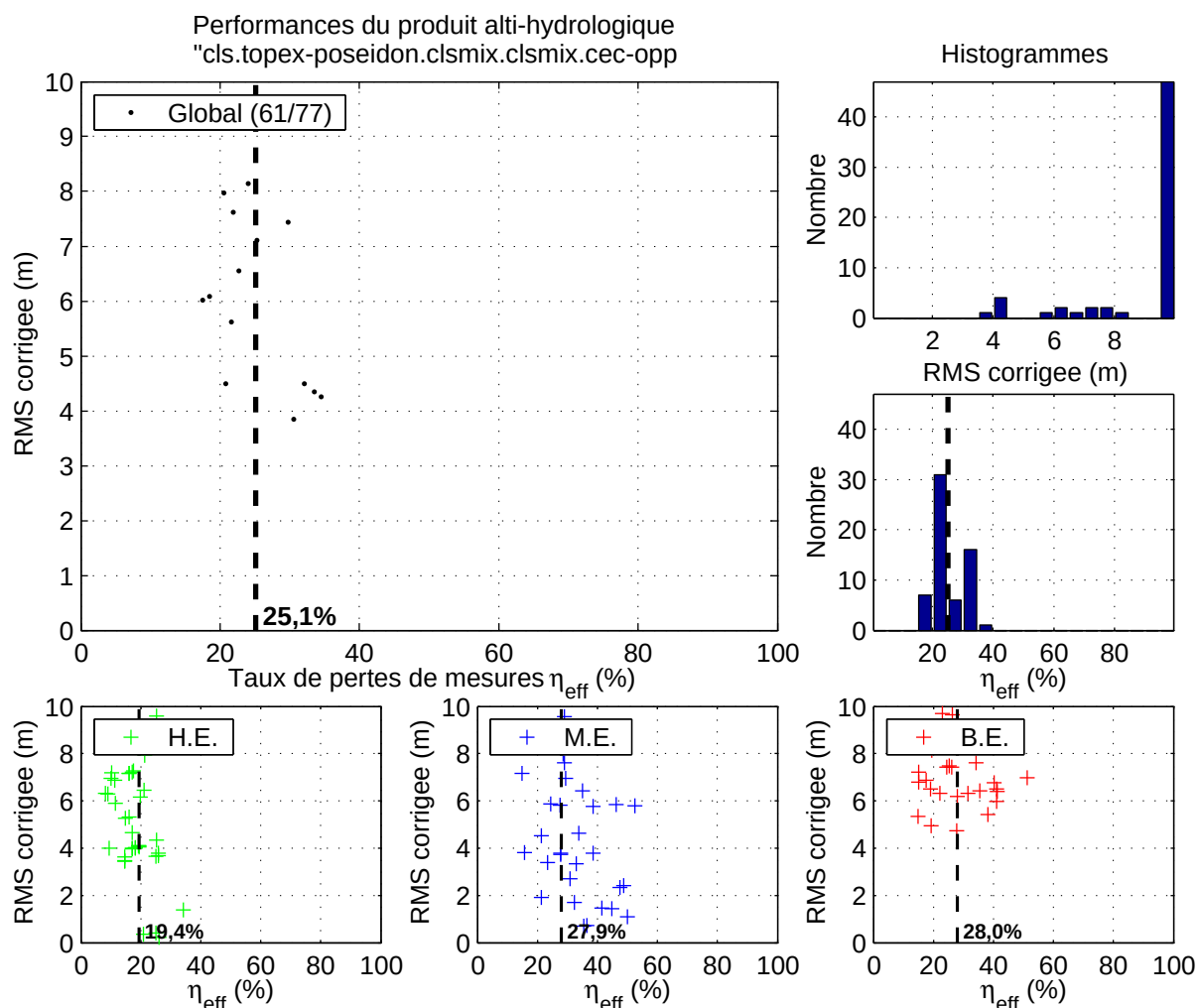


FIG. B.12: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/clsmix/clsmix/cec-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	177,85	177,48	1,54	13,3	25,1	177,85	177,49	21,38	0,37
Hautes eaux	106,72	107,07	-0,00	12,4	19,4	106,10	107,07	19,83	0,21
Moyennes eaux	101,46	94,87	-6,96	14,1	27,9	100,97	94,89	12,88	0,38
Basses eaux	194,21	187,88	12,20	14,0	28,0	193,07	187,89	32,03	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,2\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 215,2$ ($\overline{\eta_a} = 81,6\%$)									

TAB. B.12: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp ».

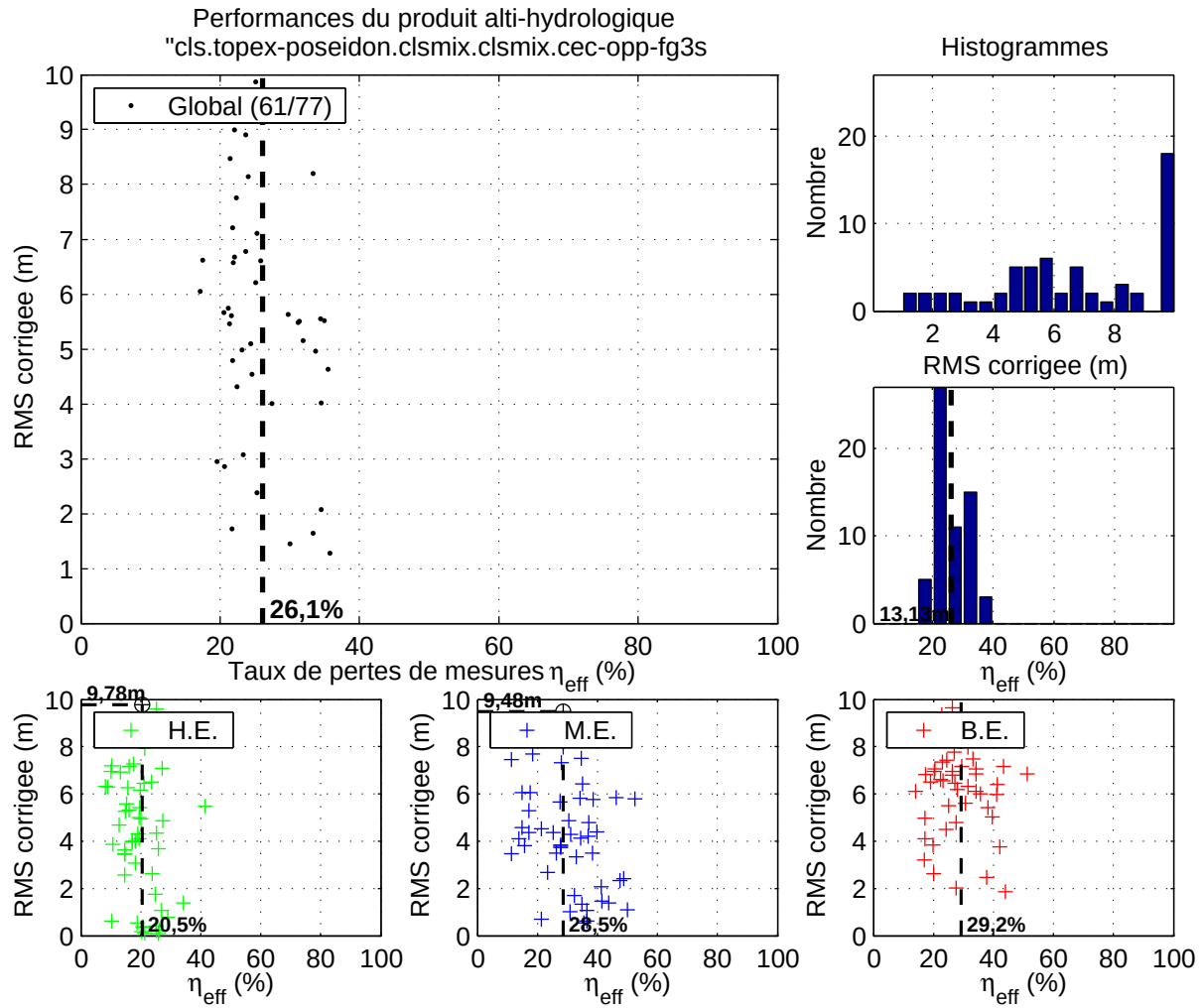


FIG. B.13: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fg3s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/clsmix/clsmix/cec-opp-fg3s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	13,23	13,17	0,53	13,5	26,1	13,25	13,19	1,50	0,37
Hautes eaux	9,78	9,81	0,00	12,6	20,5	9,74	9,82	0,97	0,21
Moyennes eaux	9,48	9,11	0,74	14,2	28,5	9,45	9,13	1,71	0,38
Basses eaux	13,13	12,57	0,90	14,2	29,2	13,08	12,59	1,88	0,38

$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 212,6$ ($\overline{\eta_a} = 81,6\%$)

TAB. B.13: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fg3s ».

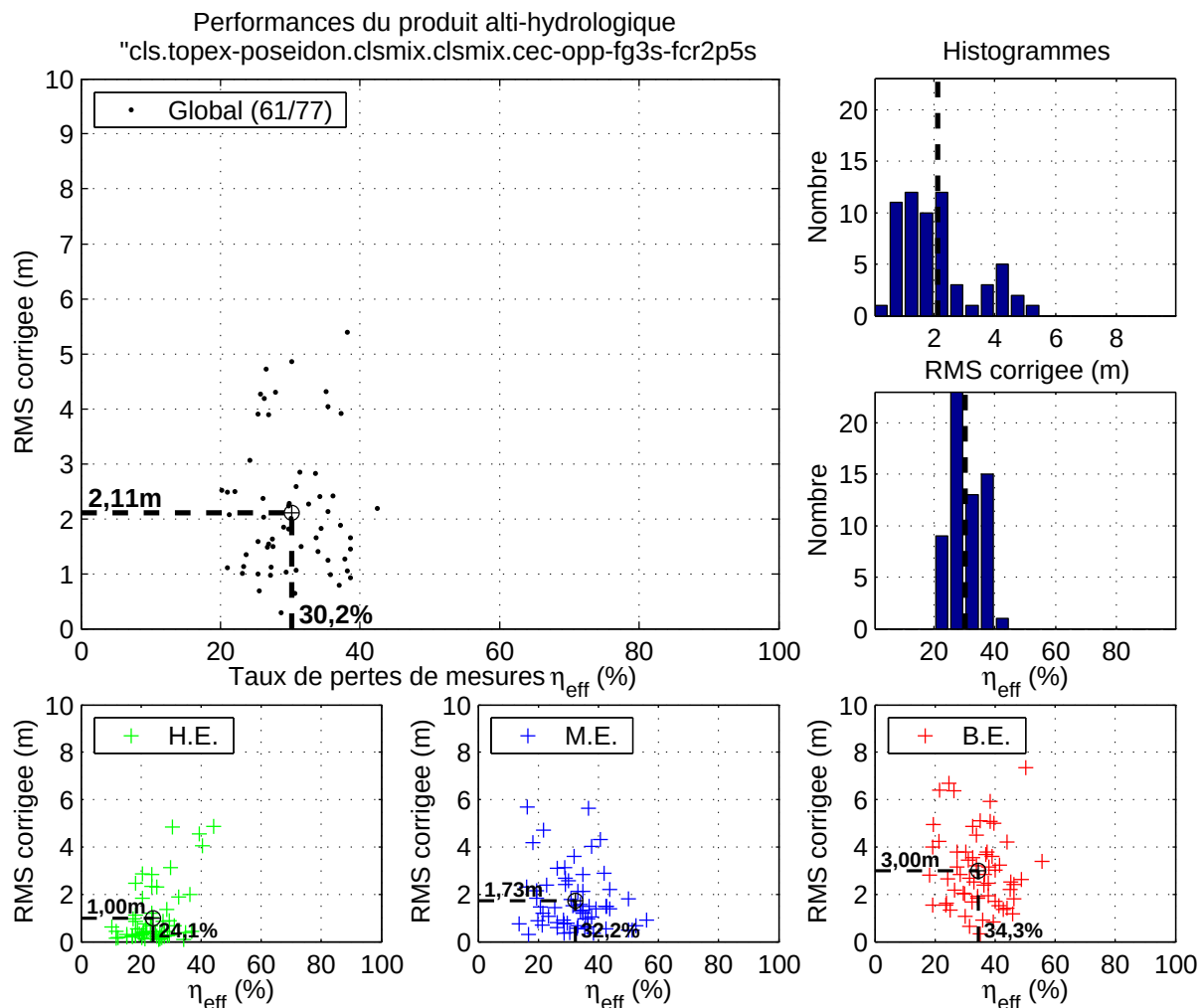
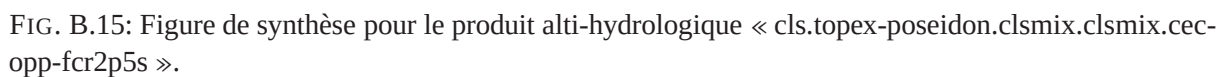


FIG. B.14: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

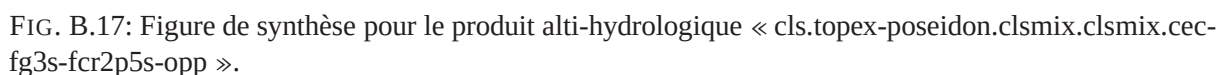
Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/clsmix/clsmix/cec-opp-fg3s-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,11	2,01	0,53	14,3	30,2	2,15	2,06	1,32	0,37
Hautes eaux	1,00	1,01	-0,00	13,2	24,1	1,03	1,04	0,79	0,21
Moyennes eaux	1,73	1,63	0,37	15,0	32,2	1,78	1,69	1,16	0,38
Basses eaux	3,00	2,55	1,30	15,4	34,3	3,02	2,59	2,08	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\tilde{N}_{CA} = 6,6$; $\overline{M}_a = 199,7$ ($\overline{\eta_a} = 81,5\%$)

TAB. B.14: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».



TAB. B.15: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cecopp-fcr2p5s ».



TAB. B.17: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cecfg3s-fcr2p5s-opp ».

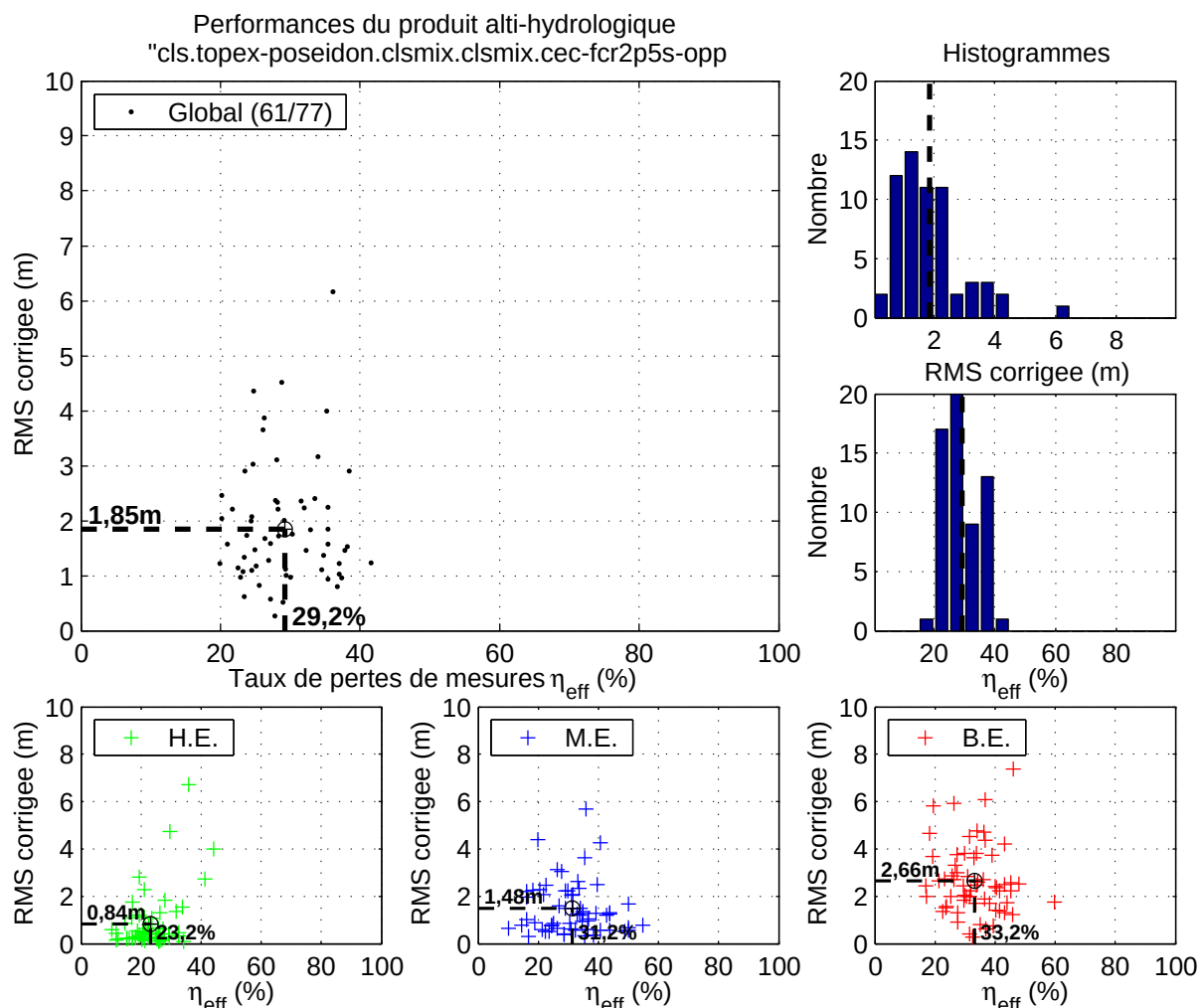


FIG. B.18: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/clsmix/clsmix/cec-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,85	1,73	0,57	14,1	29,2	1,90	1,79	1,30	0,37
Hautes eaux	0,84	0,84	-0,00	13,0	23,2	0,87	0,87	0,73	0,21
Moyennes eaux	1,48	1,37	0,41	14,7	31,2	1,53	1,43	1,15	0,38
Basses eaux	2,66	2,16	1,38	15,1	33,2	2,68	2,20	2,11	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 202,7 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$									

TAB. B.18: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-fcr2p5s-opp ».

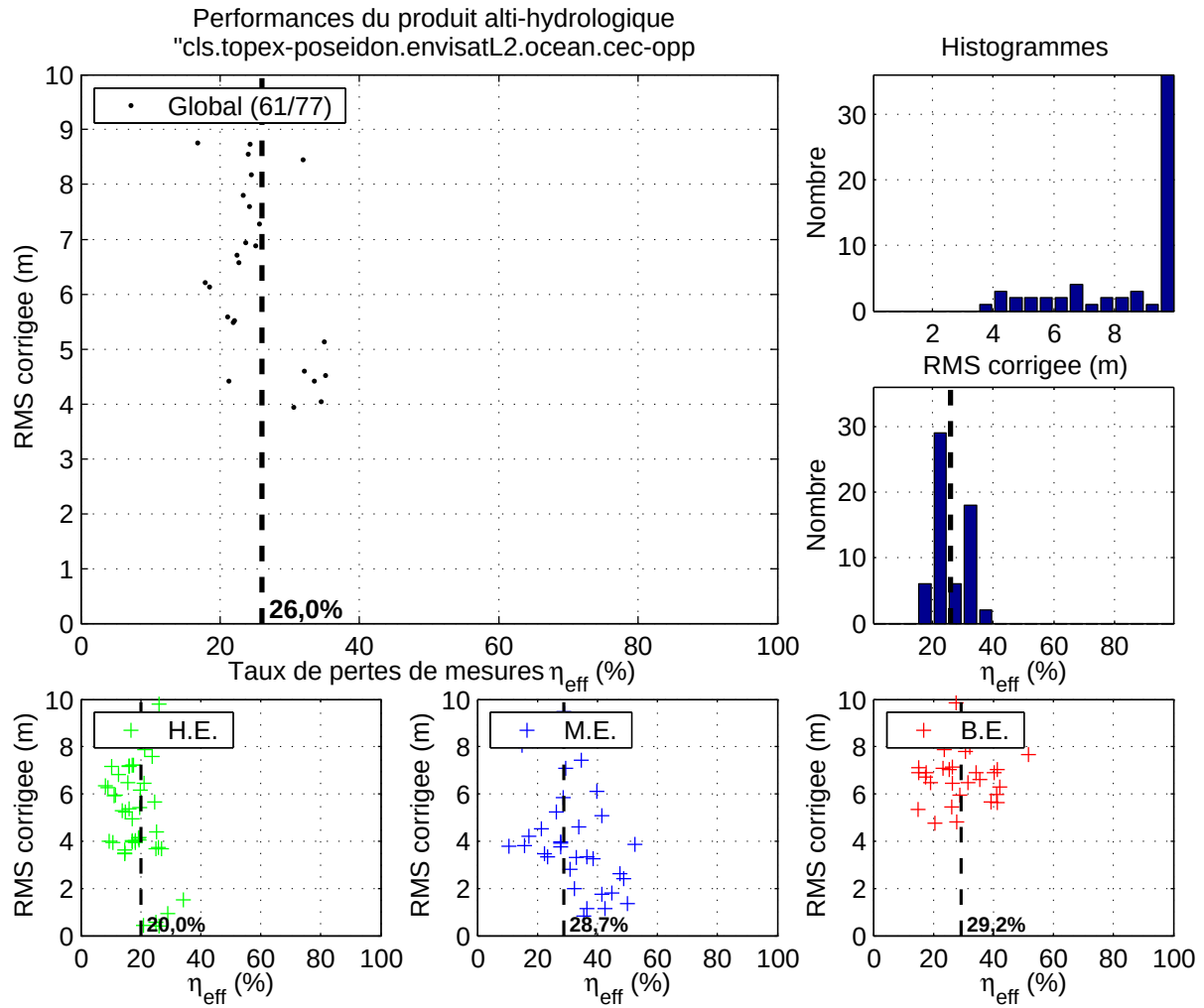


FIG. B.19: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ocean/cec-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	129,90	129,30	-1,15	13,5	26,0	129,91	129,31	16,23	0,37
Hautes eaux	86,75	87,05	-0,00	12,5	20,0	86,21	87,06	17,38	0,21
Moyennes eaux	55,81	48,31	-10,36	14,2	28,7	55,63	48,33	7,02	0,38
Basses eaux	149,98	143,80	7,36	14,2	29,2	149,06	143,81	24,75	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 212,8$ ($\overline{\eta_a} = 81,6\%$)									

TAB. B.19: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp ».

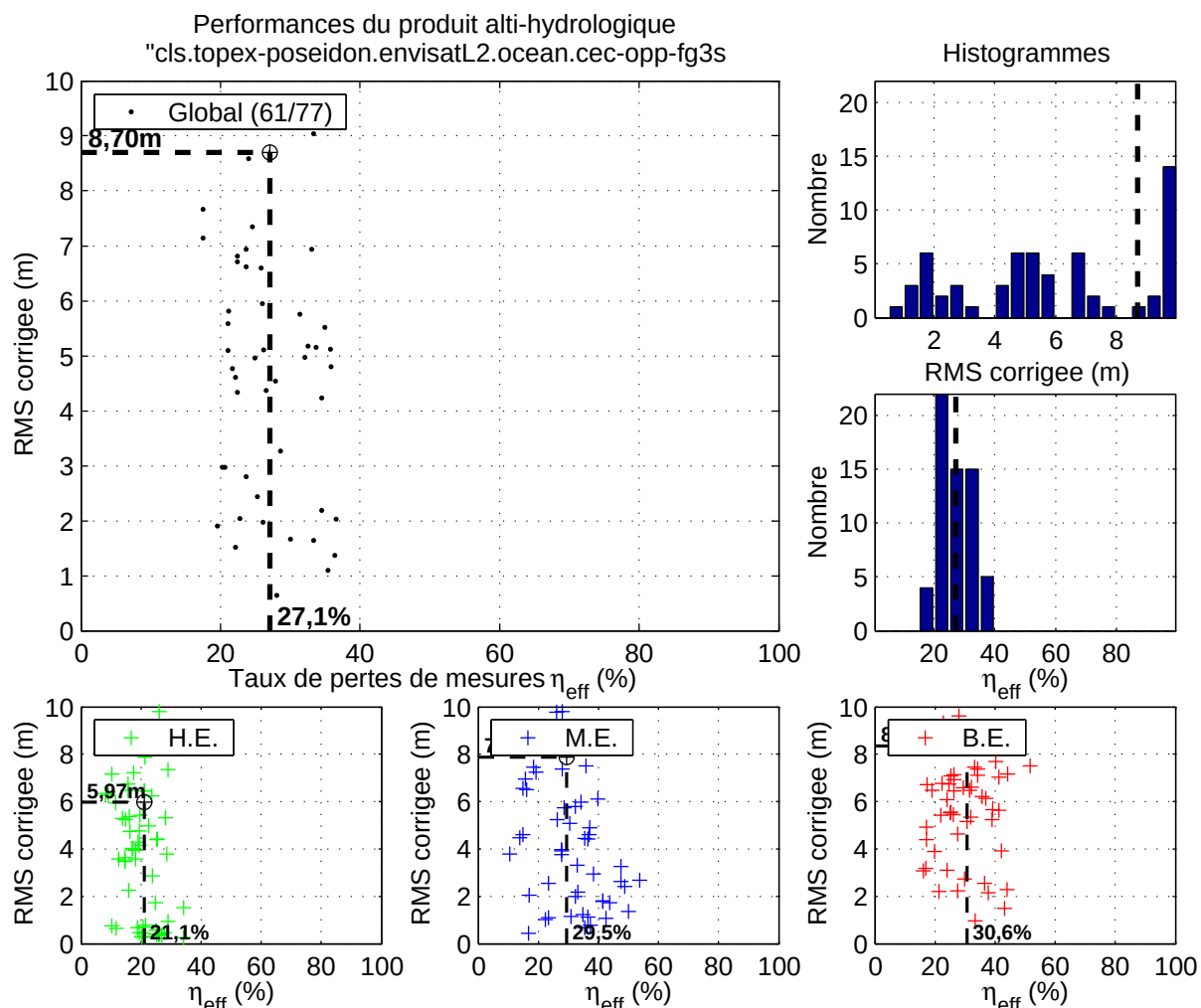


FIG. B.20: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fg3s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ocean/cec-opp-fg3s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	8,70	8,64	0,64	13,7	27,1	8,72	8,66	1,63	0,37
Hautes eaux	5,97	5,99	-0,00	12,7	21,1	5,96	6,01	0,99	0,21
Moyennes eaux	7,88	7,52	0,90	14,4	29,5	7,86	7,55	1,89	0,38
Basses eaux	8,35	7,95	1,07	14,5	30,6	8,33	7,97	2,06	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,0\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,2\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 209,4 (\overline{\eta_a} = 81,6\%)$									

TAB. B.20: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fg3s ».

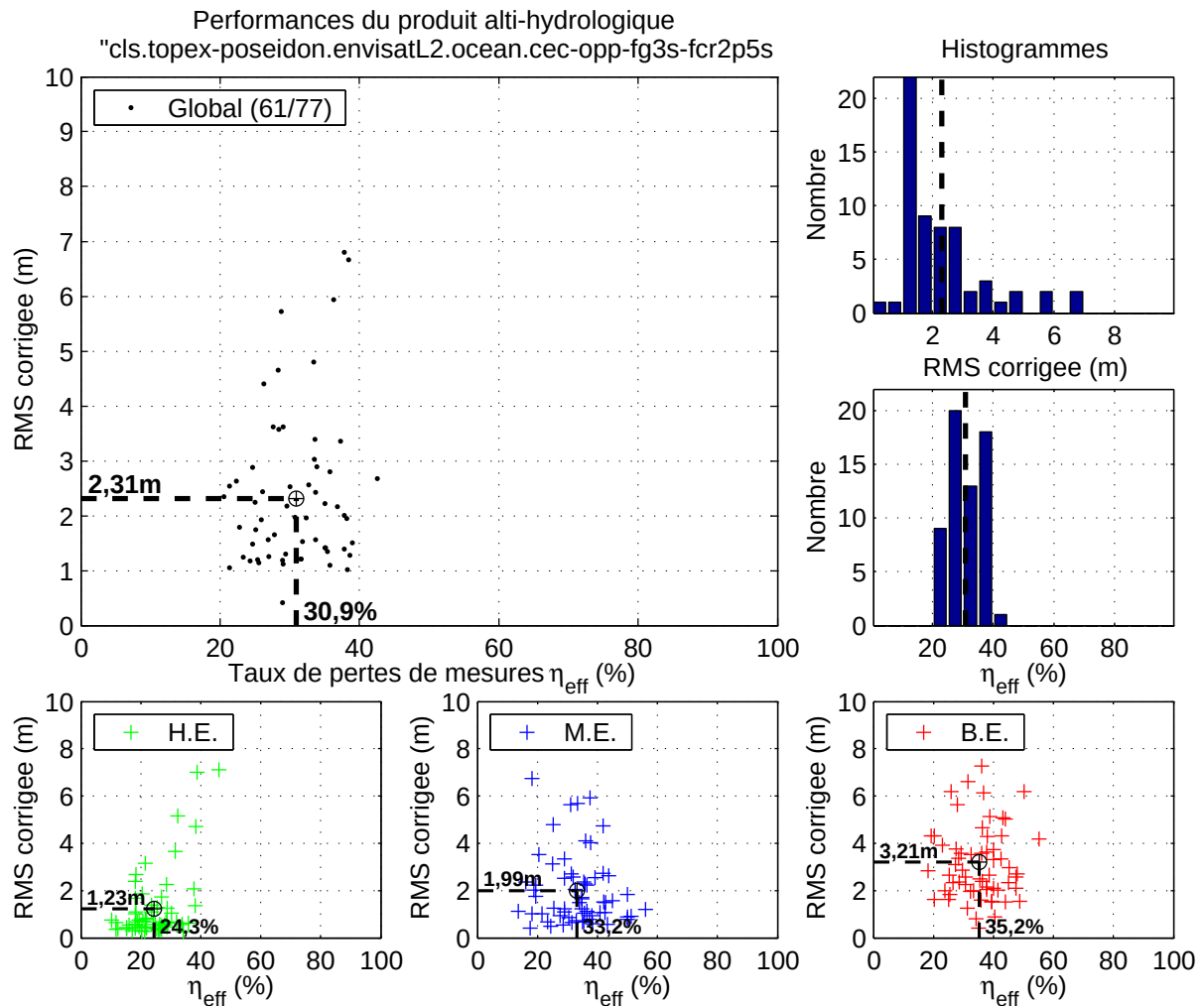


FIG. B.21: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ocean/cec-opp-fg3s-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,31	2,23	0,50	14,4	30,9	2,35	2,27	1,72	0,37
Hautes eaux	1,23	1,23	0,00	13,2	24,3	1,26	1,27	1,23	0,21
Moyennes eaux	1,99	1,88	0,43	15,2	33,2	2,03	1,94	1,65	0,38
Basses eaux	3,21	2,83	1,13	15,6	35,2	3,22	2,87	2,36	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\tilde{N}_{CA} = 6,6$; $\overline{M_a} = 197,8$ ($\overline{\eta_a} = 81,4\%$)

TAB. B.21: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

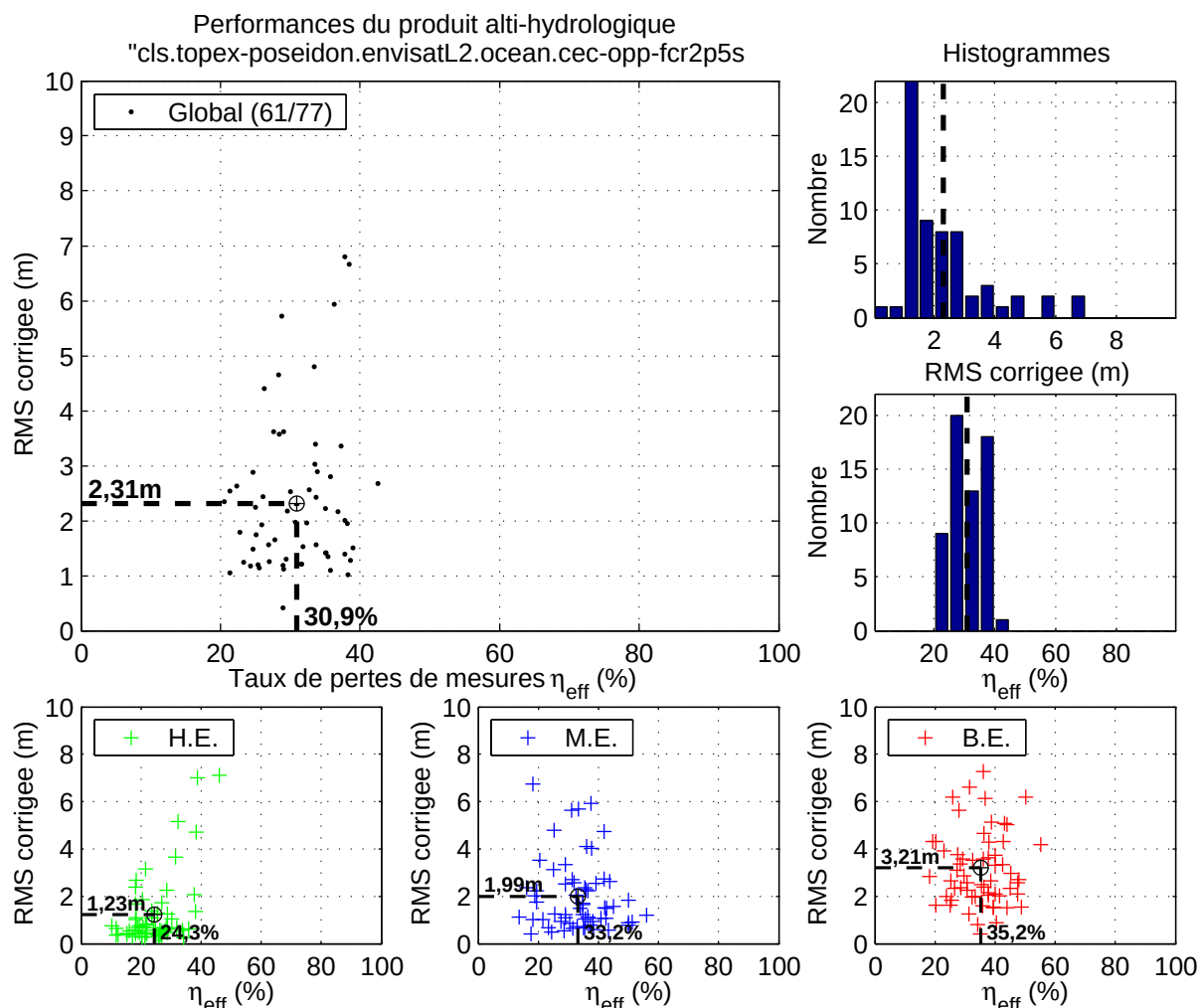


FIG. B.22: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fcr2p5s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ocean/cec-opp-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,31	2,23	0,50	14,4	30,9	2,35	2,27	1,72	0,37
Hautes eaux	1,23	1,23	0,00	13,2	24,3	1,26	1,27	1,23	0,21
Moyennes eaux	1,99	1,88	0,43	15,2	33,2	2,03	1,94	1,65	0,38
Basses eaux	3,21	2,83	1,13	15,6	35,2	3,22	2,87	2,36	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 197,8 (\overline{\eta_a} = 81,4\%)$									

TAB. B.22: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fcr2p5s ».

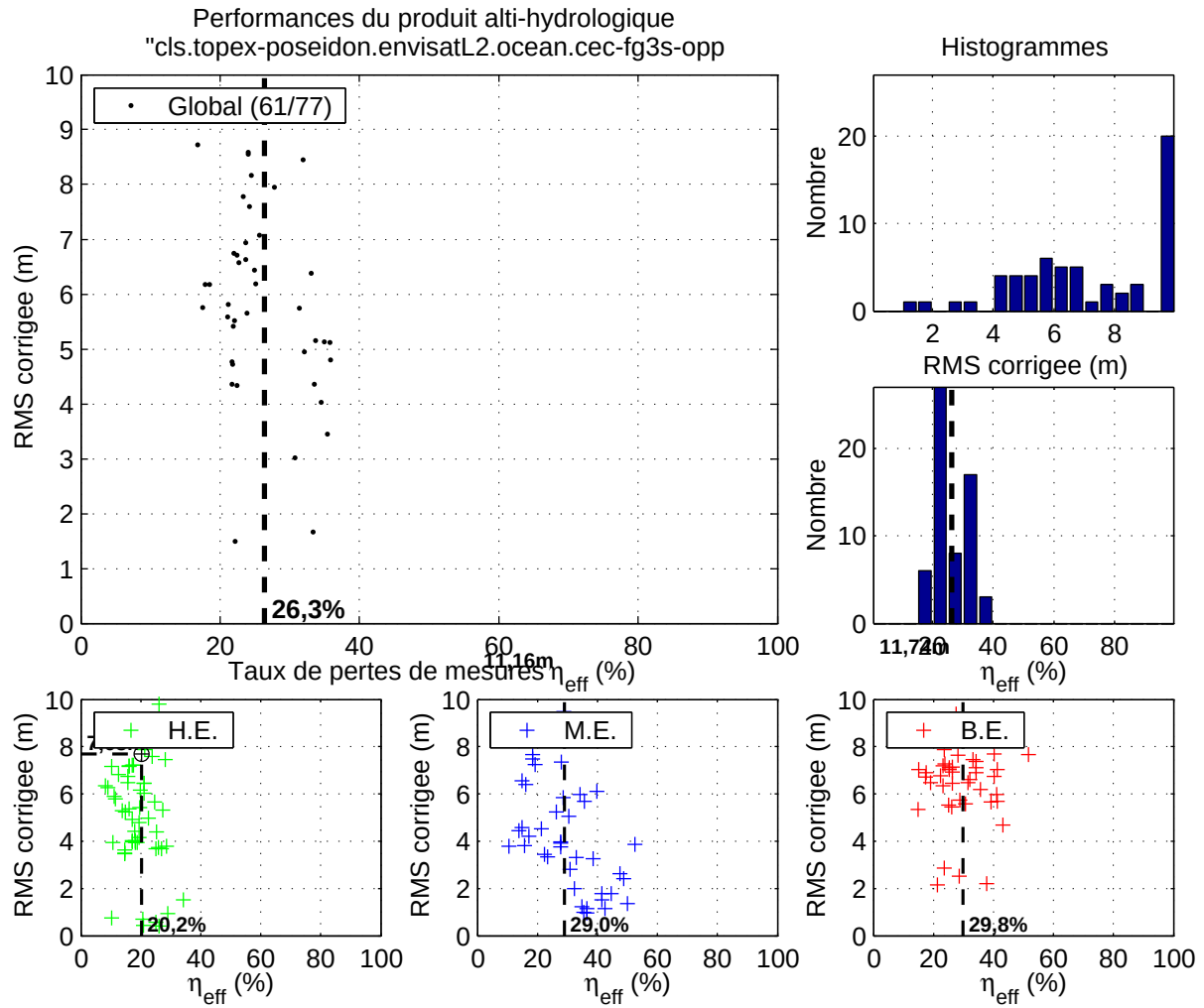


FIG. B.23: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fg3s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ocean/cec-fg3s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	11,96	11,90	0,87	13,5	26,3	11,97	11,91	1,63	0,37
Hautes eaux	7,68	7,70	-0,00	12,5	20,2	7,65	7,71	0,76	0,21
Moyennes eaux	11,16	10,72	1,40	14,3	29,0	11,12	10,74	2,15	0,38
Basses eaux	11,74	11,36	1,33	14,3	29,8	11,70	11,37	2,09	0,38

$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 211,8$ ($\overline{\eta_a} = 81,7\%$)

TAB. B.23: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fg3s-opp ».

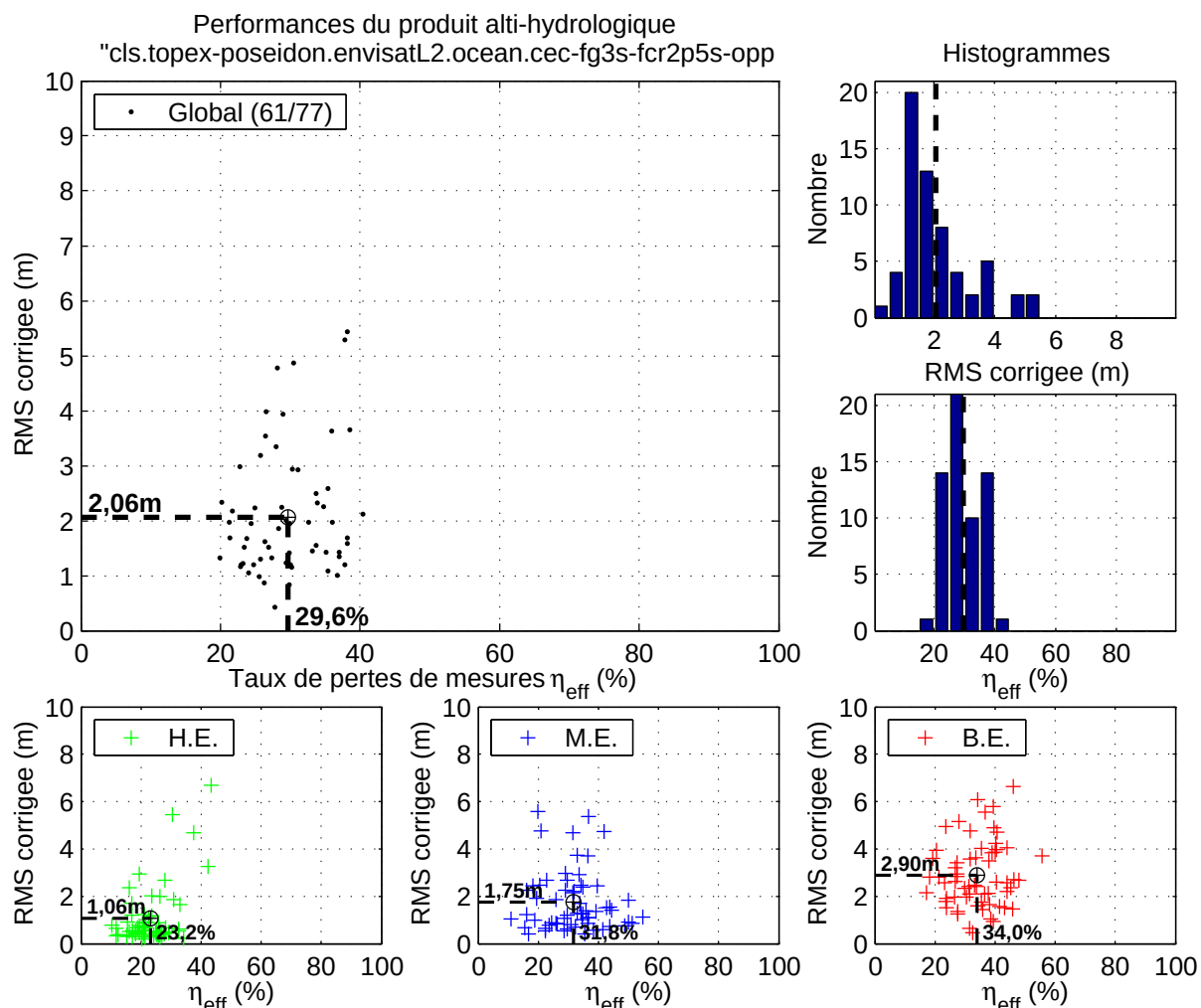


FIG. B.24: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ocean/cec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73	0,37
Hautes eaux	1,06	1,07	0,00	13,0	23,2	1,10	1,10	1,21	0,21
Moyennes eaux	1,75	1,64	0,46	14,9	31,8	1,80	1,70	1,67	0,38
Basses eaux	2,90	2,46	1,20	15,3	34,0	2,92	2,50	2,40	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 201,5 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$

TAB. B.24: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

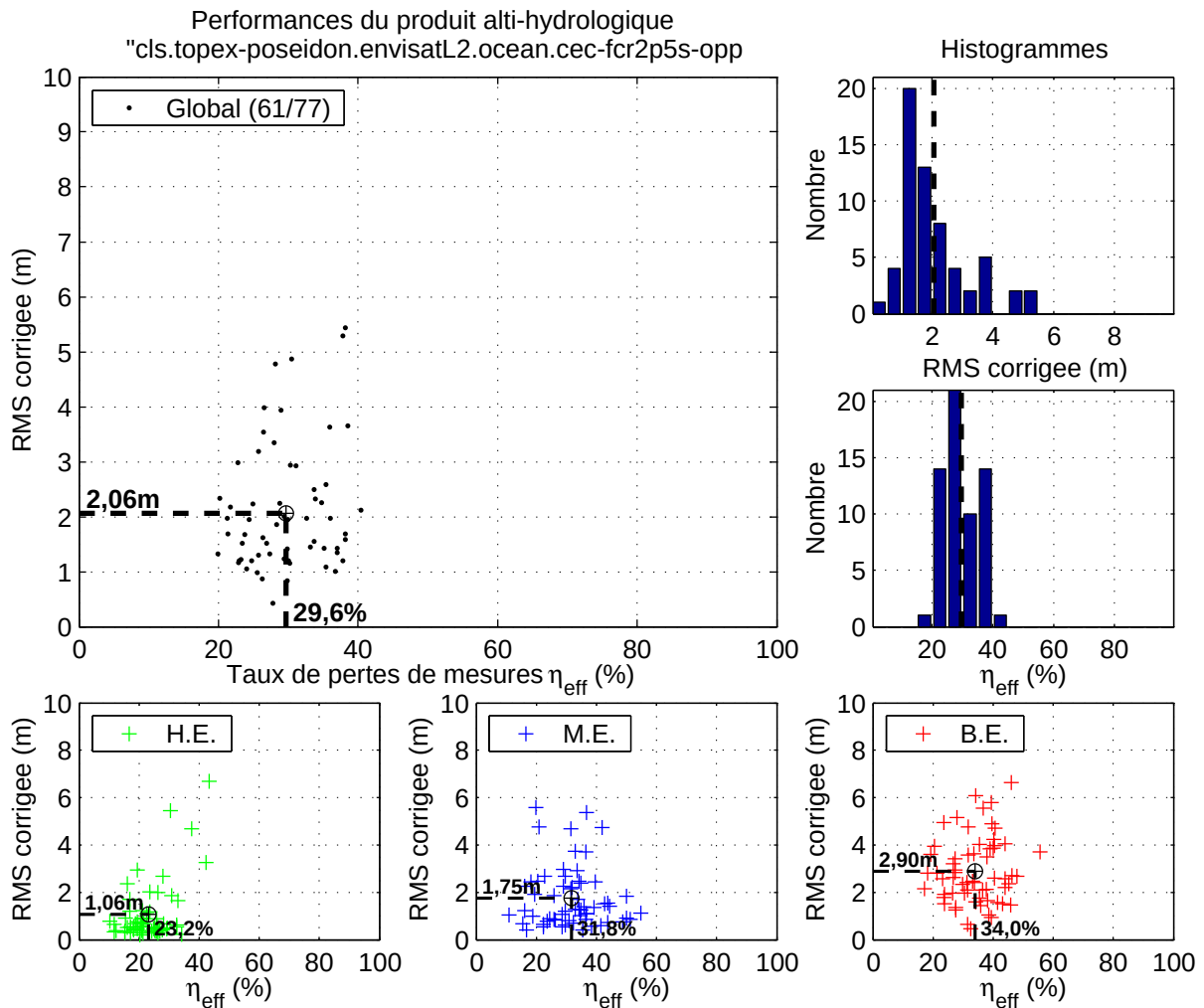


FIG. B.25: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ocean/cec-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,06	1,96	0,53	14,2	29,6	2,11	2,01	1,73	0,37
Hautes eaux	1,06	1,07	0,00	13,0	23,2	1,10	1,10	1,21	0,21
Moyennes eaux	1,75	1,64	0,46	14,9	31,8	1,80	1,70	1,67	0,38
Basses eaux	2,90	2,46	1,20	15,3	34,0	2,92	2,50	2,40	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 201,5 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$									

TAB. B.25: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fcr2p5s-opp ».

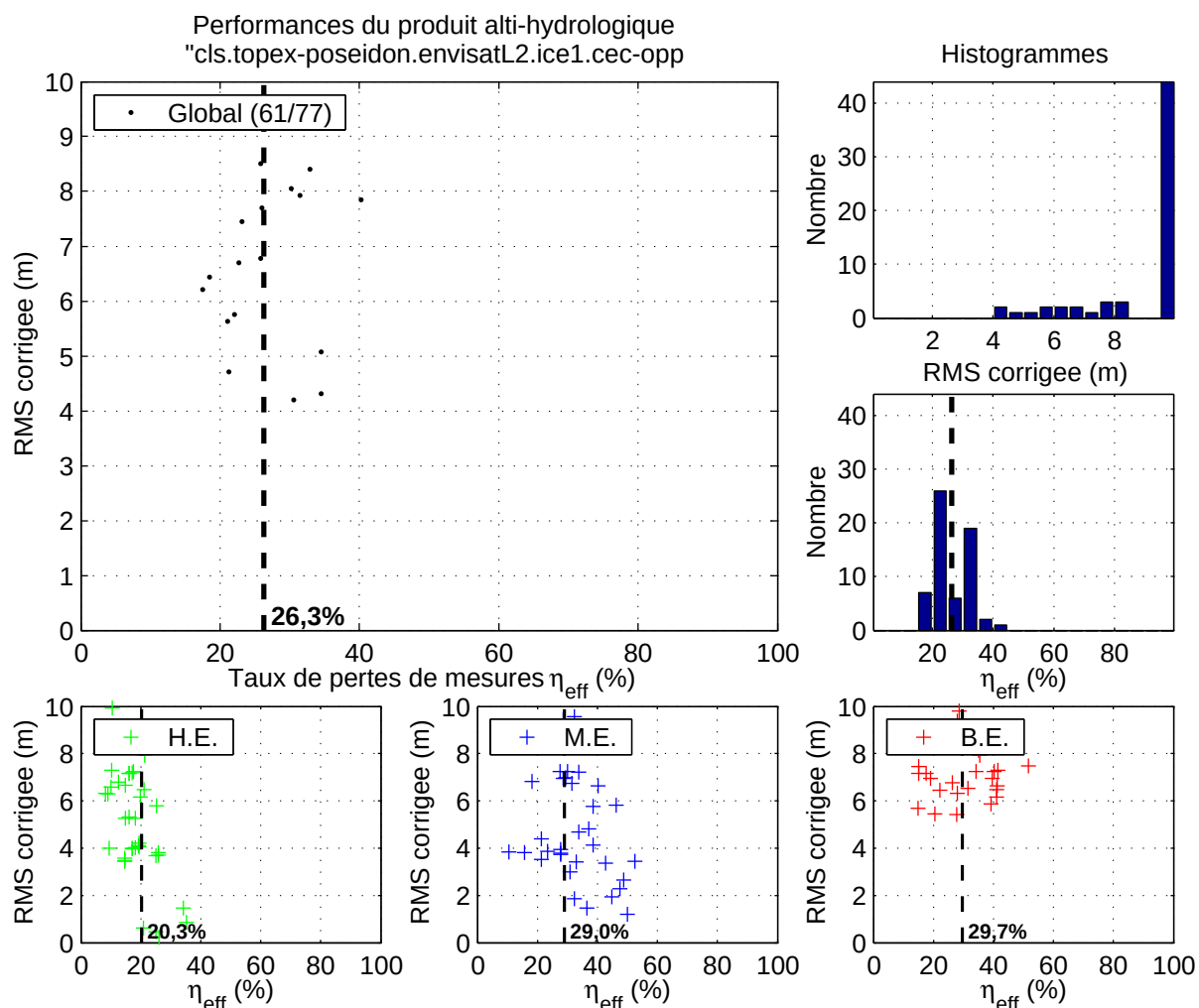


FIG. B.26: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice1/cec-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	151,56	151,03	0,96	13,6	26,3	151,57	151,03	19,34	0,37
Hautes eaux	86,67	86,92	0,00	12,6	20,3	86,21	86,93	18,38	0,21
Moyennes eaux	58,80	52,61	-10,67	14,3	29,0	58,60	52,63	7,71	0,38
Basses eaux	190,76	187,81	14,60	14,3	29,7	189,60	187,82	32,98	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,2\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 211,7$ ($\overline{\eta_a} = 81,6\%$)									

TAB. B.26: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp ».

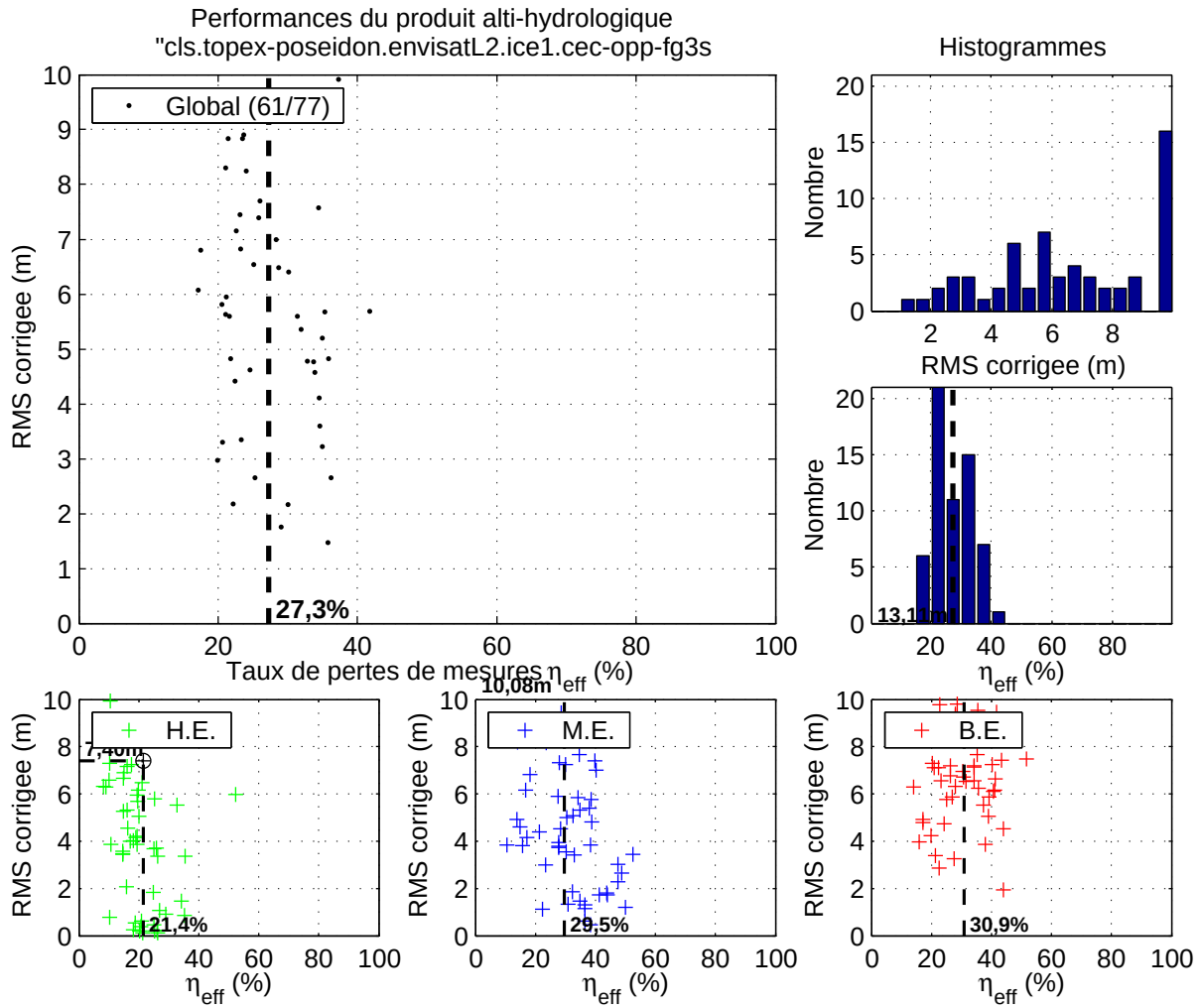


FIG. B.27: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fg3s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice1/cec-opp-fg3s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	12,36	12,28	0,94	13,7	27,3	12,37	12,30	2,02	0,37
Hautes eaux	7,40	7,42	0,00	12,8	21,4	7,37	7,44	1,08	0,21
Moyennes eaux	10,08	9,89	1,24	14,4	29,5	10,05	9,91	2,32	0,38
Basses eaux	13,11	12,56	1,67	14,6	30,9	13,05	12,58	2,75	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 208,9$ ($\overline{\eta_a} = 81,6\%$)									

TAB. B.27: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fg3s ».

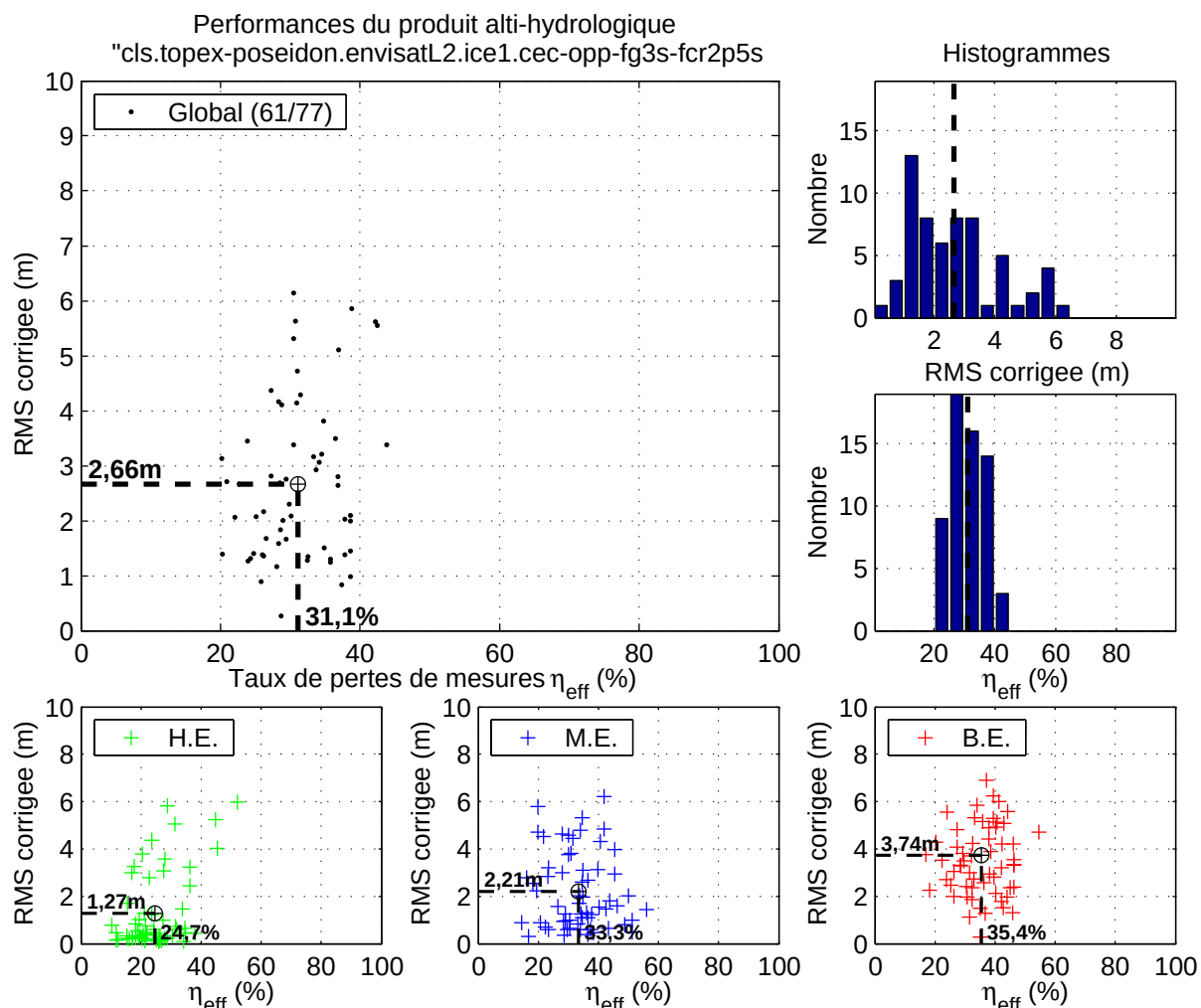


FIG. B.28: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice1/cec-opp-fg3s-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,66	2,50	0,76	14,5	31,1	2,70	2,54	1,79	0,37
Hautes eaux	1,27	1,27	-0,00	13,4	24,7	1,29	1,31	1,03	0,21
Moyennes eaux	2,21	2,03	0,55	15,2	33,3	2,24	2,08	1,58	0,38
Basses eaux	3,74	3,02	1,84	15,6	35,4	3,75	3,05	2,87	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \widetilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 197,0 (\overline{\eta_a} = 81,4\%)$									

TAB. B.28: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

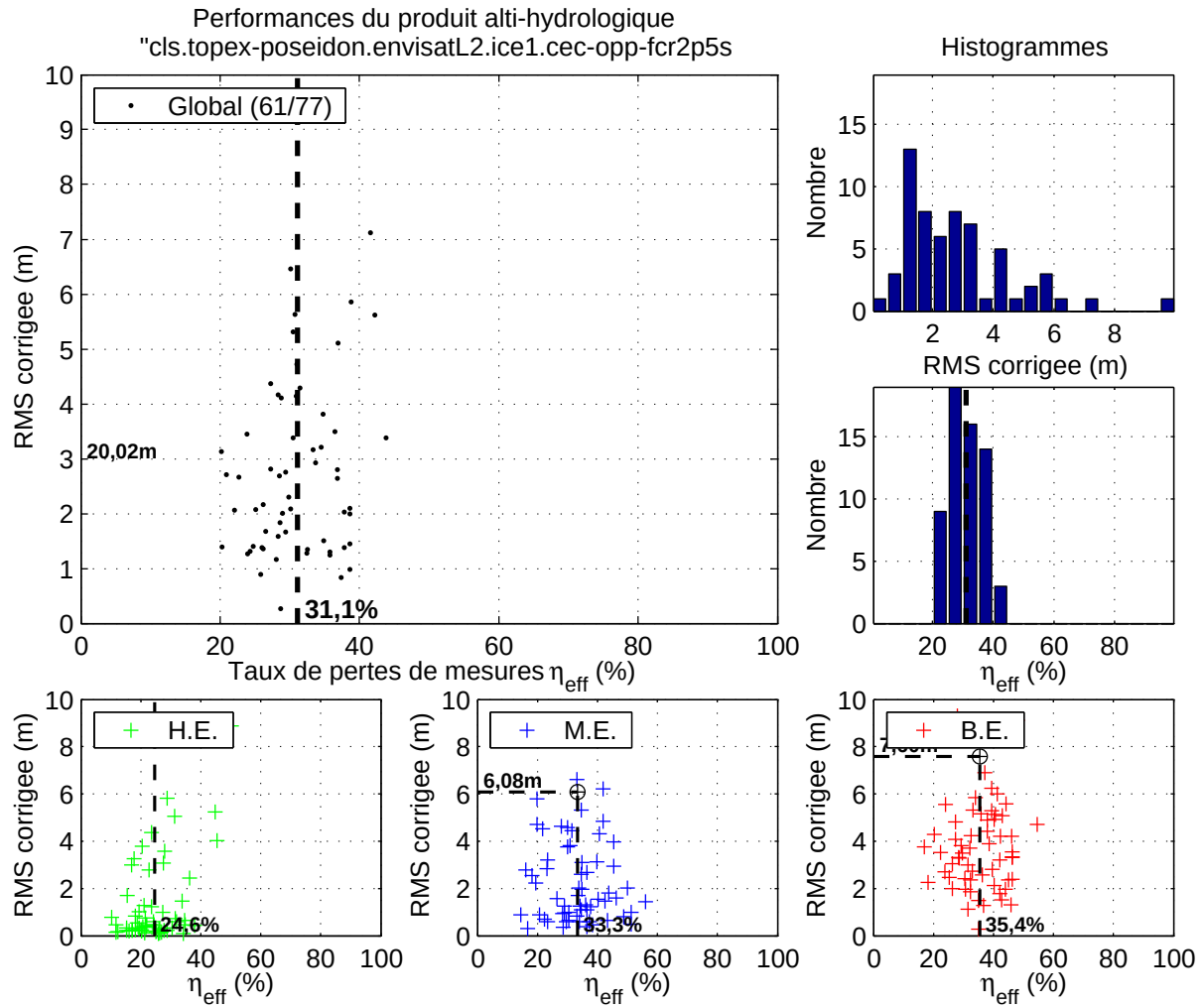


FIG. B.29: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fcr2p5s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice1/cec-opp-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	13,86	13,41	-1,84	14,5	31,1	13,89	13,45	3,08	0,37
Hautes eaux	20,02	20,07	-0,00	13,3	24,6	19,96	20,10	4,92	0,21
Moyennes eaux	6,08	2,06	-3,35	15,2	33,3	6,11	2,11	1,57	0,38
Basses eaux	7,60	3,03	-2,05	15,6	35,4	7,61	3,06	2,87	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 197,2$ ($\overline{\eta_a} = 81,5\%$)

TAB. B.29: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fcr2p5s ».

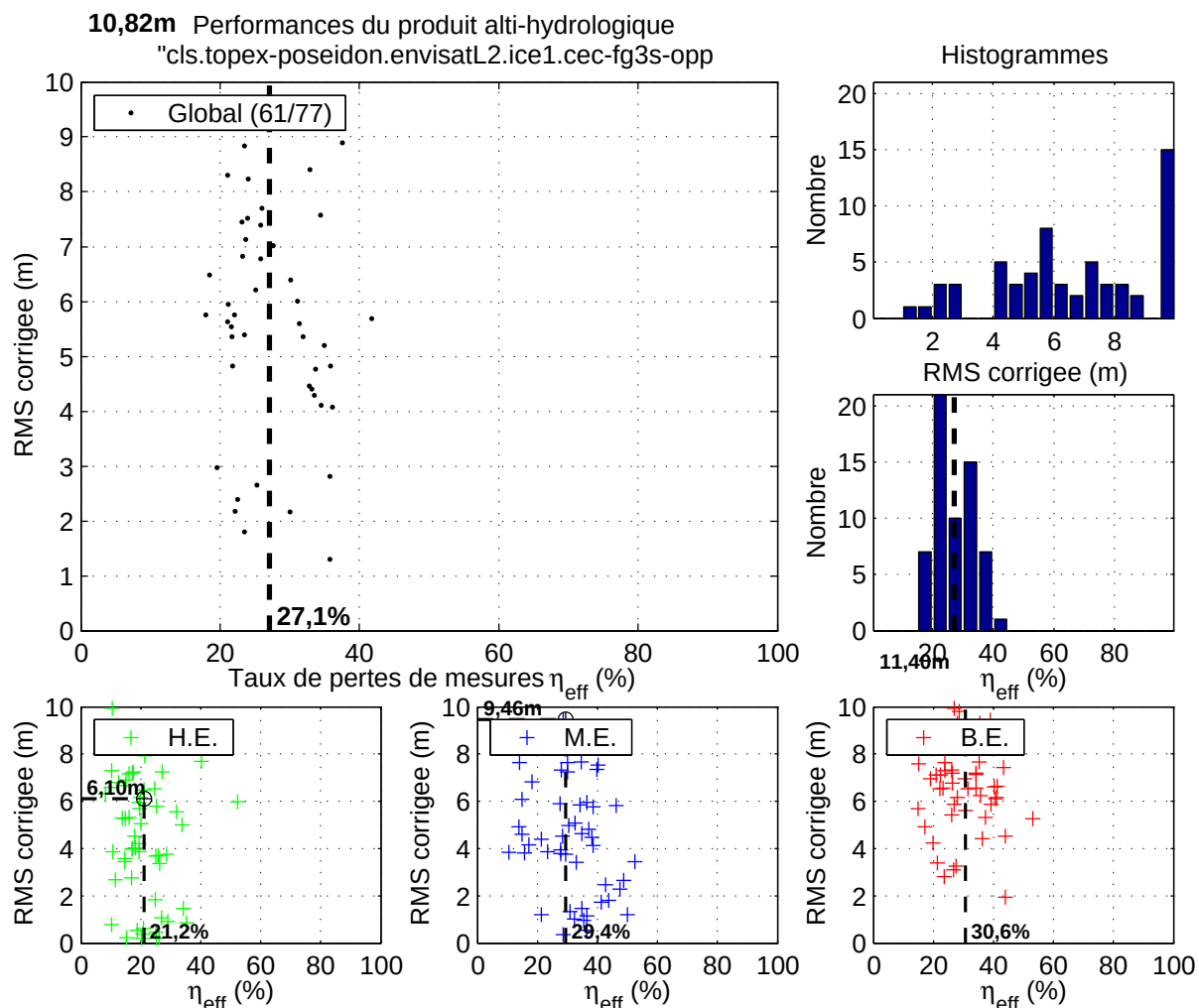


FIG. B.30: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fg3s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice1/cec-fg3s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\mu}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	10,82	10,74	0,96	13,7	27,1	10,83	10,75	1,80	0,37
Hautes eaux	6,10	6,12	0,00	12,7	21,2	6,08	6,14	0,84	0,21
Moyennes eaux	9,46	9,26	1,32	14,4	29,4	9,43	9,28	2,16	0,38
Basses eaux	11,40	10,87	1,63	14,5	30,6	11,36	10,89	2,48	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 209,4$ ($\overline{\eta_a} = 81,6\%$)									

TAB. B.30: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fg3s-opp ».

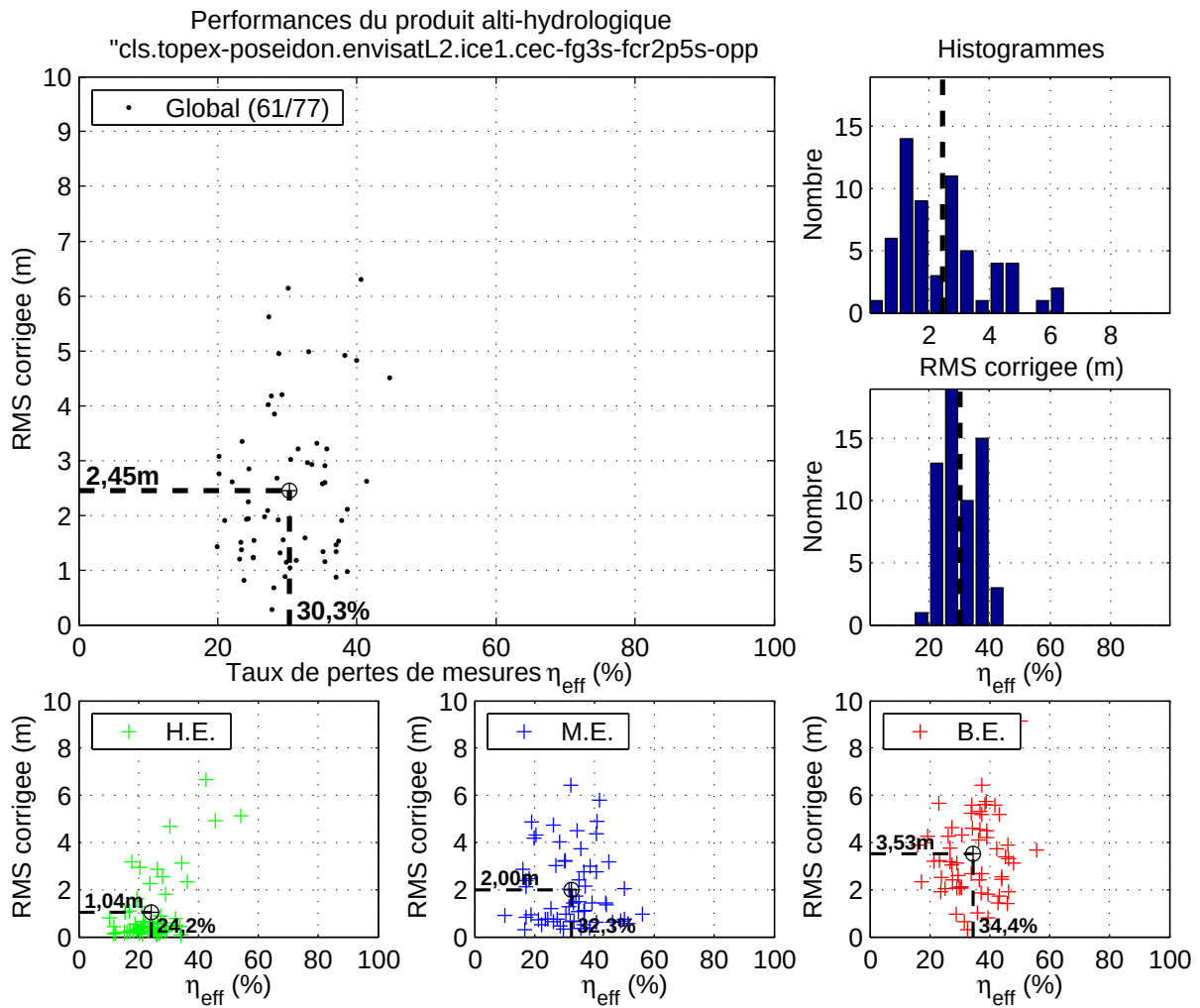


FIG. B.31: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice1/cec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68	0,37
Hautes eaux	1,04	1,04	-0,00	13,3	24,2	1,06	1,07	0,90	0,21
Moyennes eaux	2,00	1,83	0,55	15,0	32,3	2,03	1,89	1,46	0,38
Basses eaux	3,53	2,80	1,90	15,4	34,4	3,54	2,83	2,80	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 199,5 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$									

TAB. B.31: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

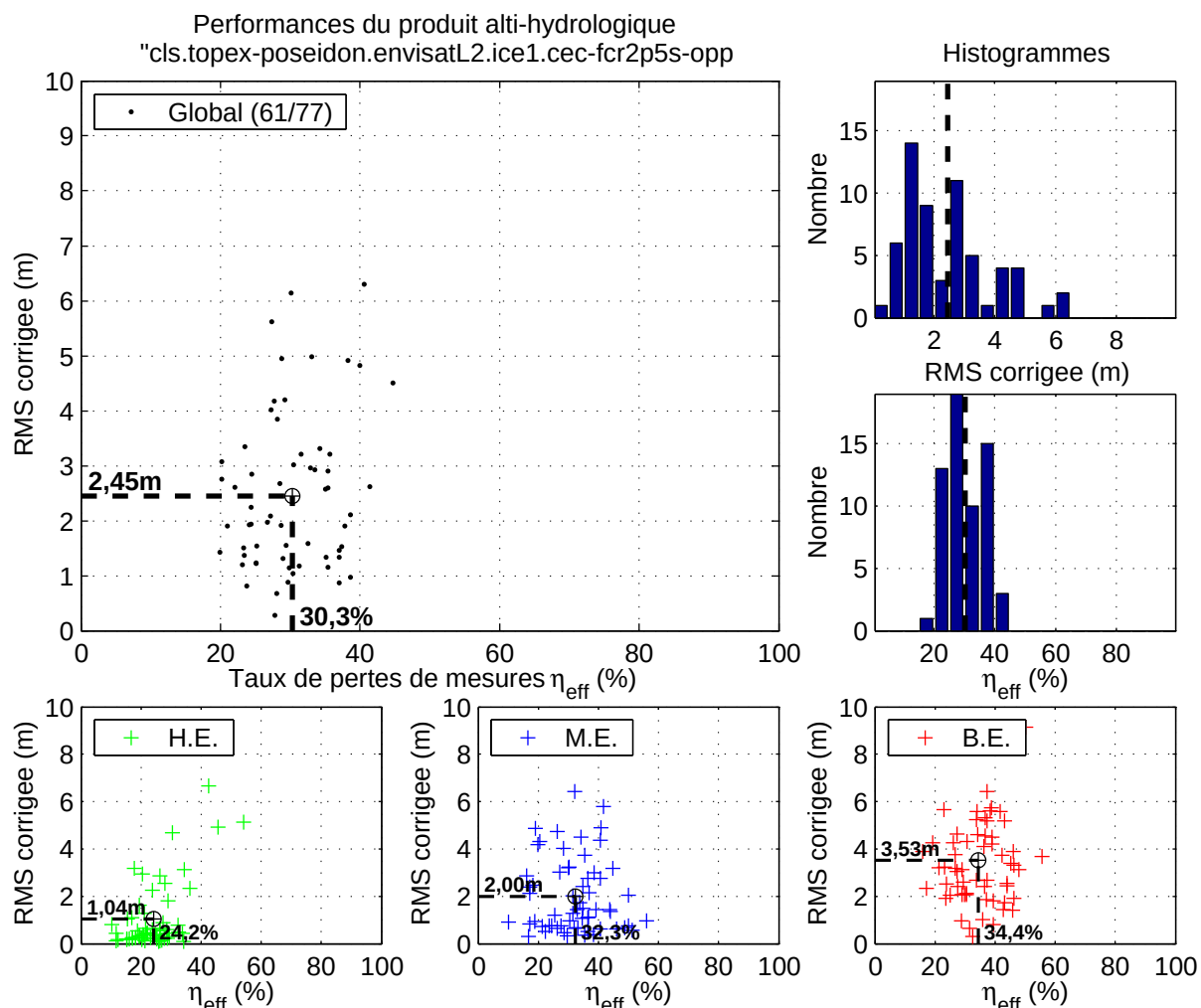


FIG. B.32: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice1/cec-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,45	2,28	0,77	14,3	30,3	2,49	2,32	1,68	0,37
Hautes eaux	1,04	1,04	-0,00	13,3	24,2	1,06	1,07	0,90	0,21
Moyennes eaux	2,00	1,83	0,55	15,0	32,3	2,03	1,89	1,46	0,38
Basses eaux	3,53	2,80	1,90	15,4	34,4	3,54	2,83	2,80	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\tilde{N}_{CA} = 6,6$; $\overline{M}_a = 199,5$ ($\overline{\eta_a} = 81,5\%$)

TAB. B.32: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fcr2p5s-opp ».

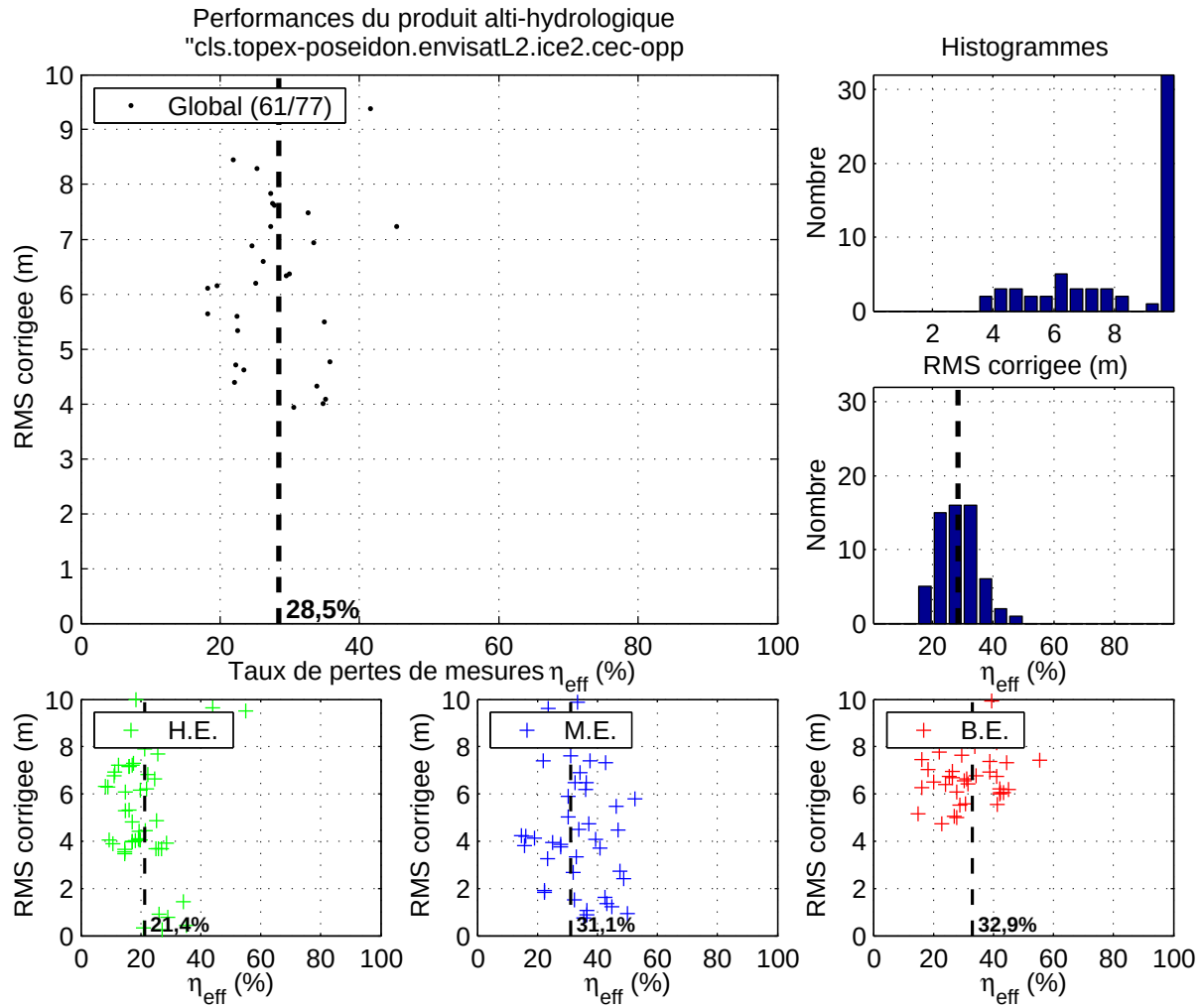


FIG. B.33: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice2/cec-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	116,99	116,57	2,69	14,0	28,5	116,99	116,58	12,79	0,37
Hautes eaux	57,55	57,74	-0,00	12,8	21,4	57,21	57,75	10,10	0,21
Moyennes eaux	73,96	65,70	-1,37	14,7	31,1	73,59	65,73	8,73	0,38
Basses eaux	123,16	117,50	9,81	15,1	32,9	122,35	117,51	19,91	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 205,4$ ($\overline{\eta_a} = 81,6\%$)									

TAB. B.33: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp ».

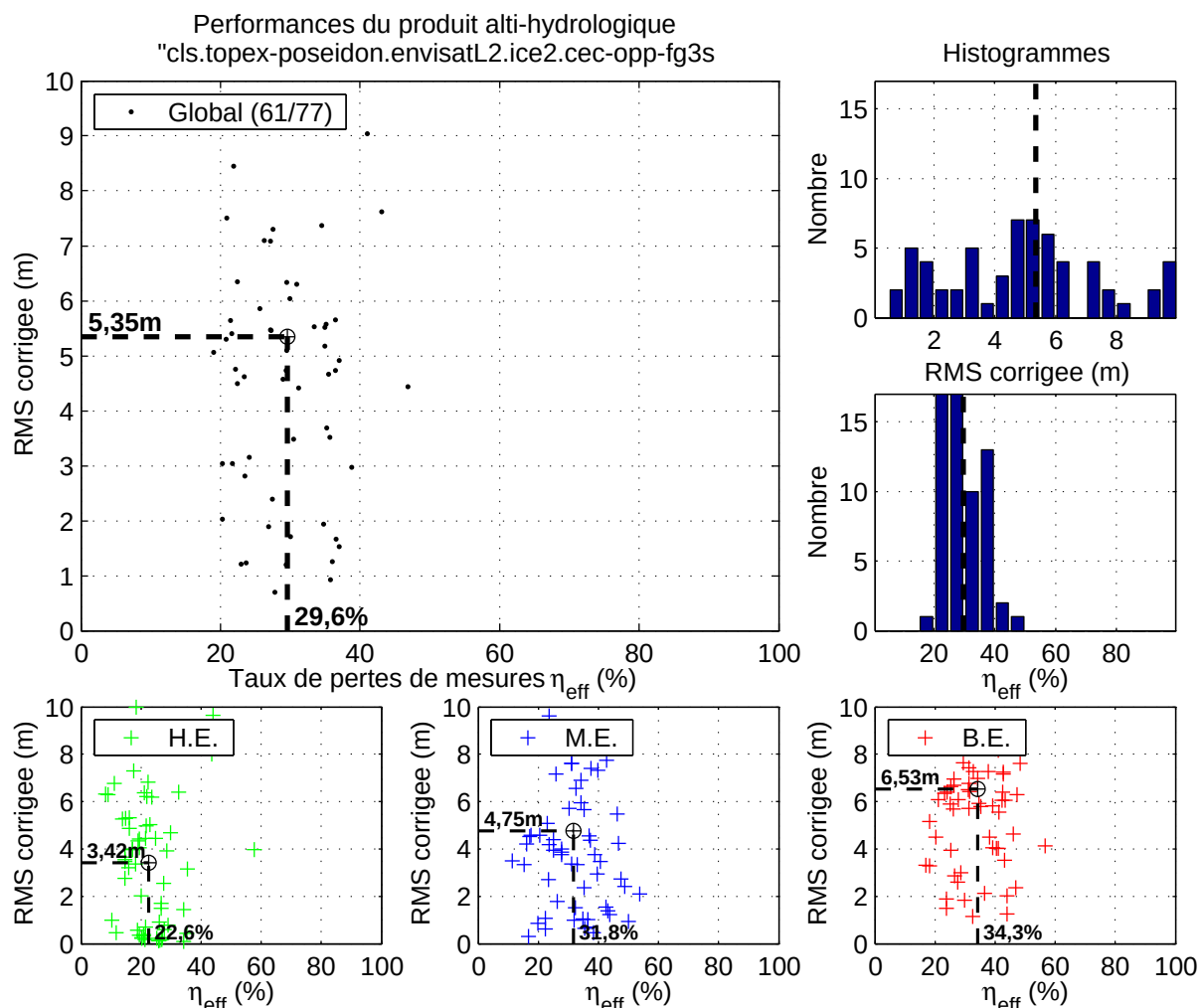


FIG. B.34: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fg3s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice2/cec-opp-fg3s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	5,35	5,32	0,43	14,2	29,6	5,37	5,35	0,57	0,37
Hautes eaux	3,42	3,43	-0,00	13,0	22,6	3,42	3,45	0,14	0,21
Moyennes eaux	4,75	4,62	0,48	14,8	31,8	4,75	4,66	0,61	0,38
Basses eaux	6,53	6,40	0,89	15,4	34,3	6,51	6,42	1,03	0,38

$\overline{\eta_d} = 77,0\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,2\% ; \widetilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 201,9 (\overline{\eta_a} = 81,6\%)$

TAB. B.34: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fg3s ».

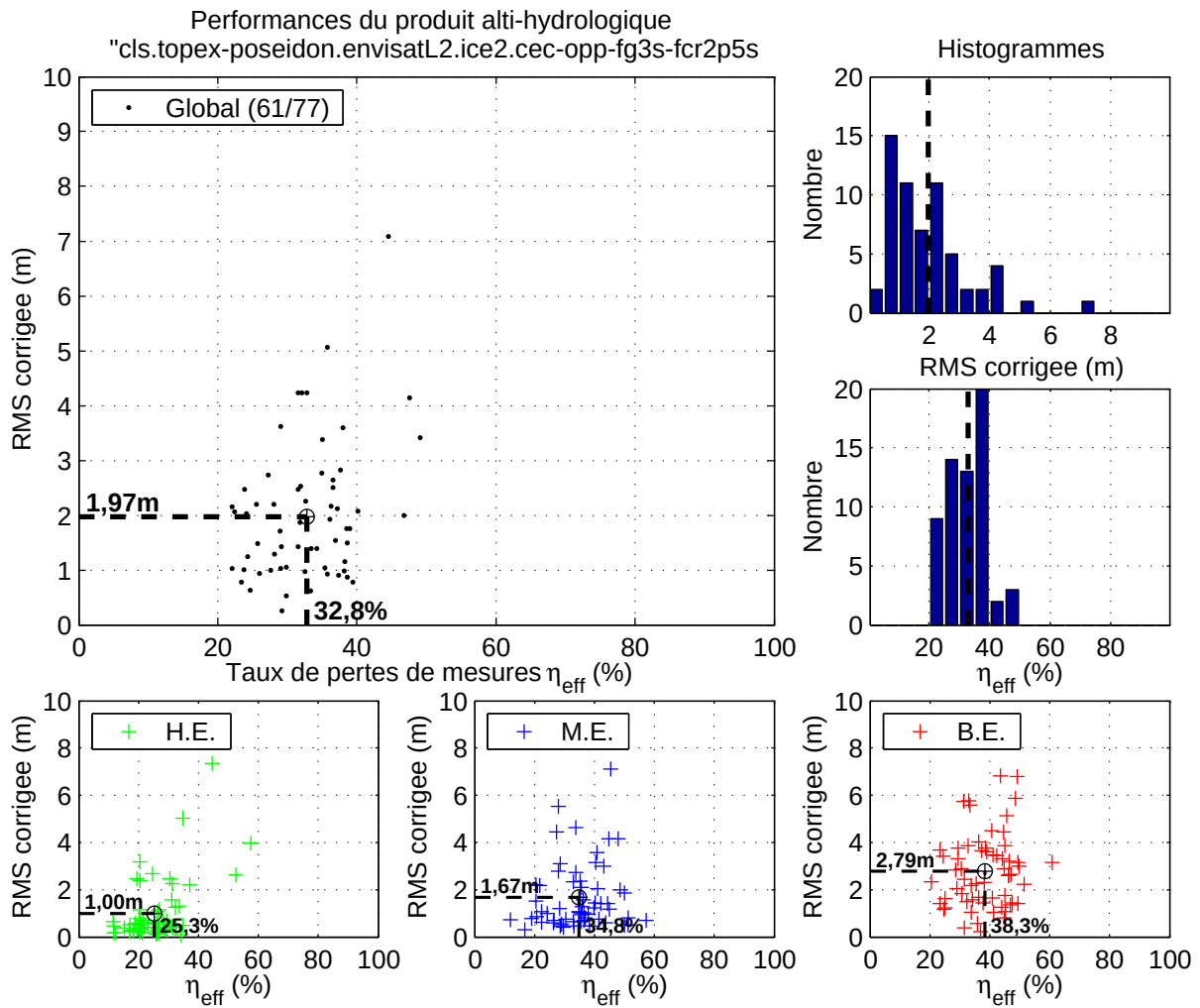


FIG. B.35: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice2/cec-opp-fg3s-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,97	1,92	0,33	14,9	32,8	2,02	1,97	0,85	0,37
Hautes eaux	1,00	1,00	-0,00	13,5	25,3	1,03	1,04	0,52	0,21
Moyennes eaux	1,67	1,59	0,18	15,6	34,8	1,71	1,65	0,70	0,38
Basses eaux	2,79	2,55	0,89	16,4	38,3	2,81	2,59	1,41	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 192,1 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$									

TAB. B.35: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

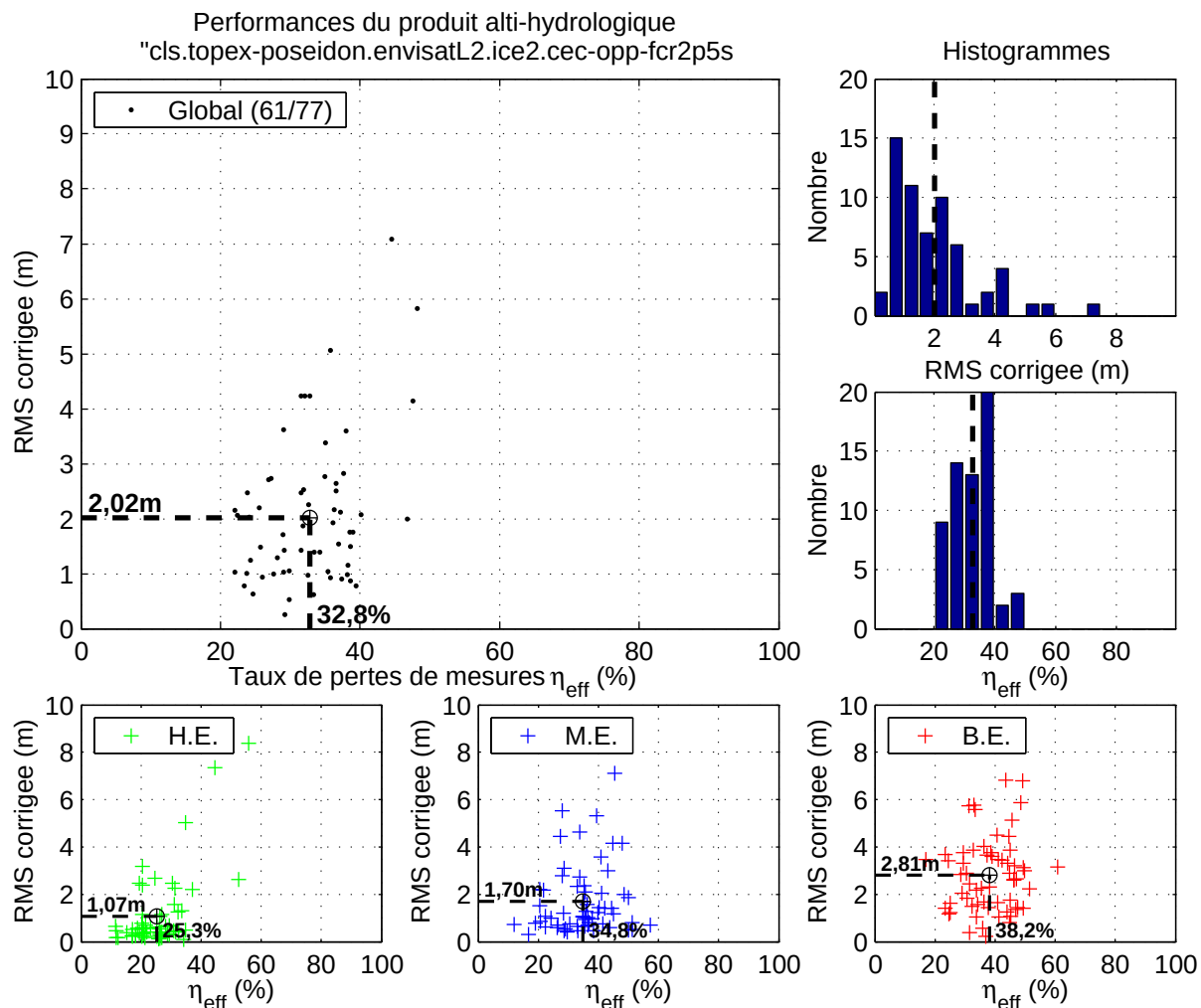


FIG. B.36: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fcr2p5s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice2/cec-opp-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	2,02	1,97	0,33	14,9	32,8	2,07	2,02	0,85	0,37
Hautes eaux	1,07	1,07	-0,00	13,5	25,3	1,10	1,11	0,52	0,21
Moyennes eaux	1,70	1,63	0,17	15,6	34,8	1,75	1,69	0,69	0,38
Basses eaux	2,81	2,57	0,88	16,4	38,2	2,83	2,61	1,40	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 192,2 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$

TAB. B.36: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fcr2p5s ».

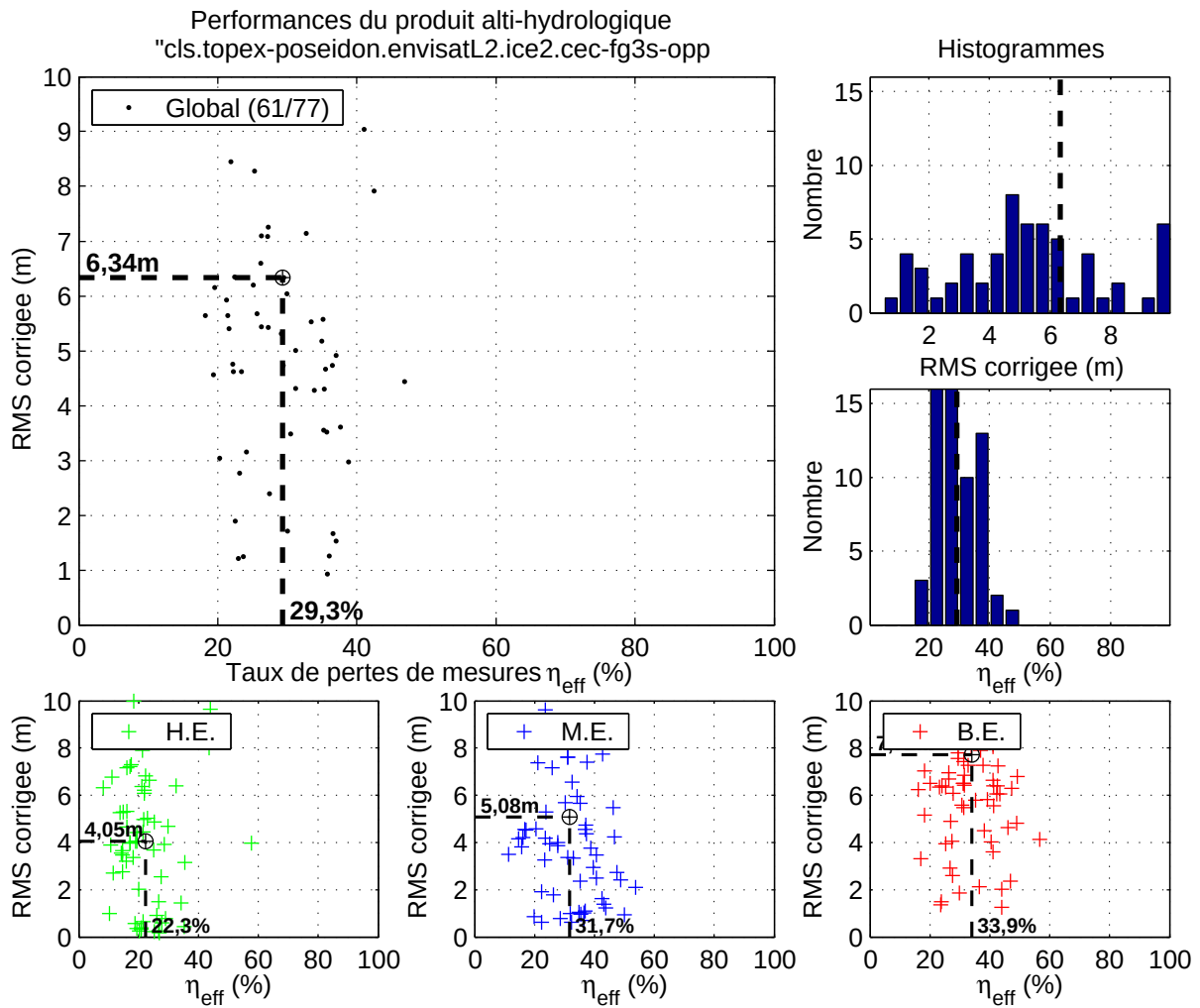


FIG. B.37: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fg3s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice2/cec-fg3s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	6,34	6,30	0,56	14,2	29,3	6,36	6,32	0,57	0,37
Hautes eaux	4,05	4,06	-0,00	13,0	22,3	4,04	4,08	0,01	0,21
Moyennes eaux	5,08	4,92	0,64	14,8	31,7	5,08	4,95	0,65	0,38
Basses eaux	7,72	7,56	1,12	15,3	33,9	7,69	7,58	1,13	0,38
$\overline{\eta_d} = 77,0\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 202,7 (\overline{\eta_a} = 81,6\%)$									

TAB. B.37: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fg3s-opp ».

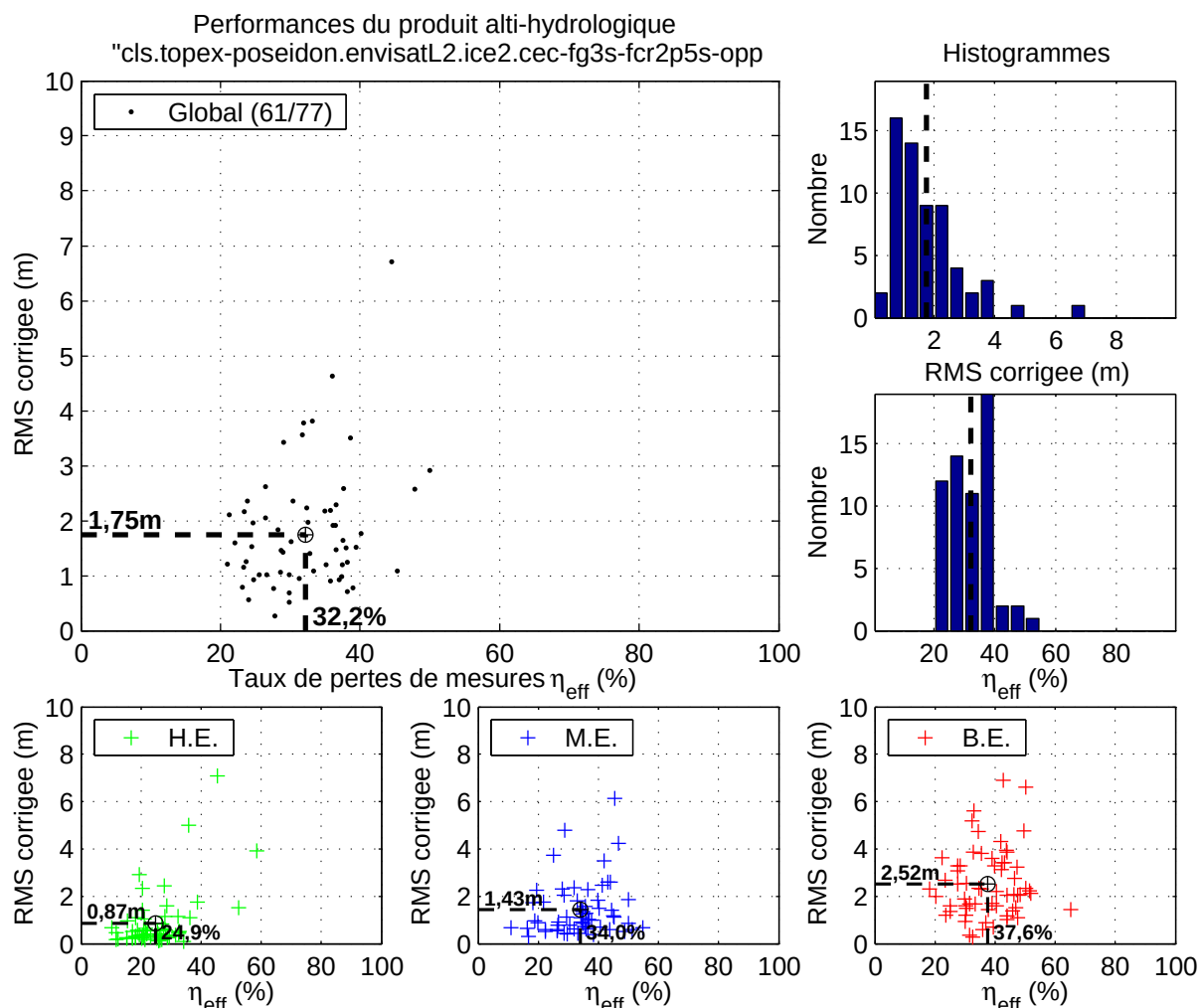


FIG. B.38: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice2/cec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,75	1,69	0,34	14,8	32,2	1,80	1,74	0,88	0,37
Hautes eaux	0,87	0,87	-0,00	13,5	24,9	0,90	0,90	0,54	0,21
Moyennes eaux	1,43	1,35	0,20	15,4	34,0	1,48	1,41	0,73	0,38
Basses eaux	2,52	2,24	0,92	16,3	37,6	2,54	2,29	1,45	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\tilde{N}_{CA} = 6,6$; $\overline{M_a} = 193,8$ ($\overline{\eta_a} = 81,5\%$)

TAB. B.38: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

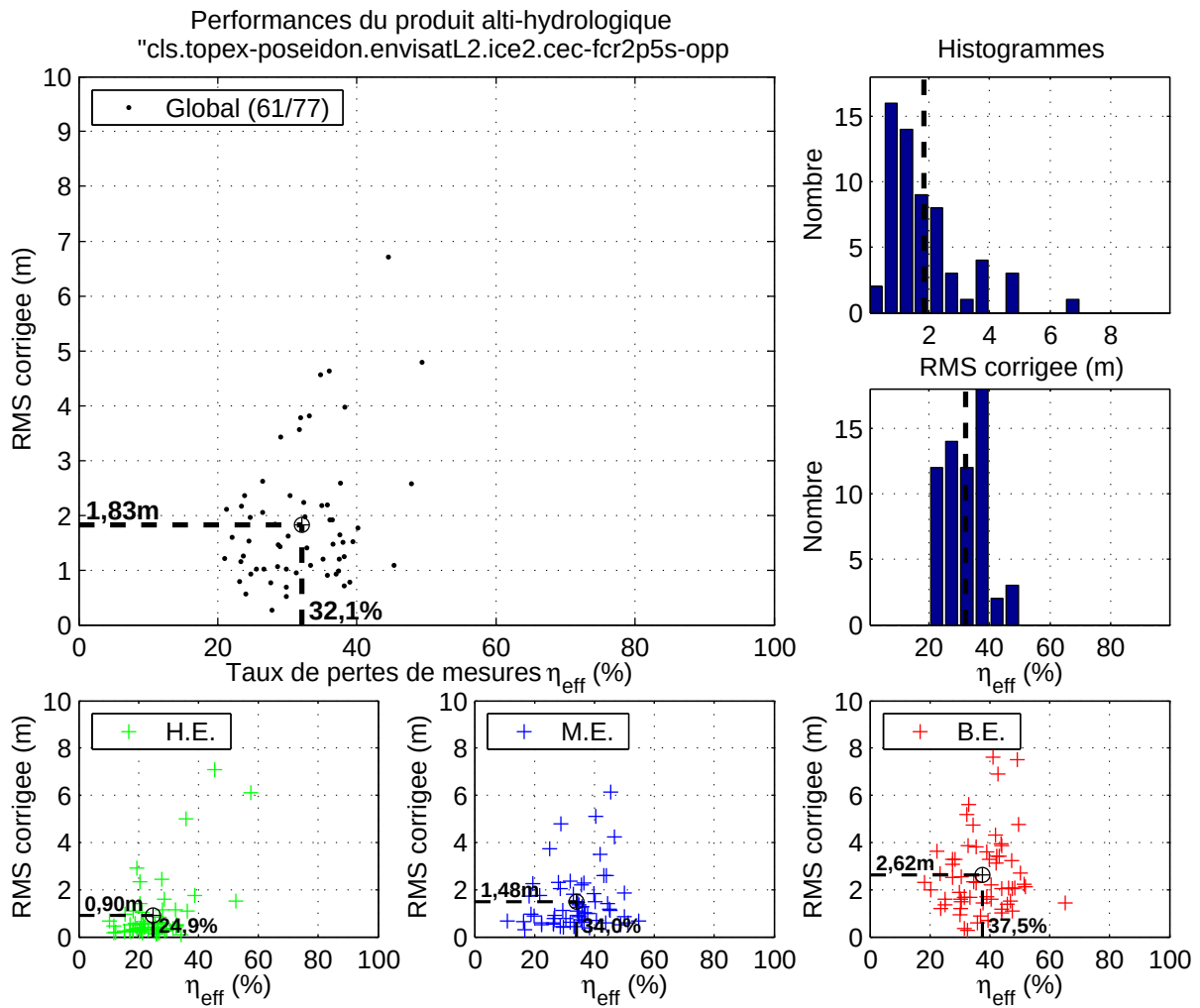


FIG. B.39: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/ice2/cec-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,83	1,77	0,34	14,8	32,1	1,88	1,82	0,86	0,37
Hautes eaux	0,90	0,90	-0,00	13,4	24,9	0,93	0,94	0,52	0,21
Moyennes eaux	1,48	1,41	0,20	15,4	34,0	1,53	1,47	0,72	0,38
Basses eaux	2,62	2,35	0,90	16,2	37,5	2,64	2,40	1,42	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \widetilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M}_a = 193,9 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$									

TAB. B.39: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fcr2p5s-opp ».

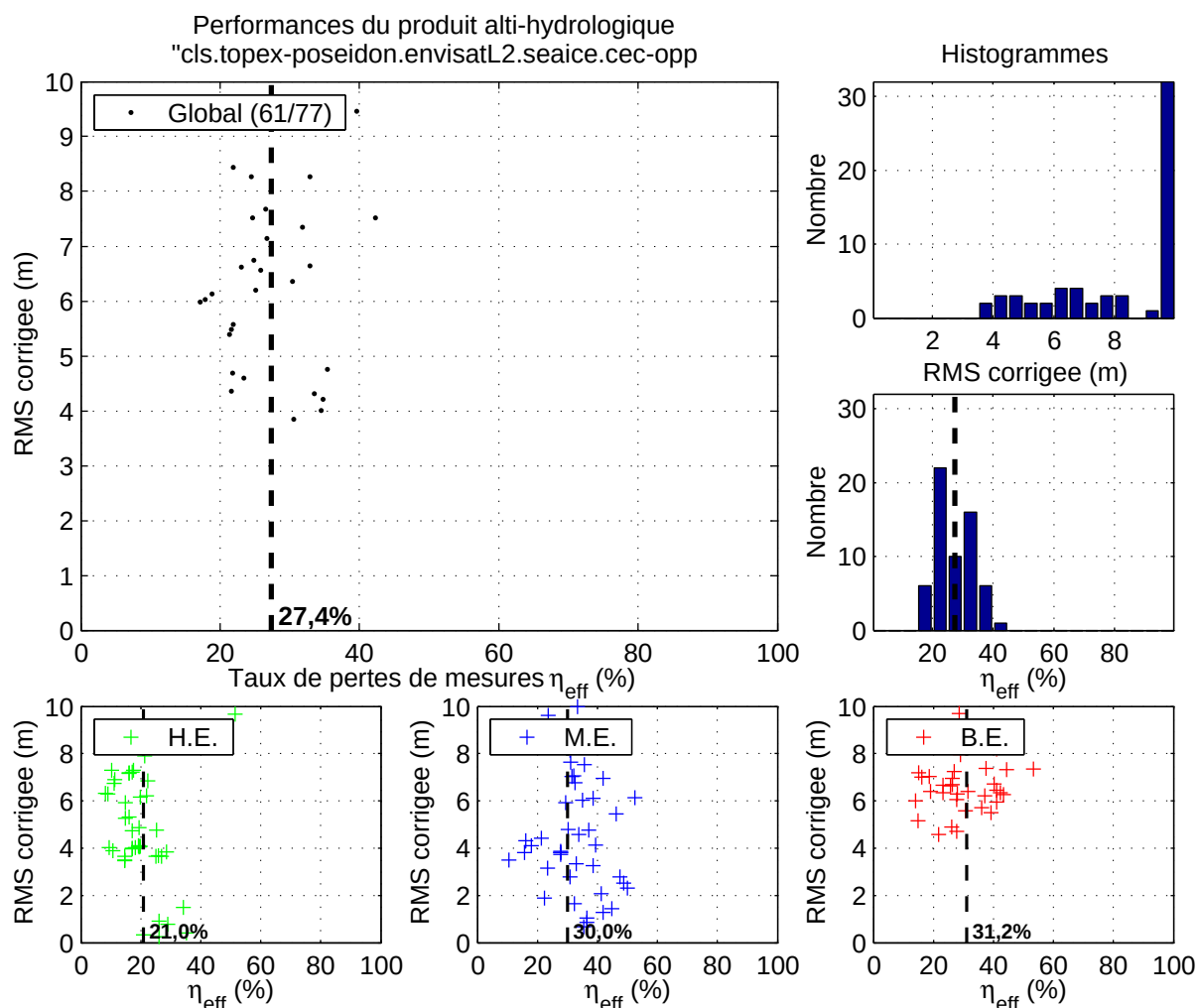


FIG. B.40: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/seaice/cec-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\epsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\epsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\epsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$RMS_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\epsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\epsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	131,39	131,07	1,05	13,8	27,4	131,40	131,08	16,07	0,37
Hautes eaux	76,95	77,18	-0,00	12,7	21,0	76,54	77,19	15,02	0,21
Moyennes eaux	66,09	60,67	-7,13	14,5	30,0	65,85	60,70	7,89	0,38
Basses eaux	159,79	157,59	11,43	14,6	31,2	158,76	157,60	26,45	0,38

$\overline{\eta_d} = 77,1\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\overline{N_{CA}} = 6,6$; $\overline{M_a} = 208,7$ ($\overline{\eta_a} = 81,6\%$)

TAB. B.40: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp ».

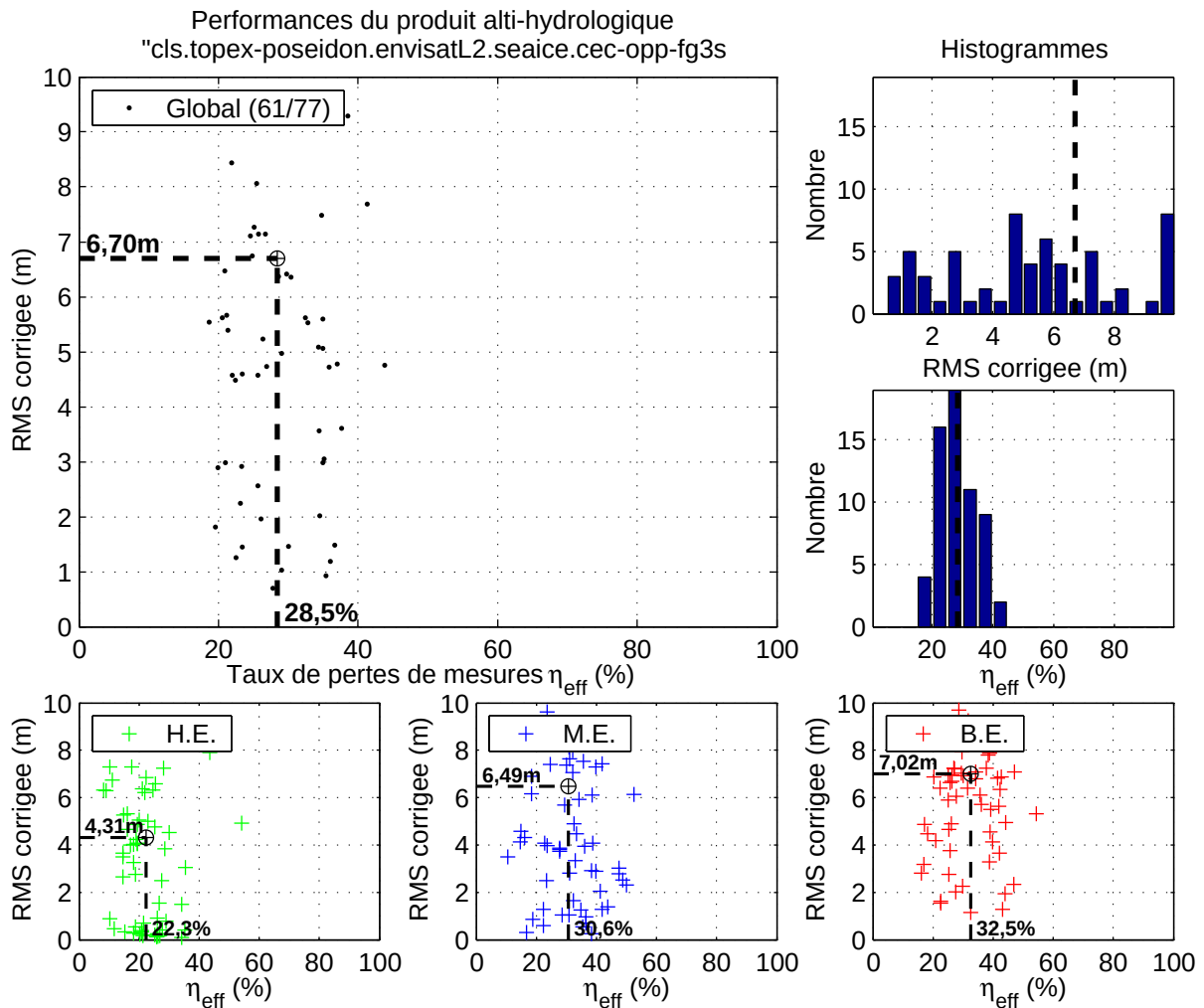


FIG. B.41: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fg3s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/seaice/cec-opp-fg3s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ (m)	$\hat{\mu}_{\varepsilon}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	6,70	6,66	0,50	14,0	28,5	6,72	6,69	0,68	0,37
Hautes eaux	4,31	4,32	0,00	12,9	22,3	4,31	4,34	0,18	0,21
Moyennes eaux	6,49	6,35	0,74	14,6	30,6	6,47	6,38	0,91	0,38
Basses eaux	7,02	6,83	0,82	14,9	32,5	6,99	6,85	1,00	0,38

$\overline{\eta_d} = 77,0\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 205,3 (\overline{\eta_a} = 81,6\%)$

TAB. B.41: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fg3s ».

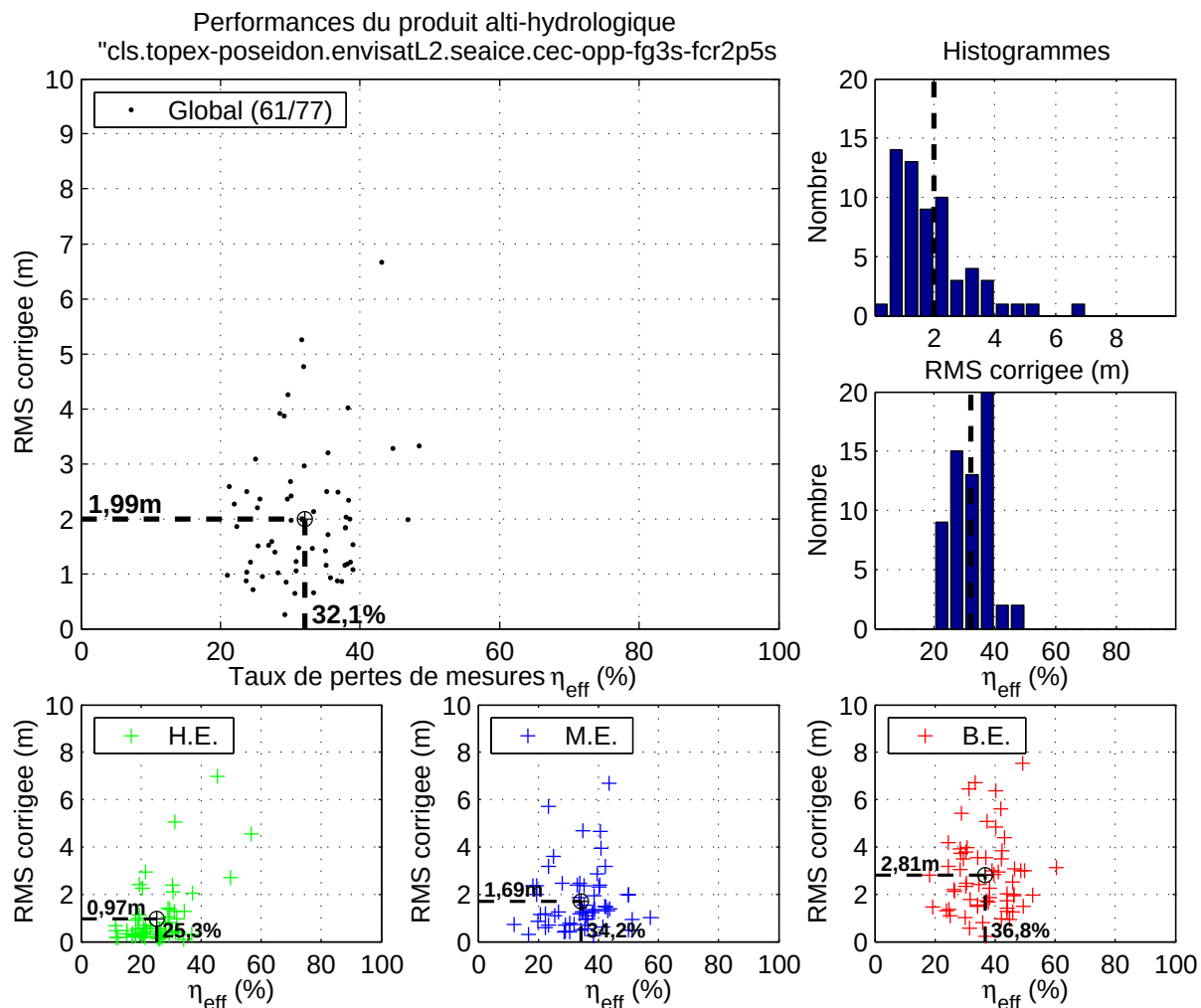


FIG. B.42: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/seaice/cec-opp-fg3s-fcr2p5s »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,99	1,93	0,40	14,7	32,1	2,04	1,98	0,83	0,37
Hautes eaux	0,97	0,97	-0,00	13,5	25,3	1,00	1,01	0,43	0,21
Moyennes eaux	1,69	1,61	0,28	15,4	34,2	1,74	1,66	0,71	0,38
Basses eaux	2,81	2,53	0,98	16,0	36,8	2,83	2,57	1,41	0,38

$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 194,4 (\overline{\eta_a} = 81,4\%)$

TAB. B.42: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fg3s-fcr2p5s ».

FIG. B.44: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fg3s-opp ».

TAB. B.44: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fg3s-opp ».

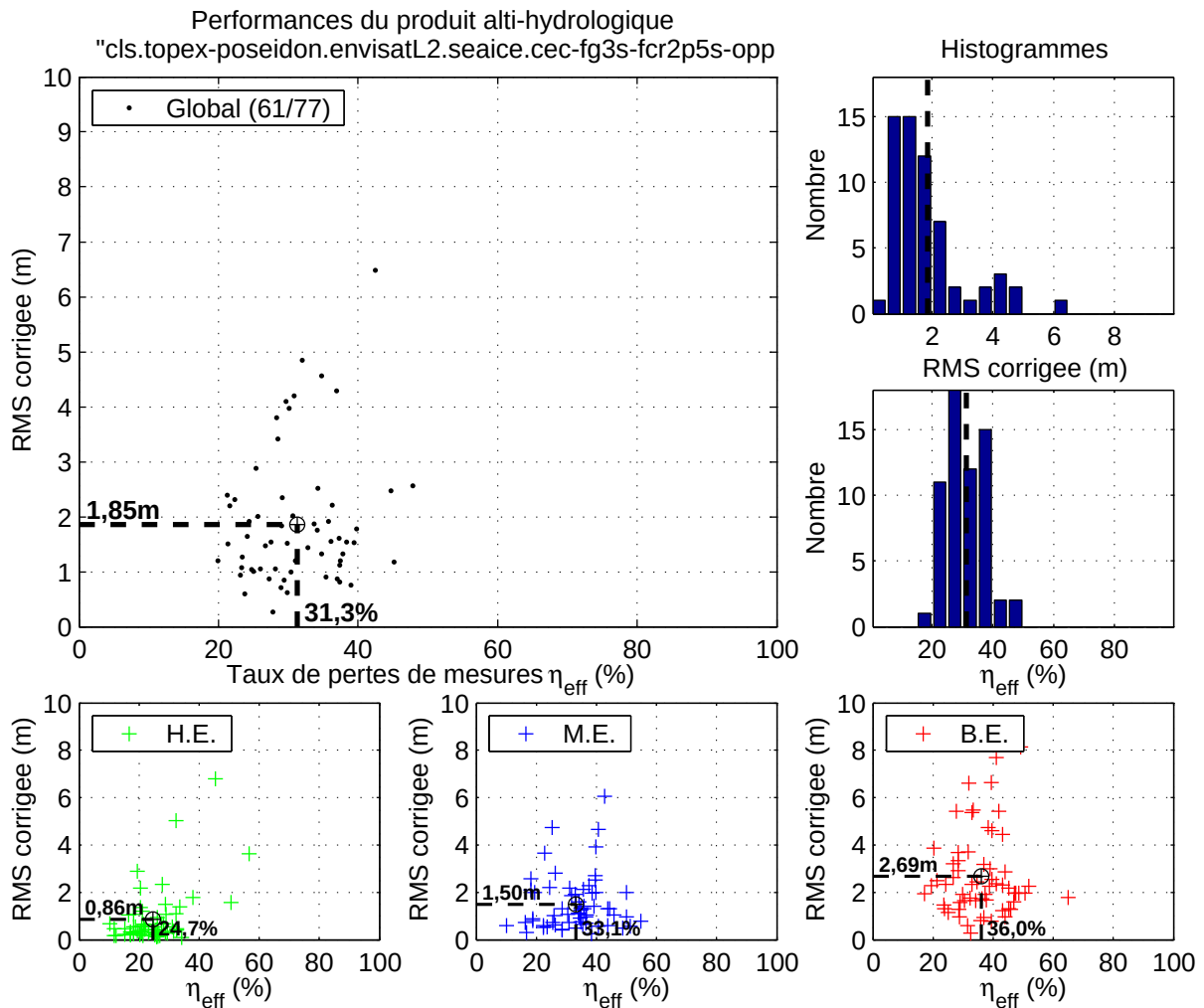


FIG. B.45: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/seaice/cec-fg3s-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,85	1,79	0,39	14,6	31,3	1,90	1,84	0,82	0,37
Hautes eaux	0,86	0,86	-0,00	13,4	24,7	0,89	0,90	0,43	0,21
Moyennes eaux	1,50	1,41	0,27	15,1	33,1	1,55	1,47	0,70	0,38
Basses eaux	2,69	2,39	0,96	15,8	36,0	2,72	2,44	1,39	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\%$; $\overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\%$; $\tilde{N}_{CA} = 6,6$; $\overline{M_a} = 196,6$ ($\overline{\eta_a} = 81,5\%$)									

TAB. B.45: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fg3s-fcr2p5s-opp ».

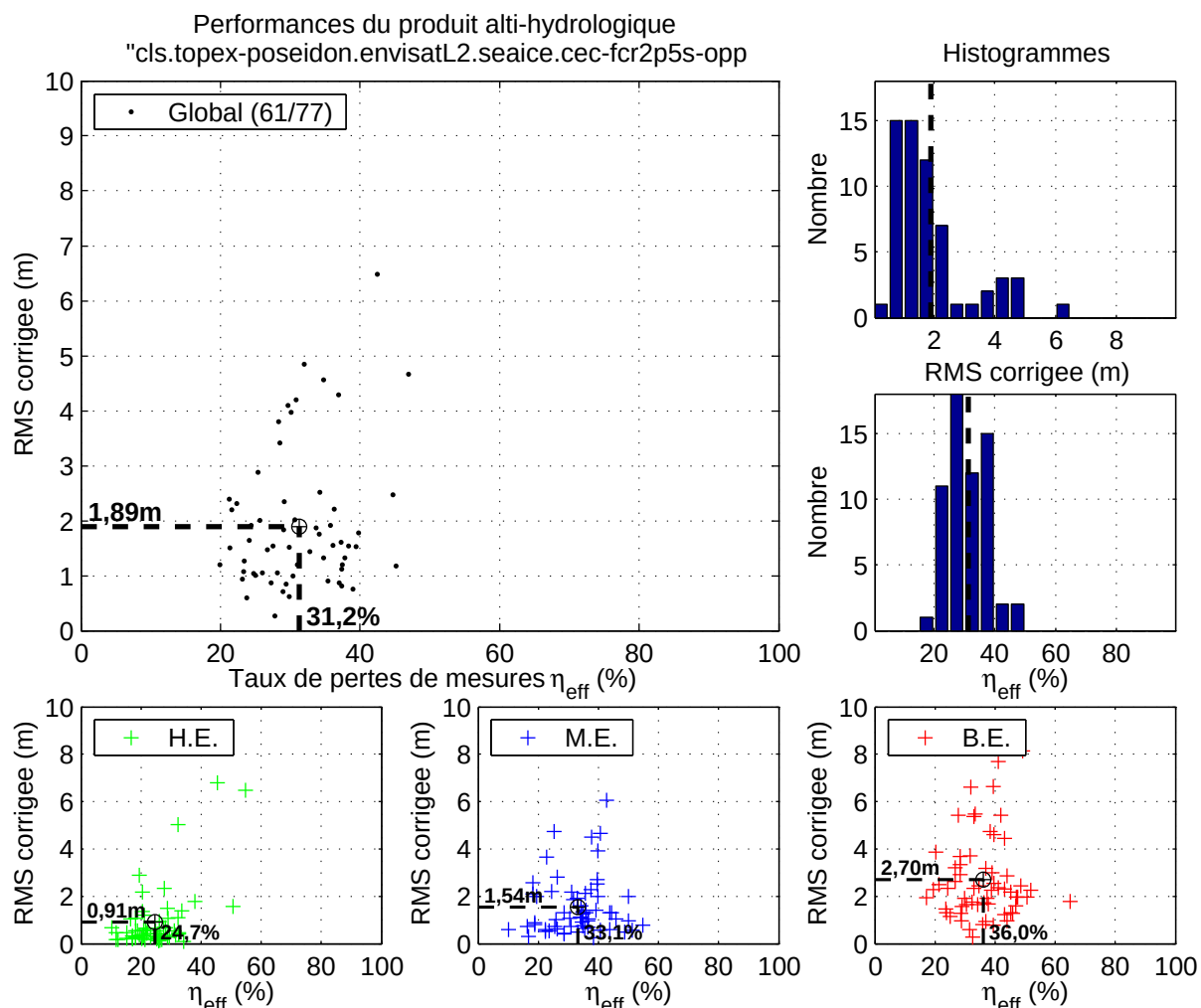


FIG. B.46: Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fcr2p5s-opp ».

Indicateurs de qualité moyens aux 61 stations virtuelles du produit alti-hydrologique « CLS/envisatL2/seaice/cec-fcr2p5s-opp »									
	Indicateurs finaux					Indicateurs intermédiaires approximés/estimés			
	$\widehat{RMS}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\sigma}_\varepsilon$ (m)	$\hat{\mu}_\varepsilon$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)	$\widehat{RMS}_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}}$ (m)	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{\text{Rec}}}$ (m)
Global	1,89	1,82	0,40	14,6	31,2	1,94	1,87	0,81	0,37
Hautes eaux	0,91	0,91	0,00	13,4	24,7	0,94	0,95	0,41	0,21
Moyennes eaux	1,54	1,45	0,28	15,1	33,1	1,59	1,51	0,70	0,38
Basses eaux	2,70	2,39	0,97	15,8	36,0	2,72	2,44	1,39	0,38
$\overline{\eta_d} = 76,8\% ; \overline{\mathcal{I}_H} = 95,3\% ; \tilde{N}_{CA} = 6,6 ; \overline{M_a} = 196,7 (\overline{\eta_a} = 81,5\%)$									

TAB. B.46: Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fcr2p5s-opp ».

Annexe C

Environnement informatique et musical

C.1 Environnement logiciel

Les travaux de cette thèse ont été intégralement effectués sous des systèmes d'exploitation GNU/Linux¹ (à base de noyaux Linux² et des outils logiciels du projet GNU) et d'environnements graphiques de la suite KDE³. J'ai pour cela utilisé les distributions GNU/Linux Fedora Core⁴ (versions 2, 3, 4, 5 et 6) et Debian⁵ (Lenny/testing/unstable) au fil de la thèse. D'une manière générale j'ai fait appel à de nombreux logiciels libres qui offrent l'interopérabilité, la robustesse et la souplesse indispensables au bon déroulement d'une thèse scientifique. Que les développeurs de ces logiciels libres en soient remerciés.

Ce manuscrit de thèse a été rédigé sous NEdit⁶ (Nirvana Editor), éditeur de texte simple mais puissant (*"pour les personnes qui passent 8 heures par jour devant leur écran"*, comme le précisent ses auteurs), mis en page et compilé à l'aide de L^AT_EX et visualisé avec Ghostview⁷. Les manuels suivants ont été d'une grande utilité : [Baudoin, 1997], [Reckdahl, 2006].

Certaines figures ont été réalisées et/ou améliorées à l'aide de la suite OpenOffice.org⁸ (Impress & Draw) et de The Gimp⁹ puis exportées au format "Encapsuled PostScript" à l'aide notamment du puissant utilitaire convert¹⁰.

La plupart des schémas ont été réalisés à l'aide de Dia¹¹ et OpenOffice.org/Draw.

Le logiciel GoogleEarth¹² a été utilisé pour bons nombres de tâches liées au géoréférencement des stations de mesures limnimétriques, stations virtuelles, orbites des satellites et pour la localisation des mesures altimétriques individuelles. Il a également été utilisé pour générer un certain nombre de figures de ce manuscrit.

Le logiciel Matlab¹³ a été utilisé pour développer la quasi totalité des programmes qui ont permis la réalisation de cette thèse (36370 lignes de code, auxquelles s'ajoutent 38907 autres lignes issues de codes externes partagés par la communauté des développeurs Matlab). Un ensemble de classes d'objets ont été construites pour représenter, stocker sur disque et traiter les stations virtuelles et les séries temporelles

¹<http://www.gnu.org>

²<http://www.linux.org>, <http://www.kernel.org>

³<http://www.kde.org>

⁴<http://fedoraproject.org>

⁵<http://www.debian.org>

⁶<http://www.nedit.org>

⁷<http://pages.cs.wisc.edu/~ghost/>

⁸<http://www.openoffice.org>

⁹<http://www.gimp.org>

¹⁰<http://www.imagemagick.org>

¹¹<http://live.gnome.org/Dia>

¹²<http://earth.google.fr>

¹³<http://www.mathworks.com>

altimétriques et in-situ. Quelques codes écrits en langage C (17793 lignes de code) ont été intégrés à Matlab sous la forme de bibliothèques dynamiques (Mex-files) afin d'optimiser les temps de calcul des méthodes d'interpolations polynômiales, et, d'exécutables externes pour la lecture des données binaires du produit altimétrique AVISO/M-GDR (Topex/Poseidon).

Les programmes développées en C++ ont été compilés à l'aide de gcc¹⁴ (pour "GNU C Compiler"), notamment pour la lecture des produits altimétriques AVISO/M-GDR.

Le système de sauvegarde et de versions incrémentales Subversion¹⁵ a été utilisé pour versionner les codes sources des langages Matlab, L^AT_EX et C/C++.

Enfin, les logiciels grip¹⁶ (extraction de CDs audios), XMMS¹⁷ puis AmaroK¹⁸ ont été utilisés pour l'écoute de la musique sans laquelle la rédaction de ce mémoire n'aurait pu être si agréable.

C.2 Environnement matériel

Les travaux de cette thèse ne demandent pas de ressources informatiques très importantes en comparaison, par exemple, avec les applications en traitement des images actuelles. Cependant, un minimum de mémoire vive est nécessaire à la manipulation de nombreux objets en mémoire (objets « série temporelles ») ainsi qu'un espace de stockage important afin de pouvoir stocker tous les produits altimétriques puisqu'il ne serait pas concevable d'utiliser les produits à partir de CD/DVDRom fournis.

Par exemple, le produit AVISO/M-GDR/Topex/Poseidon nécessite un espace disque de 75Go, le produit AVISO/GDR/Jason-1 67Go (cycles 1 à 231) et le produit CLS 23Go.

La station de travail qui a été utilisée est ordinateur de type PC à base de processeur Intel (compatible i686) Xeon cadencé à 3.20GHz, équipé de 3Go de DDRam dual-channel et d'un disque dur de 160Go (SCSI 15000tours/min) pour le système d'exploitation et les données utilisateurs. Le disque dur dédié au stockage des données est un disque dur IDE (ATA100 7500tours/min) d'une capacité de 300Go.

C.3 La musique qui a accompagné la rédaction de cette thèse

Notation : Artiste. "Album", année.

- AC/DC. "Let there be Rock", 1977.
- AC/DC. "Back in black", 1980.
- Björk. "debut", 1993.
- Björk. "post", 1995.
- Björk. "homogenic", 1997.
- Björk. "Selmasongs", 2000.
- Björk. "Vespertine", 2001.
- Björk. "Volta", 2007.
- Bowie, David. "The rize and the fall of Ziggy Stardust and the Spiders from Mars", 1971.
- Buckley, Jeff. "Grace", 1994.
- Buckley, Jeff. "Sketches from My sweet heart the drunk", 1998.
- Buckley, Tim. "Dream Letter Live in London 1968", 1968.
- Buckley, Tim. "Blue afternoon", 1970.
- Camel. "Mirage", 1974.
- Coldplay. "Parachutes", 2000.
- Coldplay. "A rush of blood to the head", 2002.

¹⁴<http://gcc.gnu.org>

¹⁵<http://subversion.tigris.org>

¹⁶<http://www.nostatic.org/grip>

¹⁷<http://www.xmms.org>

¹⁸<http://amarok.kde.org>

- Collignon, Médéric. "Porgy & Bess", 2006.
- Croze, Pauline. "Pauline Croze", 2005.
- Dan Nimmer Trio. "Tea for two", 2005.
- Dire Straits. "Communiqué", 1978.
- Dream Theater. "Octavarium", 2005.
- Dream Theater. "Systematic Chaos", [1, 2, 3 & 5], 2007.
- Echoes. "The entrance is everywhere", 2003. (autoproduction : <http://echoes.rouen.free.fr>).
- Echoes. "Rachel", 2007. (autoproduction : <http://www.echoes-rachel.fr.nf>).
- E.S.T. (Esbjörn Svensson Trio). "Tuesday wonderland", 2006.
- E.S.T. (Esbjörn Svensson Trio). "Leucocyte", 2008.
- Galliano, Richard (Septet). "Piazzolla forever", 2003.
- Galliano, Richard (Tangaria Quartet). "Live in Marciac 2006", 2006.
- Galliano, Richard. "Love day", 2008.
- Garcia, Jerry & Grisman, David. "Garcia & Grisman", 1991.
- Genesis. "Selling England by the pound", 1973.
- Gilmour, David. "About face", 1984.
- Gilmour, David. "On an island", 2006.
- Ginkobiloba. "Mamacita", 2002.
- Godin, Christophe. "Metal Kartoon", 2005.
- Hackett, Steve. "Voyage of the Acolyte", 1975.
- Hendrix, Jimi. "Are you experienced ?", 1967.
- Hendrix, Jimi. "Axis : Bold as Love", 1967.
- Hendrix, Jimi. "Electric Ladyland", 1969.
- Hendrix, Jimi. "Radio One", 1986.
- Hirota, Joji. "Japanese folksongs", 2007.
- Interpol. "Turn on the bright lights", 2002.
- Interpol. "Antics", 2004.
- Interpol. "Our love to admire", 2007.
- Lhasa. "La llorona", 1997.
- Marianne Aya Omac. "Be my witness", 2008.
- Mano Solo. "Dehors", 2000.
- Mano Solo. "In the garden", 2007.
- Mes Anjes Noires. "Mes Anjes Noires", 2002.
- Mes Anjes Noires. "Le phare des allumés", 2005.
- Mes Anjes Noires. "Le cirque des vivants", 2008.
- Muse. "Showbiz", 1999.
- Muse. "Origin of symmetry", 2001.
- Nirvana. "Unplugged", 1994.
- Pain of Salvation. "Be", 2004.
- Phillips, Anthony. "The geese & the ghost", 1977.
- Pink Floyd. "Atom heart mother", 1970.
- Pink Floyd. "Meddle", 1971.
- Pink Floyd. "Dark side of the Moon", 1973.
- Pink Floyd. "Wish you were here", 1975.
- Pink Floyd. "Animals", 1977.
- Pink Floyd. "The Wall", 1979.
- Pink Floyd. "The Final Cut", 1983.
- Premiata, Forneria, Marconi (PFM). "Per un amico", 1972.
- Premiata, Forneria, Marconi (PFM). "Stati di immaginazione", 2006.
- Supertramp. "Crime of the century". 1974.
- Téléphone. "Un autre monde", 1984.
- The Rolling Stones. "Sticky fingers", 1971.

- Trust. "Répression", 1980.
- Vai, Steve. "Passion & warfare", 1990.
- Wilco. "Kicking television, live in Chicago", 2005.
- Wings. "Venus ans Mars", 1975.
- Wright, Richard. "Broken China", 1996.
- Yes. "Close to the edge", 1972.

Table des figures

1.1	Chronologie des principales missions altimétriques de 1978 à nos jours et à venir	20
1.2	Illustration de la couverture des missions altimétriques Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, ERS-1/2 et ENVISAT.	21
1.3	Précision des orbites des principales missions satellitaires d'altimétrie radar nadir	22
1.4	Illustration de la formation au cours du temps de l'onde radar réfléchie par la surface au nadir	23
1.5	Principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir	24
1.6	Le satellite altimètre Topex/Poseidon	25
1.7	Traces des deux orbites de Topex/Poseidon pour les périodes 1992-2002 et 2002-2005 . .	26
1.8	Le satellite altimètre Jason-1	26
1.9	L'altimètre Poseidon 2 qui équipe Jason-1	26
1.10	Le satellite altimètre Jason-2	27
1.11	Schéma d'ensemble du satellite ERS-1 et de ses instruments de mesures	28
1.12	Schéma d'ensemble du satellite ERS-2 et de ses instruments de mesures	28
1.13	Schéma d'ensemble du satellite ENVISAT et de ses instruments de mesures	29
1.14	Anomalie de la topographie des océans par rapport à la moyenne annuelle (1993-2000) .	30
1.15	Carte du niveau moyen global des océans	31
1.16	Carte de la topographie dynamique des océans et des courants marins de surface	32
1.18	Illustration de la formation au cours du temps de l'onde radar réfléchie par une surface continentale	37
1.19	Photo satellite du lac Ontario et des traces des satellites Topex/Poseidon et ENVISAT. . .	40
1.20	Série temporelle alti-hydrologique du satellite Topex/Poseidon sur la lac Ontario fournie par le projet « Global Reservoir and Lake Monitor »	40
2.1	Illustration d'un réseau hydrométrique et d'un réseau hydrographique	48
2.2	Illustration des traces de Topex/Poseidon et de stations virtuelles	50
2.3	Mesures altimétriques individuelles à 10Hz collectées par Topex/Poseidon sur la période 1992-2002 et limites Est/Ouest de la trace 63	57
2.4	Illustration des traces pour un cycle complet de Topex/Poseidon	58
2.5	Exemple de série temporelle mesurée in-situ	61
2.6	Carte des 302 stations limnimétriques du bassin amazonien (Brésil) fournissant des mesures de niveaux des cours d'eau	62
2.7	Illustration schématique de la structure d'un produit altimétrique	64
3.1	Schémas pour le passage du système LLA vers ECEF et réciproquement	74
3.2	Illustration des coordonnées de mesures altimétriques individuelles et d'une mesure altimétrique d'enregistrement	76
3.3	Schéma simplifié de l'algorithme de détermination de l'enregistrement altimétrique à utiliser pour l'interpolation des variables nécessaires à la construction des mesures altimétriques individuelles	78
3.4	Illustration d'une fenêtre géographique d'extraction	80
3.5	Illustration d'une série temporelle altimétrique extraite depuis une fenêtre géographique d'extraction	80

3.6	Illustration du processus de sélection d'une mesure par passage du satellite	83
3.7	Illustration du filtrage global sur une série temporelle	85
3.8	Illustration du gabarit utilisé par le filtrage calendaire	88
3.9	Illustration du filtrage calendaire sur une série temporelle altimétrique	88
3.10	Illustration du gabarit utilisé par le filtrage calendaire récursif	89
3.11	Illustration du filtrage calendaire récursif sur une série temporelle altimétrique	89
3.12	Illustration de la dispersion des groupes de mesures altimétriques, pour chaque passage du satellite	90
3.13	Illustration schématique de la méthode de construction des séries temporelles altimétriques constitutantes d'un produit alti-hydrologique	91
4.1	Schéma complet d'implantation de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques et du parcours des données	104
5.1	Histogramme des distances des stations virtuelles aux stations limnimétriques les plus proches	108
5.2	Illustration du profil de la ligne d'eau des fleuves Solimões et Amazone à différentes dates	110
5.3	Carte des stations limnimétriques utilisées pour l'illustration du profil de la ligne d'eau .	110
5.4	Exemple de reconstitution d'une série temporelle in-situ à la station virtuelle « TP-076A-Solimoes »	115
5.5	Carte des stations limnimétriques et virtuelle de la figure 5.4	115
5.6	Conversion de l'heure locale mesurée en un point du globe en heure UTC : décalage horaire déduit de la longitude	117
5.7	Illustration de l'appariement des mesures altimétriques et des mesures in-situ reconstituées	119
5.8	Illustration de la série temporelle in-situ reconstituée sur l'horizon de la série temporelle altimétrique et de la série temporelle de l'erreur pour deux exemples de stations virtuelles	123
5.9	Illustration du découpage en trois périodes hydrologiques	126
5.10	Exemple de série temporelle de l'erreur des mesures altimétriques selon les trois périodes hydrologiques	127
6.1	Illustration de l'erreur de reconstitution sur la station limnimétrique d'Obidos	136
6.2	Schéma de quantification de l'erreur de reconstitution des séries temporelles in-situ . . .	138
6.3	Histogrammes des indicateurs de précision de reconstitution quantifiés sur les stations limnimétriques de test	142
6.4	Comparaisons des fonctions linéaire et puissance	143
6.5	Histogrammes de l'erreur résiduelle des quatre modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$	148
6.6	Histogrammes de l'erreur résiduelle des quatre modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	150
6.7	Illustration des valeurs réelles et estimées de l'indicateur $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ pour les stations limnimétriques de test	151
6.8	Histogramme des valeurs de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ estimées pour les stations virtuelles	156
6.9	Schéma détaillé de l'étape 5 de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques	157
6.10	Illustration du biais systématique entre une série temporelle alti-hydrologique et une série temporelle mesurée in-situ pour le fleuve Solimões	160
6.11	Détail du processus de correction du biais systématique de hautes eaux	163
6.12	Exemple de série temporelle de l'erreur des mesures altimétriques selon les trois périodes hydrologiques	165
7.1	Schéma des différentes chaînes de génération des produits alti-hydrologiques	175
7.2	Carte des 77 stations virtuelles définies dans le cadre de la thèse (bassin amazonien, orbite de Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2)	177
7.3	Carte des 10 stations virtuelles du projet CASH (bassin amazonien, orbite de Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2)	178

7.4	Carte des 93 stations virtuelles définies pour l'extraction des produits alti-hydrologiques du projet « River & Lake Hydrology » (bassin amazonien, orbite de ERS-2 et ENVISAT)	179
7.5	Carte des 42 stations virtuelles du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT (bassin amazonien, orbite de ERS-2 et ENVISAT)	180
7.6	Carte des 43 stations virtuelles du produit alti-hydrologique RLH/ERS-2 (bassin amazonien, orbite de ERS-2 et ENVISAT)	180
7.7	Carte des 14 stations virtuelles définies par [Birkett et al., 2002] (bassin amazonien, orbite de Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2)	181
7.8	Exemple de représentation graphique synthétique de la qualité d'un produit alti-hydrologique	185
7.9	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique CASH (Topex/Poseidon)	189
7.10	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ENVISAT	191
7.11	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ERS-2	193
7.12	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique [~Birkett 2002] (Topex/Poseidon)	195
7.13	Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe AVISO M-GDR, tracker Ocean (Topex/Poseidon)	197
7.14	Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ice1 (Topex/Poseidon)	199
7.15	Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ice2 (Topex/Poseidon)	201
7.16	Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ocean (Topex/Poseidon)	203
7.17	Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker SeaIce (Topex/Poseidon)	205
7.18	Figure de synthèse pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2 et utilisant le mélange des quatre retracker Ice1, Ice2, Ocean et SeaIce (Topex/Poseidon)	207
7.19	Comparaison de performances des familles de produits alti-hydrologiques pour le groupe CLS/ENVISAT-L2/SeaIce	210
7.20	Comparaison des performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique	213
7.21	Illustration des 7 options de fenêtrage pour la station virtuelle « TP-178A-Madeira »	214
7.22	Comparaison des performances de 7 méthodes de fenêtrage géographique	215
7.23	Comparaison brute de la qualité de 10 produits alti-hydrologiques sur des jeux hétérogènes de stations virtuelles	217
7.24	Histogrammes des largeurs de rivières aux stations virtuelles des 10 produits alti-hydrologiques	218
7.25	Carte des 8 stations virtuelles sur lesquelles sont comparés les 9 produits alti-hydrologiques CASH, AVISO, CLS et River & Lake Hydrology	219
7.26	Comparaison de la qualité des 9 produits alti-hydrologiques CASH, AVISO, CLS et River & Lake Hydrology sur un jeu homogène de 8 stations virtuelles	220
7.27	Comparaison de la qualité de 10 produits alti-hydrologiques sur le système fluvial Solimões-Amazone	222
7.28	Histogrammes des largeurs de rivières aux stations virtuelles des 10 produits alti-hydrologiques (comparaison système fluvial Solimões-Amazone)	223
8.1	Relation entre précision RMS et largeur du fleuve pour le produit alti-hydrologique AVISO/M-GDR/Ocean (Topex/Poseidon)	229
8.2	Modèles globaux : Modèle multivariable d'estimation de l'erreur RMS pour le produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR	232
8.3	Modèles saisonniers : Modèle multivariable d'estimation de l'erreur RMS pour le produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR	232

8.4	Comparaison entre les valeurs réelles des indicateurs de qualité RMS et η_{eff} du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR aux valeurs issues des modèles globaux et saisonniers	233
8.5	Relation entre précision RMS et largeur du fleuve pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology (ENVISAT)	234
8.6	Modèles globaux : Modèle multivariable d'estimation de l'erreur RMS pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT	236
8.7	Modèles saisonniers : Modèle multivariable d'estimation de l'erreur RMS pour le produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT	236
8.8	Comparaison entre les valeurs réelles des indicateurs de qualité RMS et η_{eff} du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT aux valeurs issues des modèles globaux et saisonniers	237
8.9	Illustration de la construction d'un modèle de précision des mesures alti-hydrologiques et de son application.	239
8.10	Illustration de la construction d'un modèle d'incertitude des mesures alti-hydrologiques et de son application.	240
8.11	Organigramme des méthodes de détermination de l'incertitude des mesures alti-hydrologiques	242
8.12	Illustration de séries temporelles alti-hydrologiques « AVISO » et « River & Lake Hydrology » avec valeurs d'incertitude associées	243
9.1	Illustration des méthodes suréchantillonnage par interpolations « linéaire » et « polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie »	248
9.2	Séries temporelles mesurées in-situ et leurs transformées de Fourier	250
9.3	Illustration de l'impact de la largeur de bande spectrale prise en compte pour mettre en œuvre la méthode d'interpolation à bande spectrale limitée	253
9.4	Illustration des méthodes suréchantillonnage par interpolations « linéaire » et « polynomiale de degré 4 à contrainte de minimisation d'énergie »	256
9.5	« Qualité hydrologique » en fonction des indicateurs de précision d'un produit alti-hydrologique	258
9.6	Illustration des effets couplés d'un bruit de mesure d'un sous échantillonnage sur une série temporelle alti-hydrologique suréchantillonnée	259
9.7	Illustration des effets couplés d'un bruit de mesure d'un sous échantillonnage sur une série temporelle alti-hydrologique suréchantillonnée	260
9.9	Estimation de la « qualité hydrologique » pour des produits alti-hydrologiques.	263
9.10	Illustration de séries temporelles alti-hydrologiques « AVISO » et « River & Lake Hydrology » avec valeurs d'incertitude associées	265
9.11	Illustration de séries temporelles alti-hydrologiques « AVISO » et « River & Lake Hydrology » avec valeurs d'incertitude associées	266
10.1	Aperçu de la mission SWOT	272
10.2	Exemple de reconstitution du champ $Z(x, t)$ basé sur des mesures in-situ	273
B.1	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique CASH (Topex/Poseidon)	286
B.2	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology (ENVISAT)	287
B.3	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology (ERS-2)	288
B.4	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique [~Birkett 2002]	289
B.5	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp »	290
B.6	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fg3s »	291
B.7	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fg3s-fcr2p5s »	292
B.8	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fcr2p5s »	293

B.9	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fg3s-opp »	294
B.10	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fg3s-fcr2p5s-opp »	295
B.11	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fcr2p5s-opp »	296
B.12	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp »	297
B.13	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fg3s »	298
B.14	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	299
B.15	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fcr2p5s »	300
B.16	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-fg3s-opp »	301
B.17	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	302
B.18	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-fcr2p5s-opp »	303
B.19	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp »	304
B.20	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fg3s »	305
B.21	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	306
B.22	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fcr2p5s »	307
B.23	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fg3s-opp »	308
B.24	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	309
B.25	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fcr2p5s-opp »	310
B.26	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp »	311
B.27	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fg3s »	312
B.28	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	313
B.29	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fcr2p5s »	314
B.30	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fg3s-opp »	315
B.31	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	316
B.32	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fcr2p5s-opp »	317
B.33	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp »	318
B.34	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fg3s »	319

B.35	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	320
B.36	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fcr2p5s »	321
B.37	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fg3s-opp »	322
B.38	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	323
B.39	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fcr2p5s-opp »	324
B.40	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp »	325
B.41	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fg3s »	326
B.42	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	327
B.43	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fcr2p5s »	328
B.44	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fg3s-opp »	329
B.45	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	330
B.46	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fcr2p5s-opp »	331

Liste des tableaux

5.1	Table des paramètres et indicateurs obtenus pour les deux exemples de stations virtuelles	123
5.2	Exemple d'indicateurs de qualité approximatés	127
6.1	Nombres de stations limnimétriques utilisées par les 77 différentes stations virtuelles de Topex/Poseidon	138
6.2	Valeurs des indicateurs de précision de l'erreur de reconstitution obtenues sur les configurations de test sélectionnées	141
6.3	Table des valeurs du coefficient r^2 pour les relations monovariabiles déterminant-indicateur de précision de l'erreur de reconstitution	144
6.4	Table récapitulative des paramètres et des coefficients r^2 des modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$	148
6.5	Table récapitulative des paramètres et des coefficients r^2 des modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	150
6.7	Exemple de valeurs de $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ estimées pour les 77 stations virtuelles définies sur la première orbite de Topex/Poseidon	156
6.8	Table récapitulative des paramètres et des coefficients r^2 des modèles d'estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$	158
6.9	Table récapitulative des paramètres et des coefficients r^2 des modèles d'estimation de $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$	158
6.10	Exemple d'indicateurs de qualité (indicateurs de précision corrigés)	165
7.1	Liste des produits alti-hydrologiques traités	176
7.2	Correspondance entre les stations virtuelles de la thèse avec les stations virtuelles du projet CASH et les stations virtuelles de [Birkett et al., 2002]	182
7.3	Nombre de stations virtuelles et/ou séries temporelles alti-hydrologiques écartées de l'analyse de la qualité des produits alti-hydrologiques	184
7.4	Table des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique CASH	189
7.5	Table des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ENVISAT	191
7.6	Table des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique River & Lake Hydrology/ERS-2	193
7.7	Table des indicateurs de qualité moyens du produit alti-hydrologique [~Birkett 2002]	195
7.8	Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « AVISO/M-GDR/Ocean »	196
7.9	Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe AVISO M-GDR, tracker Ocean (Topex/Poseidon)	197
7.10	Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/Ice1 »	198
7.11	Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ice1 (Topex/Poseidon)	199
7.12	Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/Ice2 »	200
7.13	Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ice2 (Topex/Poseidon)	201

7.14	Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/Ocean »	202
7.15	Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker Ocean (Topex/Poseidon)	203
7.16	Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/SeaIce »	204
7.17	Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2, retracker SeaIce (Topex/Poseidon)	205
7.18	Table des indicateurs de qualité moyens des produits alti-hydrologiques du groupe « CLS/ENVISAT-L2/clsmix »	206
7.19	Table des indicateurs de qualité moyens pour le meilleur produit alti-hydrologique issu du groupe CLS ENVISAT-L2 et utilisant le mélange des quatre trackers Ice1, Ice2, Ocean et SeaIce (Topex/Poseidon).	207
7.20	Table récapitulative des 46 produits alti-hydrologiques	209
7.21	Comparaison des performances de différents (re)trackers pour une même mission altimétrique	213
7.22	Comparaison des performances de 7 méthodes de fenêtrage géographique	215
7.23	Table de comparaison brute des indicateurs de qualité de 10 produits alti-hydrologiques sur des jeux hétérogènes de stations virtuelles	217
7.24	Table de comparaison des indicateurs de qualité des 9 produits alti-hydrologiques CASH, AVISO, CLS et River & Lake Hydrology sur 8 stations virtuelles	220
7.25	Table récapitulative des indicateurs de qualité de 10 produits alti-hydrologiques sur le système fluvial Solimões-Amazone)	222
8.1	Table des coefficients r^2 obtenus entre les déterminants hydromorphologiques des stations virtuelles et les 5 indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR	230
8.2	Modèles globaux : Table des coefficients r^2 et des valeurs d'écart-types de l'erreur résiduelle des modèles d'estimation des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR	232
8.3	Modèles saisonniers : Table des coefficients r^2 et des valeurs d'écart-types de l'erreur résiduelle des modèles d'estimation des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique AVISO/TP/M-GDR	232
8.4	Table des coefficients r^2 obtenus entre les déterminants hydromorphologiques des stations virtuelles et les cinq indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT	234
8.5	Modèles globaux : Table des coefficients r^2 et des valeurs d'écart-types de l'erreur résiduelle des modèles des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT	236
8.6	Modèles saisonniers : Table des coefficients r^2 et des valeurs d'écart-types de l'erreur résiduelle des modèles des indicateurs de qualité du produit alti-hydrologique RLH/ENVISAT	236
9.1	Table des valeurs RMS de l'erreur de suréchantillonnage linéaire et polynomiale à contrainte de minimisation d'énergie	247
9.2	Table des valeurs RMS de l'erreur de suréchantillonnage linéaire et polynomiale à contrainte de minimisation d'énergie	254
9.3	« Qualité hydrologique » en fonction des indicateurs de précision d'un produit alti-hydrologique	258
9.4	Qualité hydrologique des produits alti-hydrologiques AVISO/TP/Ocean et RLH/ENVISAT	262
B.1	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cash.topex-poseidon.netcdf-mixture »	286
B.2	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « rl.envisat.rlh.expert »	287
B.3	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « rl.ers-2.rlh.expert »	288

B.4	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique [~Birkett 2002]	289
B.5	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp »	290
B.6	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fg3s »	291
B.7	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fg3s-fcr2p5s »	292
B.8	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-opp-fcr2p5s »	293
B.9	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fg3s-opp »	294
B.10	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fg3s-fcr2p5s-opp »	295
B.11	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « aviso.topex-poseidon.mgdr.ocean.aec-fcr2p5s-opp »	296
B.12	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp »	297
B.13	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fg3s »	298
B.14	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	299
B.15	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-opp-fcr2p5s »	300
B.16	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-fg3s-opp »	301
B.17	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	302
B.18	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.clsmix.clsmix.cec-fcr2p5s-opp »	303
B.19	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp »	304
B.20	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fg3s »	305
B.21	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	306
B.22	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-opp-fcr2p5s »	307
B.23	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fg3s-opp »	308
B.24	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	309
B.25	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ocean.cec-fcr2p5s-opp »	310
B.26	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp »	311
B.27	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fg3s »	312
B.28	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	313
B.29	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-opp-fcr2p5s »	314

B.30	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fg3s-opp »	315
B.31	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	316
B.32	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice1.cec-fcr2p5s-opp »	317
B.33	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp »	318
B.34	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fg3s »	319
B.35	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	320
B.36	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-opp-fcr2p5s »	321
B.37	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fg3s-opp »	322
B.38	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	323
B.39	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.ice2.cec-fcr2p5s-opp »	324
B.40	Figure de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp »	325
B.41	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fg3s »	326
B.42	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fg3s-fcr2p5s »	327
B.43	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-opp-fcr2p5s »	328
B.44	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fg3s-opp »	329
B.45	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fg3s-fcr2p5s-opp »	330
B.46	Table de synthèse pour le produit alti-hydrologique « cls.topex-poseidon.envisatL2.seaice.cec-fcr2p5s-opp »	331

Bibliographie

- (1996). *AVISO User Handbook, Merged Topex/Poseidon Products (Edition 3.0, July 1996)*. CNES/AVISO.
- (2003). *ENVISAT-1 Products Specifications Volume 14 : RA-2 Products Specifications*. ESA (European Space Agency), ALCATEL Space.
- (2006). *ENVISAT-ERS Exploitation River and Lake Product Product Handbook (issue 2.1, February 2006), DMU-RIVL-SPE-03-110*. ESA, De Montfort University, E.A.P.R.S.
- (2006). *ENVISAT RA2/MWR Product Handbook (issue 2.1, March 2006)*. ESA (European Space Agency).
- ALADIN, N., CRÉTAUX, J.-F., PLOTNIKOV, I. S., KOURAEV, A. V., SMUROV, A. O., CAZENAVE, A., EGOROV, A. N. et PAPA, F. (2005). Modern hydro-biological state of the small aral sea. *Environmetrics*, 16:375–392.
- ALSDORF, D., BIRKETT, C., DUNNE, T., MELACK, J. et HESS, L. (2001). Water level changes in a large amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry. *Geophys. Res. Lett.*, 28, NO.14:2671–2674.
- AFNOR (1994). *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*.
- BAUDOIN, M. (1997). *Apprends LaTeX !*
- BELLANGER, M. (2002). *Traitement numérique du signal, 7^{ème} édition*. Sciences de l'ingénieur. Dunod.
- BERCHER, N. et KOSUTH, P. (2007). Quantifying accuracy and uncertainty, and modelling noise and error of satellite radar altimetry measurement of inland water levels. In *PSIP (Physics in Signal and Image Processing) 2007 proceedings, 8p., Mulhouse (France), 31 January-2 February*.
- BERCHER, N., KOSUTH, P. et BRUNIQUEL, J. (2006). Characterizing the quality of river water level time series derived from satellite altimetry : Efforts towards a standardized methodology. In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry", 12p., Venice (Italy), 13-18 March*.
- BERCHER, N., KOSUTH, P., FRONTERA, V. et MERCIER, F. (2007). "actual accuracy of satellite radar altimetry measurements of inland water levels : still over one meter for large rivers". In *SOGWC 2007, March 2007, Irvine, USA (Poster Session)*.
- BERRY, P. (2006). An original retracking expert system for continental water level monitoring, communication personnelle (mars 2006, venise).
- BERRY, P., BRACKE, H. et JASPER, A. (1997). Retracking ers-1 altimeter waveforms over land for topographic height determination : an expert systems approach. In *3rd ERS SYMPOSIUM Florence 97*.
- BERRY, P., GARLICK, J., FREEMAN, J. et MATHERS, E. (2005). Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophys. Res. Lett.*, 32:L16401, doi :10.1029/2005GL022814.

- BERRY, P., ROGERS, C., GARLICK, J., FREEMAN, J. et BENVENISTE, J. (2006). The envisat burst mode echoes - a new look from satellite radar altimetry. In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry"*,.
- BIRKETT, C. (1995). The contribution of topex/poseidon to the global monitoring of climatically sensitive lakes. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C12).
- BIRKETT, C. (1998). Contribution of the topex nasa radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands. *Water Resources Research*, 34.
- BIRKETT, C. (2000). Synergistic remote sensing of lake chad : variability of basin inundation. *Remote Sensing Environnement*, 72.
- BIRKETT, C. et MASON, I. M. (1995). A new global lakes database for remote sensing programme studying climatically sensitive large lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 21, NO.3.
- BIRKETT, C. M., MERTES, L. A. K., DUNNE, T. et COSTA, M. H. Jasinski, M. J. (2002). Surface water dynamics in the amazon basin : Application of satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D20), 8059, doi :10.1029/2001JD000609.
- BONNET, M., BARROUX, G., MARTINEZ, J., SEYLER, F., MOREIRA-TURCQ, P., COCHONNEAU, G., MELACK, J., BOAVENTURA, G., MAURICE-BOURGOIN, L., LEON, J., ROUX, E., CALMANT, S., KOSUTH, P., GUYOT, J. et SEYLER, P. (2008). Floodplain hydrology in an amazon floodplain lake (lago grande de curuai). *Journal of Hydrology*, 349:18–30.
- BOURGOIN, L. M., BONNET, M.-P., MARTINEZ, J. M., KOSUTH, P., COCHONNEAU, G., MOREIRA-TURCQ, P., GUYOT, J. L., VAUCHEL, P., FILIZOLA, N. et SEYLER, F. (2007). Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the curuai floodplain and the amazon river. *Journal of Hydrology*, 335, issues 1-2:140–156.
- BRENNER, A. C., KOBLINSKY, C. J. et ZWALLY, H. J. (1993). Postprocessing of satellite altimetry return signals for improved sea surface topography accuracy. *Journal of Geophysical Research*, 98:933–944.
- BROOKS2002 (1982). Lake elevation from satellite radar altimetry : a validation over area in canada. *Geosci. Res. Corp., Salsbury, Maryland, USA*.
- BROWN, G. S. (1977). The average impulse response of a rough surface and its application. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, AP 25 (N1):67–74.
- CABANES, C., CAZENAVE, A. et LE PROVOST, C. (2001). Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations. *Science (reprint)*, 294.
- CALMANT, S. et SEYLER, F. (2006). Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes rendus. Géoscience*, 338, no 14-15:1113–1122.
- CARFANTAN, H. (2007). Interpolation de signaux irrégulièrement échantillonné à bande spectrale limitée, communication personnelle (juillet 2007).
- CAUHOPÉ, M., GENNERO, M.-C., DOMINH, K., CRÉTAUX, J. F., BERGÉ-NGUYEN, M., CAZENAVE, A. et SEYLER, F. (2006). Worldwide validation of satellite altimetry-based water level time series. In *Geophysical Research Abstracts (Poster Session)*, volume 8.
- CAZENAVE, A. (1999). Present-day variations of the mean sea level. *Earth and Planetary Sciences*, 329:457–469.
- CAZENAVE, A., DOMINH, F., GENNERO, M., FERRET, B. et BROSSIER, C. (1998). Global mean sea level changes observed by topex-poseidon and ers-1. *Physics and chemistry of the Earth*, 23.

- CAZENAVE, A., LOMBARD, A. et LLOVEL, W. (2008). Present-day sea level rise : A synthesis. *Comptes Rendus Geosciences*, 340(11):761–770.
- CAZENAVE, A. et NEREM, S. (2002). Redistributing earth's mass. *Science*, 297:783–784.
- CHELTON, D., RIES, J., HAINES, B., FU, L.-L. et CALLAHAN, P. (2001). *Satellite Altimetry*. In : Fu, L.-L., Cazenave, A. (Eds), *Satellite altimetry and Earth sciences*, volume 69 de *International geophysics*, chapitre 1, pages 1–131. Academic press.
- CHENG, K.-C., KUO, C.-Y., SHUM, C., NIU, X., LI, R. et BEDFORD, K. (2008). Accurate linking of lake erie water level with shoreline datum using gps buoy and satellite altimetry. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, No. 1-2:53–62.
- COE, M. et BIRKETT, C. (2005). Calculation of river discharge and prediction of lake height from satellite radar altimetry : Example for the lake chad basin. *Water Resources Research*, 40.
- COE, M., COSTA, M., BOTTA, A. et BIRKETT, C. (2002). Long-term simulations of discharge and floods in the amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, 107.
- COX, C. et CHAO, B. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. *Science*, 297:831–833.
- CRÉTAUX, J. et BIRKETT, C. (2006). Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geosciences*, 338, Issues 14-15, La Terre observée depuis l'espace, November-December 2006:1098–1112, doi :10.1016/j.crte.2006.08.002.
- CRÉTAUX, J.-F., KOURAEV, A., PAPA, F., BERGÉ NGUYEN, M., CAZENAVE, A., ALADIN, N. et PLOTNIKOV, I. (2005). Water balance of the big aral sea from satellite remote sensing and in situ observations. *J. Great Lakes Res.*, 31 (4).
- DE OLIVEIRA CAMPOS, I., MERCIER, F., MAHEU, C., COCHENNEAU, G., KOSUTH, P., BLITZKOW, D. et CAZENAVE, A. (2001). Temporal variations of river basin waters from topex/poseidon satellite altimetry. application to the amazon basin. *Earth and planetary sciences*, 333.
- DENG, X. et FEATHERSTONE, W. E. (2006). A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms : Application to ers-2 around australia. *J. Geophys. Res.*, 111, C06012:13.4.1–13.4.8.
- DOMINH, K., LETOAN, T., CAZENAVE, A., MOGNARD-CAMPBELL, N. et LHERMITTE, J. (2004). Seasonal fluctuations of surface water levels in the mekong river basin from satellite altimetry and other remote sensing data. In *AGU Spring Meeting Abstracts*, pages A3+.
- ENJOLRAS, V. (2007). *Evaluation des performances des nouveaux instruments radar altimètres imageurs interférométriques spatiaux. Application à l'océanographie et à l'hydrologie*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aréonautique et de l'Espace.
- ENJOLRAS, V. et RODRIGUEZ, E. (2006). Using altimetry waveform data and ancillary information from srtm, landsat and modis to retrieve river characteristics. *IEEE Trans. on Rem. Sens.*, Submitted.
- ESCUDIER, P., PICOT, N. et ZANIFE, O. (2001). Altimeter ionosphere correction using doris doppler data. In *IUGG meeting, Vienna*.
- FRAPPART, F., CALMANT, S., CAUHOPÉ, M., SEYLER, F. et CAZENAVE, A. (2006). Preliminary results of envisat ra-2 derived water levels validation over the amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, 100:252–264.
- FRAPPART, F., SEYLER, F., MARTINEZ, J.-M., LEON, J. G. et CAZENAVE, A. (2005). Floodplain water storage in the negro river basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sensing of Environment*, 99:387–399.

- FREY, H. et BRENNER, A. C. (1990). Australian topography from seasat overland altimetry. *Geophysical Research Letters*, 17:1533–1536.
- FU, L.-L. et CAZENAVE, A. (2001). *Satellite altimetry and Earth sciences*, volume 69 de *International geophysics*. Academic press.
- FU, L.-L., CHRISTENSEN, E., YAMARONE JR., C., LEFEBVRE, M., MENARD, Y., DORRER, M. et ESCUDIER, P. (1994). Topex/poseidon mission overview. *Journal of Geophysical Research*, 99:1–43.
- GARLICK, J. D., BERRY, P. A. M., MATHERS, E. L. et BENVENISTE, J. (2005). The Envisat/ERS River and Lake Retracking System. In *Envisat/ERS Symposium*, volume 572 de *ESA Special Publication*.
- GIOVANNELLI, J.-F., IDIER, J., BOUBERTAKH, R. et HERMENT, A. (2002). Unsupervised frequency tracking beyond the nyquist frequency using markov chains. *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 50, NO. 12.
- GUZKOWSKA, M., RAPLEY, C., RIDLEY, J., CUDLIP, W., BIRKETT, C. et SCOTT, R. (1990). Developments in inland water and land altimetry. In *ESA Contract, CR-7839/88/F/FL*.
- HARRISON, J., BERRY, P. A. M. et FREEMAN, J. A. (2006). Assessment of multi-mission radar altimeter performance over the amazon basin. In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry"*.
- HOCKING, R. R. (1976). The analysis and selection of variables in linear regression. *Biometrics*, 32.
- IGN (2008). Fiche ign : "réseau de nivellement". <http://www.ign.fr/telechargement/education/fiches/relief/Rivellement.pdf>.
- JEKELI, C. et DUMRONGCHAI, P. (2003). On monitoring a vertical datum with satellite altimetry and water-level gauge data on large lakes. *Journal of Geodesy*, 77:447–453.
- KIDNER, D., DOREY, M. et SMITH, D. (1999). What's the point ? interpolation and extrapolation with a regular grid dem. In *Geo Computation 1999*. Voir : http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99/Gc99/082/gc_082.htm.
- KOBLINSKY, C. J., CLARKE, R. T., BRENNER, A. C. et FREY, H. (1993). Measurement of river level variations with satellite altimetry. *Water Resources Research*, 29:1839–1848.
- KOSUTH, K., CALLÈDE, J. et LARAQUE, A. (2000). Ocean tide waves propagation along downstream amazon river : Measuring the amazon discharge at the estuary. *ASCE Conference Proceedings, Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management*. Rollin H. Hotchkiss, Michael Glade - Editors, July 30 - August 2, 2000, Minneapolis, Minnesota, USA.
- KOSUTH, P. (2002). Interactions between the amazon river and the atlantic ocean along the downstream reach from parintins to macapa (1000 km). In *II Conferencia Cientifica Internacional do LBA, 7-10 Julho 2002, Manaus, AM, Brasil*.
- KOSUTH, P., BLITZKOW, D., CAZENAVE, A., COCHONNEAU, G., BERCHER, N., de OLIVEIRA, E., e CASTRO JUNIOR, C. A. C., de OLIVEIRA CAMPOS, I., MERCIER, F., SEYLER, F. et CALLÈDE, J. (2008). (en préparation :) establishment of an altimetric reference network over the amazon basin using satellite radar altimetry (topex poseidon).
- KOSUTH, P., BLITZKOW, D. et COCHONNEAU, G. (2006). Establishment of an altimetric reference network over the amazon basin using satellite radar altimetry (topex/poseidon). In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry"*.
- KOSUTH, P., CALLEDE, J., LARAQUE, A., FILIZOLA, N., GUYOT, J. L. et SEYLER, F. (1999). Sea-tide effects on downstream amazon river flows. In *International Symposium on "Hydrology and Geochemistry of large tropical river basins", Manaus'99 Symposium, Nov. 1999, Manaus, Brazil*.

- KOSUTH, P., LARAQUE, A., Sousa da SILVA, M. et FILIZOLA, N. (2003). Downstream amazon river dynamics under oceanic tide influence. *Geophysical Research Abstracts, European Geophysical Society*, 5, 14299, Abstract number EAE03-A-14299.
- KOURAEV, A. V., ZAKHAROVA, E., SAMAIN, O., MOGNARD, N. et CAZENAVE, A. (2004). Ob' river discharge from topex/poseidon satellite altimetry (1992-2002). *Remote Sensing of Environment*, 93: 238–245.
- LEBEDEV, S., SIROTA, A., MEDVEDEV, D., KHLEBNIKOVA, S., VIGNUDELLI, S., SNAITH, H. M., CIPOLLINI, P., VENUTI, F., LYARD, F., BOUFFARD, J., CRETAX, J. F., BIROL, F., ROBLOU, L., KOSTIANOY, A., GINZBURG, A., SHEREMET, N., KUZMINA, E., MAMEDOV, R., ISMATOVA, K., ALYEV, A., et MUSTAFAYEV, B. (2008). Exploiting satellite altimetry in coastal ocean through the alticore project. *Russian Journal of Earth Sciences*, 10, ES1002:11.
- LEGRAND, P., MERCIER, H. et REYNAUD, T. (1998). Combining t/p altimetric data with hydrographic data to estimate the mean dynamic topography of the north atlantic and improve the geoid. *Annales Geophysicae*, Volume 16 (5):638–650.
- LEGRAND, P., SCHRAMA, E. J. O. et TOURNADRE, J. (2003). An inverse estimate of the dynamic topography of the ocean. *Geophysical Research Letters*, 30(0):4.
- LEON, J. G., BONNET, M. P., CAUHOPE, M., CALMANT, S., et SEYLER, F. (2006a). (submitted) distributed water flow estimates of the upper negro river using a muskingum-cunge routing model constrained by satellite altimetry. *J. Hydrol.*
- LEON, J. G., SEYLER, F., CALMANT, S., BONNET, M.-P. et CAUHOPE, M. (2006b). Hydrological parameter estimation for ungauged basin based on satellite altimeter data and discharge modeling. a simulation for the caqueta river (amazonian basin, colombia). *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3:3023–3059.
- LOMBARD, A., CAZENAVE, A., LE TRAON, P. Y. et ISHII, M. (2005). Contribution of thermal expansion to present-day sea level rise revisited. *Global and Planetary Change*, 47:1–16.
- MAHEU, C. et CAZENAVE, A. (2003). Water level fluctuations in the plata basin (south america) from topex/poseidon satellite altimetry. *Geophysical research letters*, 30, n°3.
- MARSH, J. G., BRENNER, A. C., BECKLEY, B. D. et MARTIN, T. V. (1986). Global mean sea surface based upon the seasat altimeter data. *Journal of Geophysical Research*, 91:3501–3506.
- MERCIER, F. (2001). *Altimétrie spatiale sur les eaux continentales : apport des missions TOPEX/POSEIDON et ERS1&2 à l'étude des lacs, mers intérieures et bassins fluviaux*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- MERCIER, F., CAZENAVE, A. et MAHEU, C. (2002). Interannual lake level fluctuations (1993-1999) in africa from topex/poseidon : Connection with ocean-atmosphere interactions over indian ocean. *Global Planet, Change* 32:141–163.
- MERCIER, F. et ZANIFE, O.-Z. (2006). Improvement of the topex/poseidon altimetric data processing for hydrological purposes (cash project). In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry"*.
- MOISAN, L. (2001). Extrapolation de spectre et variation totale pondérée. *Actes du GRETSI*.
- MORRIS, S. M. et GILL, S. K. (1994a). Evaluation of the topex/poseidon altimeter system over the great lakes. *Journal of Geophysical Research*, 99 (C12):24,527–24,539.
- MORRIS, S. M. et GILL, S. K. (1994b). Variation of great lakes water levels derived from geosat altimetry. *Water Resources Research*, 30, NO.4:1009–1017.

- MORROW, R., MÉNARD, Y., BIROL, F., DAILLET-ROCHETTE, S., SUDRE, J., BLAREL, F. et FAILLOT, M. (2006). Ctoh, centre for topographic studies of the oceans and hydrosphere. In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry"*, 12p., Venice (Italy), 13-18 March.
- MYERS, R. (1986). Classical and modern regression with applications. *Duxbury Press (Boston)*, page 30.
- NEREM, R. S., SCHRAMA, E. J., KOBLINSKY, C. J. et BECKLEY, B. D. (1994). A preliminary evaluation of ocean topography from the TOPEX/POSEIDON mission. *Journal of Geophysical Research*, 99: 24565–24583.
- NEREM, S., LEULIETTE, E. et CAZENAVE, A. (2006). Present-day sea level change. *C.R. Geosciences*, 338, issue 14-15:1077–1083.
- NETER, J., KUTNER, M., NACHTSHEIM, C. et WASSERMAN, W. (1996). Applied linear statistical models. *Irwin publishing (Boston)*, 4th ed.:159–163.
- PHALIPPOU, L., CAUBET, E., REY, L., CALVARY, P., MURAT, D., RICHARD, J., ANGINO, G., THOUVENOT, E., CARAYON, G., STEUNOU, N., MAVROCORDATOS, C. et ESCUDIER, P. (2006). 25 years of altimeter developments at alcatel alenia space. In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry"*.
- QUARTLY, G. D. (2000). The gate dependence of geophysical retrievals from the topeX altimeter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17.
- RAPLEY, C., GUZKOWSKA, M., CUDLIP, W. et MASON, I. (1987). A exploratory study of inland water and land altimetry using seasat data. In *ESA Contract Report 6483/85/NL/BI*.
- RECKDAHL, K. (2006). *Using Imported Graphics in LaTeX and pdfLaTeX (Version 3.0.1)*.
- RIO, M.-H. et HERNANDEZ, F. (2004). A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model. *J. Geophys. Res.*, 109, C12032.
- RODRIGUEZ, E. et MARTIN, J. M. (1994). Assessment of the topeX altimeter performance using waveform retracking. *Journal of Geophysical Research*, 99:24,957–24,969.
- ROSMORDUC, V., BENVENISTE, J., LAURET, O., MILAGRO, M. et PICOT, N. (2006). *Radar Altimetry Tutorial*. J. Benveniste and N. Picot Ed., <http://www.altimetry.info>.
- SEYLER, F., BONNET, M.-P., CALMANT, S., CAUHOPÉ, M., CAZENAVE, A., COCHONNEAU, G., DIVOL, J., DO-MINH, K., FRAPPART, F., GENNERO, M.-C., GUYENNE-BLIN, K., HUYNH, F., LEON, J. G., MANGEAS, M., MERCIER, F., MERCIER, C., ROCQUELAIN, G., TOCQUEVILLE, L. et ZANIFÉ, O.-Z. (2006). The cash project. In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry"*.
- SEYLER, F. et CALMANT, S. (2006). Comparison of free surface stages and slopes by satellite altimetry and gps in-situ measurements. In *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 09161, SRef-ID : 1607-7962/gra/EGU06-A-09161.
- SHANNON, C. E. et WEAVER, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Urbana, Ill. : University of Illinois Press. V, 117 p.
- SMITH, L. C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge : A review. *Hydrol. Proc.*, 11:1427–1439.
- STROHMER, T. (1997). Computationally attractive reconstruction of bandlimited images from irregular samples. *IEEE Transactions on image processing*, vol. 6, No 4.

- TAPLEY, B. D., RIES, J. C., DAVIS, G. W., EANES, R. J., SCHUTZ, B. E., SHUM, C. K., WATKINS, M. M., MARSHALL, J. A., NEREM, R. S., PUTNEY, B. H., KLOSKO, S. M., LUTHCKE, S. B., PAVLIS, D., WILLIAMSON, R. G. et ZELENSKY, N. P. (1994). Precision orbit determination for topeX/poseidon. *Journal of geophysical research*, vol. 99, noC12:24383–24404.
- TREUHAFT, R. N., LOWE, S. T., ZUFFADA, C. et CHAO, Y. (2001). 2-cm gps altimetry over crater lake. *Geophysical Research Letters*, 22, No. 23:4343–4346.
- VANDEWALLE, P., SÜSSTRUNK, S. et VETTERLI, M. (2003). Superresolution images reconstructed from aliased images. *SPIE/IS&T Visual Communication and Image Processing Conference*, T. Ebrahimi and T. Sikora, eds., 5150.
- ZAKHAROVA, E., KOURAEV, A. V., CAZENAVE, A. et SEYLER, F. (2006). Amazon river discharge estimated from topeX/poseidon altimetry. *C. R. Geoscience*, 338:188–196.
- ZIEGER, A. R., HANCOCK, D. W., HAYNE, G. S. et PURDY, C. L. (1991). Nasa radar altimeter for the topeX/poseidon project. *Proceedings of the IEEE*, 79, NO.6:810–826.
- ZWALLY, H. J. (1989). Growth of greenland ice sheet : Interpretation. *Science*, 246:1587–1589.
- ZWALLY, H. J., BINDSCHADLER, R. A., BRENNER, A. C., MAJOR, J. A. et MARSH, J. G. (1989). Growth of greenland ice sheet : Measurement. *Science*, 246:1589–1591.

Résumé

De nombreux travaux menés durant les quinze dernières années ont permis de montrer le potentiel de l'altimétrie satellitaire radar pour le suivi du niveau des eaux continentales (mers intérieures, lacs, zones d'inondations et grands fleuves). Actuellement, un nombre significatif de satellites fournissent des mesures altimétriques (Topex/Poseidon, ERS-2, ENVISAT et Jason-2) et permettent d'assurer la continuité opérationnelle du suivi du niveau des eaux continentales. Ces dernières années, plusieurs groupes ont travaillé à constituer des bases de données de niveaux des eaux de lacs et de fleuves dérivés des mesures d'altimétrie radar (projets « CASH », « River & Lake », « HydroWeb » et « Global Reservoir and Lake Monitor »).

Cependant, la communauté des hydrologues n'exploite toujours pas ces données dans le cadre d'applications opérationnelles. Parmi les raisons qui freinent l'implication des hydrologues à utiliser les mesures de niveaux issues de l'altimétrie radar, une des principales est le manque d'une méthode standard permettant de quantifier et de caractériser la qualité de ces données et de leur associer des valeurs d'incertitude.

La présente thèse se concentre sur ce sujet et développe les thématiques complémentaires suivantes :

- (1) Le développement d'une « Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques » dérivés de l'altimétrie satellitaire radar sur les grands fleuves du globe. Cette méthode prend en compte non seulement la précision des mesures altimétriques mais aussi leur période effective d'échantillonnage temporel.
- (2) L'application de la méthode : (a) quantification de la qualité de « produits alti-hydrologiques » ; (b) quantification de l'impact des chaînes de génération des produits (tracking/retracking, fenêtrage géographique et filtrage) ; (c) comparaison des performances de ces produits.
- (3) Le développement d'un outil permettant d'associer une valeur d'incertitude à toute mesure alti-hydrologique.
- (4) La traduction en « qualité hydrologique » de la qualité des produits altimétriques.

En l'état actuel, la précision moyenne des différents produits alti-hydrologiques disponibles est de l'ordre du mètre sur les cours d'eau de 500m à quelques kilomètres de large du réseau hydrographique amazonien, sur lequel la méthode a été mise en œuvre. Elle s'avère très faiblement corrélée à la largeur des cours d'eau. Cette méthode permettra aux hydrologues d'utiliser en connaissance de cause les données altimétriques et aux spécialistes des techniques spatiales de quantifier les améliorations apportées par les nouvelles technologies et algorithmiques de l'altimétrie radar.

Mots clés : altimétrie radar, hydrologie, niveau des cours d'eau, précision, incertitude, période d'échantillonnage, traitement du signal.

Abstract

Numerous works during the last fifteen years have shown the potential contribution of satellite radar altimetry for the monitoring of water levels of inland water bodies (inner seas, lakes, floodplains and large rivers). Currently a significant number of satellites provide radar altimetry information (Topex/Poseidon, ERS-2, ENVISAT and Jason-2) and could ensure the continuity of operational monitoring of continental water levels. Recently, various groups have dedicated large efforts to build "alti-hydrological products", data bases of rivers and lakes water levels derived from satellite radar altimeters (for example the "CASH", "River & Lake", "HydroWeb" and "Global Reservoir and Lake Monitor" projects).

However, as a general picture, hydrologists still do not use these data for operational applications. Among the reasons accounting for the reluctance of hydrologists to use water level data derived from satellite radar altimetry is the lack of a standardized method to characterize the quality of these data.

The present report focuses on that subject and develops the following complementary topics :

- (1) The development of a "Standardized Method for Quantifying the Quality of Alti-Hydrological Products" derived from satellite altimetry measurements over large rivers. The methods cares about both the accuracy and the sampling efficiency of satellite measurements.
- (2) Applications of the method : (a) quantification of the quality of Alti-Hydrological Products ; (b) quantification of the impact of product processing chains (waveform tracking/retracking, virtual stations windowing and filtering) ; (c) comparison of the products performances.
- (3) Development of tools to provide uncertainty information along any river water level satellite measurements.
- (4) Transposition of the products "altimetric quality" to their "hydrological quality".

Results enlighten the fact that mean accuracy of the currently available "alti-hydrological products" is of the order of magnitude of one meter for rivers from 500m to few kilometers width, over the Amazon hydrographic network where the method has been implemented. This accuracy is poorly correlated to river width. This method will allow hydrologists to use qualified water level time series and help altimetry specialists to quantify improvements brought by new altimetry technologies and algorithmics.

Keywords : radar altimetry, hydrology, river water levels, accuracy, uncertainty, sampling period, signal processing.