



HAL
open science

Caractérisation d'atterrissements d'argiles récents sur le territoire français, en vue de leur valorisation dans l'industrie des matériaux de construction en terre cuite

Frédéric Haurine

► **To cite this version:**

Frédéric Haurine. Caractérisation d'atterrissements d'argiles récents sur le territoire français, en vue de leur valorisation dans l'industrie des matériaux de construction en terre cuite. Sciences de la Terre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2015. Français. NNT : 2015ENMP0066 . tel-01423865

HAL Id: tel-01423865

<https://pastel.hal.science/tel-01423865>

Submitted on 1 Jan 2017

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.

École doctorale n° 398

Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité “ Dynamique et Ressources des Bassins Sédimentaires ”

présentée et soutenue publiquement par

Frédéric HAURINE

Le 10 décembre 2015

Thèse confidentielle
(date de fin de 31/12/2016)

**Caractérisation d'atterrissements d'argiles récents
sur le territoire français, en vue de leur valorisation
dans l'industrie des matériaux de construction en terre cuite**

Directrice de thèse : **Isabelle COJAN**

Responsable industriel : **Marie-Anne BRUNEAUX**

Jury

M. Nor-Edine ABRIAK, Professeur, Ecole des Mines de Douai
Mme Agnès SMITH, Professeur, ENSCI, Limoges
M. Daniel LEVACHER, Professeur, Université de Caen
Mme Christine BERTIER, Ingénieur chercheur, EDF Recherche & Développement, Chatou
Mme Marie-Anne BRUNEAUX, Manager de Service, CTMNC, Paris
Mme Isabelle COJAN, Directrice de recherche, Géosciences MINES-ParisTech
M. Guillaume MORIN, Directeur de recherche, UPMC, Paris
M. Marc WOITRIN, Directeur technique et QSE, MONIER, Le Kremlin Bicêtre

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinatrice
Examinatrice
Examinateur
Examinateur

**T
H
È
S
E**

MINES-ParisTech

Centre de Géosciences

35 rue Saint Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex

À mon père,

Remerciements

Plus que professionnelle, la thèse a été pour moi une aventure humaine enrichissante à tout points de vue. Elle m'a fait repousser mes limites et m'a montré que celles-ci sont plus flexibles qu'on le pense. Bien sûr, cette aventure n'aurait pas pue être la même sans les nombreuses personnes qui y ont participé de près ou de loin durant ces trois années.

En premier lieu, je tiens à remercier Isabelle, ma directrice de thèse, de m'avoir fait confiance pour ce sujet, pour son savoir-faire qu'elle a su me transmettre, pour son encadrement, son soutien et son aide dans les bons et les mauvais moments.

Merci à Marie-Anne, ma responsable industriel, pour m'avoir elle-aussi accordé sa confiance, pour sa présence, son encadrement, pour toutes ces discussions sur l'industrie de la terre cuite et la céramique en générale qui était un domaine nouveau pour moi, pour son aide précieuse tout au long de cette thèse.

Je souhaite remercier Monsieur Bruno Martinet, directeur générale du CTMNC, qui m'a lui-aussi accordé sa confiance pour mener à bien ce projet qui, je sais, lui tiens à cœur et pour toutes ces discussions qui m'ont permis d'avancer dans la bonne direction.

Je remercie les membres de mon jury de thèse d'avoir accepté de juger mon travail en tant que rapporteur en ce qui concerne Madame Agnès Smith et Monsieur Daniel Levacher et en tant qu'examinateur pour Madame Christine Bertier et Messieurs Nor-Edine Abriak, Guillaume Morin et Marc Woitrin.

J'exprime ma gratitude à François Michel, qui a suivi ma thèse pendant ces trois ans malgré un emploi du temps souvent chargé, qui a su être présent, pour sa sympathie, sa positivité à toute épreuve et son soutien qui m'ont permis d'atteindre ce but.

Vous êtes nombreux à avoir collaboré à différentes échelles pour que ce travail de thèse aboutisse dans les meilleures conditions.

Je pense à Nelly et Noëlia, techniciennes du centre Géosciences de MINES ParisTech, pour les analyses réalisées, aussi nombreuses soient-elles, pour leur réponse à mes questions, pour leur aide au laboratoire comme sur le terrain.

Je pense à Médard, pour les heures passées devant les diffractogrammes et nos discussions autour des résultats des analyses DRX.

Je pense à Loïc, Léa, Coralie et Jamel, de l'unité Physique du CTMNC, pour les nombreux essais réalisés, les manip montées et spécialement à Loïc et Léa pour leur aide dans ces manip, leur sympathie, les moments de rigolades et pour tous ce qu'ils m'ont appris.

Je pense aussi à Christine, Liliane, Malika et Claire, de l'unité Chimie du CTMNC, pour les très nombreuses analyses et manip réalisées malgré un emploi du temps souvent chargé.

Merci à Elodie, qui a été une stagiaire de qualité pendant ma troisième année, pour son travail exemplaire et pour m'avoir fait gagner tant de temps sur les manip sur la Garonne.

Merci à Stéphanie et à Maryse, qui se sont succédées en tant que secrétaire du service Céramique du CTMNC, pour leur aide précieuse pour l'ensemble des tâches administrative au jour le jour et surtout pour le montage des nombreuses missions de terrain.

Merci à Sylvie, gestionnaire de l'équipe Géologie de MINES ParisTech, pour avoir su faire le lien entre l'école et le CTMNC, pour tout le temps passé en ce qui concerne l'administration de l'école, pour le montage des missions et aussi particulièrement pour la relecture complète de ce mémoire de thèse.

A défaut de pouvoir le remercier de vive voix, je souhaite rendre hommage à Philippe, qui était le dessinateur de l'équipe Géologie, pour son travail de qualité évidemment, qui m'a permis d'avoir des illustrations de qualité tout au long de ma thèse, mais aussi pour son côté humain au sein de l'équipe, pour ces grandes discussions et pour m'avoir relativiser sur beaucoup de chose pendant cette thèse.

Je remercie les membres des Conseils du laboratoire du centre Géosciences et de l'Ecole Doctorale GRNE qui m'ont permis, en tant que représentant doctorant, d'être acteur respectivement dans la vie du centre de recherche et dans celle de l'école doctorale.

Je remercie les industriels de la Terre Cuite pour leur suivi assidu de mes travaux, pour leur contact naturel et pour m'avoir aiguillé sur les attentes de l'industrie en lien avec mes problématiques et les questions que mes résultats soulèvent.

Je remercie l'ensemble du personnel du CTMNC pour m'avoir aussi bien accueilli et intégré au centre pendant ces trois années.

Merci aux nombreuses personnes que j'ai pu côtoyer sur le site de Fontainebleau de MINES ParisTech, qui ont fait la qualité de mon passage dans cet institution et dont une liste de noms ne ferait que mettre en avant les "oubliés".

Je remercie plus particulièrement ceux que j'ai côtoyé jour après jour, les membres de l'équipe Géologie que je n'ai pas encore cité, les permanents, Caroline, Christine et Pierre, ceux qui étaient de passage en stage ou en postdoc, Virginie, Nicolas, Julien, les doctorants qui étaient là avant moi, Benjamin, Kouakou, Thomas, Maxime, ceux qui sont arrivés en cours de route, Anna, Dariouche, Martin et Areski. Merci à vous pour tous ces moments, ces discussions plus ou moins professionnels selon l'instant.

Je tiens à remercier spécialement Benoit, qui est arrivé en même temps que moi au sein de l'équipe Géologie, et sa compagne Eloïse, qui m'ont souvent rendu service et notamment en gardant ma fille lors de certains de mes déplacements.

J'en viens maintenant à des remerciements plus personnels.

J'exprime une grande gratitude à Laéticia Taillandier, la super nounou de ma fille, car son professionnalisme et la flexibilité d'horaire qu'elle m'a offert, ont fait parti des choses qui m'ont permis de mener ma thèse dans les meilleures conditions.

Merci à vous mes amis, Fanny, Frédérique, Laure, Claire, Mélanie, Laurie, Charles, Florent, Christophe, Aurélien, Vincent, pour votre soutien depuis tant d'années et encore plus pendant ces trois ans qui n'ont pas toujours simples et pendant lesquels je n'ai pas toujours été facile à vivre.

Merci à ma sœur, mon beau-frère, mes nièces et mon neveu, pour votre soutien à toute épreuve depuis toujours et pendant cette thèse, pour m'avoir permis d'aller rechercher de l'air pur auvergnat aussi souvent que j'en avais besoin et pour m'avoir aidé à garder la tête sur les épaules.

Un grand merci à ma maman et à Michel d'avoir été présent aussi souvent pour moi, au téléphone, à Fontainebleau ou en Vendée à chaque fois que c'était possible. Merci à vous deux de m'avoir donné de votre temps pour garder Coline en particulier lors des enseignements et plus généralement pour mes déplacements de plus longue durée.

Comment terminer ces remerciements sans parler de toi ma fille, Coline, qui a changé ma vie il y a déjà plus de 5 ans, qui rythme mes journées, mes mois et mes années, qui m'a permis de garder un rythme de vie "normal" malgré la thèse, qui a su, malgré elle, me donner le sourire même pendant les jours difficiles et qui m'a supporté en particulier dans la dernière ligne droite malgré ma fatigue et mes sautes d'humeur.

Merci à tous pour votre soutien qui a fait de ces trois années une expérience inoubliable !!!

Table des Matières

Introduction.....	19
Chapitre 1 - Contexte industriel français.....	23
1. Une industrie de proximité à taille humaine.....	25
1.1. Une industrie répartie sur le territoire français	26
1.2. L'évolution de la production.....	28
1.3. Les processus de fabrication	29
1.4. La matière première	32
2. Ressource actuelle.....	37
2.1. L'industrie extractive des matériaux argileux pour l'industrie de la terre cuite en France	37
2.2. Les matériaux exploités.....	39
2.2.1. Le Régolithe	40
2.2.1.1. Les formations allochtones	40
2.2.1.2. Les formations autochtones.....	43
2.2.2. Les roches sédimentaires (S),	46
2.2.2.1. Les dépôts fluvio-lacustres	46
2.2.2.2. Les dépôts marins peu profonds	49
3. Conclusions.....	51
Chapitre 2 - Les matériaux argileux, une ressource renouvelable en France ?	53
1. Le renouvellement de la source en matériaux argileux.....	55
1.1. Le caractère renouvelable des types de dépôts actuellement exploités.....	55
1.1.1. Le Régolithe	55
1.1.2. Les roches sédimentaires consolidées	55
1.2. Les zones d'accumulation de matériaux argileux.....	56
1.2.1. Le régolithe : colluvions et altérites	56
1.2.1.1. Le régolithe autochtone	56
1.2.1.2. Les colluvions.....	58
1.2.1.3. Conclusion sur les modes d'accumulation actifs du régolithe	58
1.2.2. Les systèmes fluviaux lacustres	59
1.2.2.1. Les types de systèmes fluviaux et les charges solides associées	59

1.2.2.2. Distribution des plaines alluviales en France	61
1.2.2.3. Des systèmes fortement aménagés	64
1.2.2.4. Conclusion sur les modes d'accumulation des systèmes fluviaux	68
1.2.3. Les embouchures, zones de transition entre domaines fluviaux et côtiers.....	68
1.2.3.1. Les bouchons vaseux et la crème de vase.....	70
1.2.3.2. La dynamique des estuaires au cours de l'Holocène	71
1.2.3.3. L'estuaire de la Gironde	71
1.2.3.4. L'estuaire de la Loire	72
1.2.3.5. L'estuaire de la Seine.....	74
1.2.3.6. Le delta du Rhône, un système en recul	75
1.2.3.7. L'estuaire de la Rance, un aménagement unique	76
1.2.3.8. Conclusion sur les modes d'accumulation dans les systèmes estuariens.....	77
1.2.4. Les dépôts côtiers.....	77
1.2.4.1. La dynamique des côtes	77
1.2.4.2. Le littoral français.....	79
1.2.4.3. La baie de Somme	81
1.2.4.4. La baie du Mont-Saint-Michel	82
1.2.4.5. Les Pertuis Breton et d'Antioche.....	83
1.2.4.6. Le Bassin d'Arcachon.....	84
1.2.4.7. Conclusions sur les dépôts côtiers	85
1.2.5. Les sources du renouvellement en matériaux argileux.....	86
2. Les vitesses d'accumulation des sources de matériaux argileux	87
2.1. L'érosion hydrique des sols	87
2.2. Le régo-lite,.....	89
2.2.1. L'altération de surface.....	89
2.2.2. Les colluvions.....	89
2.3. Les flux sédimentaires associés aux cours d'eau.....	91
2.3.1. La sédimentation dans les plaines alluviales.....	93
2.3.2. Le piégeage dans les barrages.....	93
2.3.3. Les flux dans les aménagements liés à la navigation	96
2.3.4. Le comblement des estuaires.....	97
2.3.5. Conclusion sur le stockage de sédiments fins dans les systèmes fluviaux.....	97

2.4. L'envasement des baies côtières.....	98
2.4.1. La dynamique naturelle.....	98
2.4.2. Impact des barrages littoraux.....	99
2.4.3. L'envasement des ports maritimes	100
2.5. Conclusion	101
3. Un Cadre Minéralogique de Référence (CMR) pour l'évaluation du renouvellement de la ressource	103
3.1. L'approche classique de l'industrie de la terre cuite.....	103
3.2. Le Cadre minéralogique de Référence (CMR)	105
3.2.1. La composition de la roche totale	105
3.2.2. Les assemblages de phyllosilicates.....	107
3.2.3. Application et perspectives	109
4. Conclusions.....	110
Chapitre 3 - Evaluation de la ressource : Apports du Cadre Minéralogique de Référence à l'étude des principaux sites d'atterrissements actuels	113
1. Choix des sites pilotes et stratégie d'échantillonnage	114
1.1. Les sites pilotes.....	114
1.2. La stratégie d'échantillonnage	115
1.2.1. Echantillonnage le long d'un cours d'eau	115
1.2.2. Echantillonnage dans les atterrissements.....	117
1.2.3. Echantillonnage des baies et des réseaux fluviaux qui les alimentent	117
1.2.4. Echantillonnage des sédiments issus de dragages portuaires	118
1.3. Conclusion	118
2. Evaluation des atterrissements à l'aide du CMR.....	119
2.1. Les atterrissements fluviaux et côtiers.....	119
2.2. Evolution de la composition des sédiments le long de cours d'eau drainant des formations géologiques contrastées.....	121
2.2.1. La Durance, un bassin versant pilote.....	121
2.2.2. Le bassin versant amont de la Seine	126
2.2.3. Le bassin versant en rive droite du cours moyen de la Garonne	129
2.2.4. Conclusions.....	133
2.3. Les façades maritimes, baies côtières estuariennes et ports.....	134

2.3.1. Les baies côtières estuariennes de la côte de la Manche	134
2.3.2. Les baies côtières estuariennes de la façade atlantique.....	137
2.3.2.1. Le bassin d'Arcachon	137
2.3.2.2. Les pertuis Breton et d'Antioche.....	137
2.3.3. Les estuaires, marais et ports.....	142
2.3.4. Conclusions sur les apports sédimentaires dans les zones côtières	144
3. Comparaison des évaluations par le CMR et l'approche classique.....	145
3.1. Evaluation des sites à partir de l'approche classique.....	145
3.1.1. Les données géochimiques, le diagramme d'Augustinik	145
3.1.2. La distribution granulométrique, le diagramme de Winkler.....	147
3.1.3. Le façonnage.....	148
3.1.4. Le comportement au séchage	150
3.1.5. Le comportement à la cuisson	152
3.1.6. La résistance mécanique	154
3.2. Comparaison entre les deux approches	155
4. Estimation du renouvellement de la ressource	159
4.1. Relations entre contexte géologique, dynamique sédimentaire et potentiel des atterrissements	159
4.2. Evaluation du renouvellement de la ressource.....	160
Chapitre 4 - Vers une valorisation étendue des atterrissements dans l'industrie de la terre cuite	163
1. La préservation de la ressource, une problématique mondiale pour l'industrie de la terre cuite ...	165
1.1. La valorisation de sous-produits industriels.....	165
1.2. La valorisation de sédiments.....	167
1.2.1. Les sédiments marins	167
1.2.2. Les sédiments fluviaux et portuaires.....	168
1.2.3. Les sédiments de retenues	170
1.3. Conclusion	171
2. Un accroissement du potentiel des atterrissements du territoire français.....	172
2.1. Les effets croisés de l'ajout d'additifs	173
2.1.1. Obtention d'une distribution granulométrique appropriée	173
2.1.2. Impact sur la composition minéralogique.....	176
2.1.3. Modification de la composition géochimique.....	177

2.2. Les essais matériaux.....	178
2.2.1. Eau de façonnage	178
2.2.2. Comportement au séchage	179
2.2.3. Comportement à la cuisson.....	181
2.2.4. Résistance mécanique	182
2.2.5. Conclusion sur l'ajout de dégraissant.....	183
2.3. Une valorisation des sédiments hors standard	184
2.3.1. Obtention du mélange	184
2.3.2. Evolution des compositions minéralogiques et géochimiques	187
2.3.3. Performances lors des essais.....	188
2.3.4. Conclusion	191
3. Conclusions.....	191
Conclusions et perspectives.....	193
Références bibliographiques.....	199
Annexes.....	207

Table des figures

Figure 1-1 : Photographie de l'architecture régionale typique des habitations liée aux matériaux présents localement. A) Maison toulousaine ; B) Longère bretonne ; C) Maison picarde ; D) Maison du Nord.....	25
Figure 1-2 : Carte de répartition des sites industriels des tuiles et briques en France et de leur production annuelle à partir des données CTMNC (CTMNC, 2012).	27
Figure 1-3 : Répartition du nombre d'usines comparée (en bleu foncé) au pourcentage du volume de production nationale (en bleu clair) par rapport au volume de production annuelle en France (CTMNC, 2012).....	28
Figure 1-4 : Courbe de l'évolution de la production annuelle française de tuiles et briques (FFTB, 2014)	28
Figure 1-5 : Procédé de fabrication de produits de terre cuite (Kornmann, 2005)	30
Figure 1-6 : Diagramme Augustinik (source CTMNC).....	34
Figure 1-7 : Diagramme de Winkler (source CTMNC)	35
Figure 1-8 : Ensemble des carrières de production de matériaux pour l'industrie des matériaux en terre cuite en France métropolitaine (http://matériaux.brgm.fr/CartesExploitations.aspx).....	37
Figure 1-9 : Exemple de l'exploitation de Bavent (14) où carrière et usines se trouvent sur le même site (www.geoportail.gouv.fr/)	38
Figure 1-10 : Répartition des carrières de matériaux argileux et des usines de production des tuiles et briques (production > 15 000 t/An) en France (BRGM, 2010; CTMNC, 2012).	38
Figure 1-11 : Les deux grands modes de formation des matériaux argileux pour la production de tuiles et briques (47 sites majeurs, données CTMNC)	39
Figure 1-12 : Répartition de la production nationale en fonction des type de gisement	40
Figure 1-13 : Carte de distribution des lœss en Europe (Haase et al., 2007)	42
Figure 1-14 : Schéma théorique de la formation de terrasses étagées	43
Figure 1-15 : Profil d'altération selon (Ricordel-Prognon et al., 2009)	44
Figure 1-16 : La carte du Régolithe allochtone (BRGM, 2015) et encarts sur les régions possédant des formations conséquentes : A) Carte de France entière ; B) le Bassin parisien ; C) le Massif Armoricaïn ; D) le Massif Central et le Bassin Aquitain.	45
Figure 1-17 : Schéma d'un bassin versant	46
Figure 1-18 : Les différents lits d'une rivière © MEDD - Dossier informations inondations (août 2004) ...	47
Figure 1-19 : Panache de sédiments à la sortie d'un estuaire.....	47
Figure 1-20 : Répartition des zones de dépôts fluviolacustres à partir de la Carte géologique de la France au 1/1 000 000 ^{ème} (BRGM, 2015) : A) carte géologique de la France ; B) Zoom sur la plaine de la Bassée (bassin versant de la Seine) ; C) Zoom sur la plaine d'Orléans (bassin versant de la Loire) ; D) Zoom sur la vallée du Rhône et de la Saône.	48
Figure 1-21 : Les différents types de deltas en fonction du processus sédimentaire dominant (Pomerol, 2005).....	49
Figure 1-22 : Schéma de l'empilement sédimentaire des dépôts littoraux	50
Figure 1-23 : Image Satellite du Pertuis Breton (Google Earth)	50

Figure 2-1 : La carte du Régolithe allochtone (BRGM, 2015) et encarts sur les régions possédant des formations conséquentes : A) Carte de France entière ; B) le Bassin parisien ; C) le Massif Armoricaïn ; D) le Massif Central et le Bassin Aquitain.	57
Figure 2-2 : Classification des cours d'eau prenant en compte la charge sédimentaire d'après Schumm (1985)	60
Figure 2-3 : Diagramme érosion/transport/sédimentation en fonction de la taille des particules et la vitesse du courant (Hjulström, 1935).....	60
Figure 2-4 : La carte des plaines alluviales à l'Holocène à partir de la base de données Carthage et de la carte géologique de la France au 1/1 000 000.	62
Figure 2-5 : Incision de la vallée de la Somme lors des dernières glaciations d'après Lamothe (1918)	64
Figure 2-6 : A) Carte de répartition des retenues EDF, VNF et Vendée Eau en France. B) Carte de l'aléa érosion des sols en France par petite région agricole estimé à l'aide du modèle Mesales (Montier et al., 1998).....	66
Figure 2-7 : Carte de France des estuaires. Identification des grands estuaires et de certains estuaires de taille moyenne.....	69
Figure 2-8 : Position du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine (Dupont et al., 2001; GIP-Seine-Aval, 2008).....	70
Figure 2-9 : Photographie satellite de l'estuaire de la Gironde.....	72
Figure 2-10 : Territoire du SAGE Estuaire de la Loire (GIP-Loire-Estuaire, 2015).....	72
Figure 2-11 : Evolution de la morphologie de l'estuaire de la Loire entre Paimboeuf et Couëron de 1750 à 2008.....	73
Figure 2-12 : Schéma de l'estuaire de Seine (Guézennec et al., 1999)	74
Figure 2-13 : Erosion et accrétion sur littoral camarguais (Allouche and Nicolas, 2015)	75
Figure 2-14 : Estuaire de la Rance (Bonnot-Courtois et al., 2002). A) Répartition des sédiments superficiels en 1994 ; B) Evolution des fonds entre Mordreuc et Port-Saint-Jean entre 1953 et 1985.	76
Figure 2-15 : Schéma d'une plateforme carbonatée et de la dynamique des dépôts côtiers	78
Figure 2-16 : Schéma illustrant la dérive littorale et le trajet d'une particule après le déferlement de 7 vagues.....	78
Figure 2-17 : Cartographie du marnage sur les côtes françaises A) en vives eaux ; B) en mortes eaux (SHOM, 2015)	79
Figure 2-18 : L'évolution du littoral français A) Carte de mobilité du trait de côte ; B) Histogramme de l'évolution du littoral en fonction de la nature des côtes (ONML, 2004)	80
Figure 2-19 : Exhaussement des fonds liés à l'ostréiculture d'après Kervella (2010)	80
Figure 2-20 : Répartition sédimentaire dans la baie de Somme	81
Figure 2-21 : Carte de répartition des sédiments superficiels dans la baie du Mont-Saint-Michel (Bonnot-Courtois et al., 2002)	82
Figure 2-22 : Photographie satellite des pertuis charentais (Google earth)	83
Figure 2-23 Image satellite SPOT du bassin d'Arcachon	85
Figure 2-24 : Evaluation de l'érosion des sols en France par le modèle Européen PESERA.....	88
Figure 2-25 : Photographie satellite de la France avec les flux de matières en suspension des grands fleuves	91

Figure 2-26 : Répartition par région A) des retenues dont le volume d'eau est supérieur à 1 Mm ³ (%) B) de l'estimation de l'envasement des retenues dont le volume d'eau est supérieur à 1 Mm ³	95
Figure 2-27 : Diagramme synthétique de répartition de la contribution des sources actives de sédiments fins sur le territoire français à partir des estimations faites au cours de cette thèse.....	101
Figure 2-28 : Diagramme Augustinik et de Winkler des mélanges industriels.....	104
Figure 2-29 : Diagrammes Ternaires illustrant la composition minéralogique des mélanges industriels.	106
Figure 2-30 : Diagrammes Ternaires des phyllosilicates des mélanges de production A) référentiel : kaolinite, illite, argiles gonflantes ; B) référentiel : kaolinite/illite, argiles gonflantes, chlorite.	108
Figure 3-1 : Exemple d'une confluence entre deux cours d'eau (ici, la Durance et le Guil) échantillonnée afin de caractériser leur contribution relative en sédiments.....	116
Figure 3-2 : Cadre Minéralogique de Référence (CMR) et données des milieux fluviaux, ports maritimes et estuaires et baies côtières. (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).....	119
Figure 3-3 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de la Durance avec la localisation des retenues de barrages et des sites d'échantillonnage.	122
Figure 3-4 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale (A et B) et de l'assemblage en minéraux argileux (C et D) des échantillons du bassin versant de la Durance comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).....	123
Figure 3-5 : Carte géologique de la zone amont du bassin versant de la Seine avec la localisation des retenues de Crescent, de Chaumeçon et de Pannecière et des Lacs d'Orient, d'Amance, d'Auzon-Temple et du Der.....	126
Figure 3-6 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale (A et B) et de l'assemblage en minéraux argileux (C et D) des échantillons du bassin versant de la Seine comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).....	127
Figure 3-7 Carte géologique du bassin versant de la Garonne	130
Figure 3-8 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale des échantillons du bassin versant rive droite de la Garonne comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR).	131
Figure 3-9 : Extrait du Nord Ouest de la carte géologique de la France au 1:1 000 000 permettant la localisation des baies de Somme et du Mont St Michel et de l'estuaire de la Rance ainsi que leurs environnements géologiques respectifs.	134
Figure 3-10 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale des échantillons des baies du Mont-Saint-Michel et de Somme et de l'estuaire de la Rance comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).....	135
Figure 3-11 : Extrait de la carte géologique de la France au 1:1 000 000 / Côtes vendéennes et charentaises et bassins versants du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Charente et de la Seudre.....	138
Figure 3-12 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale des échantillons des pertuis charentais et de leurs bassins versants associés comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR).....	138
Figure 3-13 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en Roche Totale des échantillons des grands ports maritimes du Havre et marais Vernier comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR).....	142

Figure 3-14 : Diagramme Augustinik des sédiments prélevés dans le cadre de cette thèse pour des essais matériaux. Les données par site sont fournies dans l'annexe 8.	146
Figure 3-15 : Diagramme de Winkler des sédiments prélevés dans le cadre de cette thèse pour des essais matériaux. Les données par site sont fournies dans l'annexe 8.	148
Figure 3-16 : Courbe de Bigot des sédiments de Cadarache (courbe rouge) et de Castillon-Verdon (courbe bleue).....	150
Figure 3-17 : Comportement à la cuisson des sédiments de Cadarache (CA-1) et de Castillon-Verdon (VE-1).....	153
Figure 3-18 : Analyse thermo-dilatométrique de l'échantillon 130281-49 de la retenue de Pareloup....	157
Figure 3-19 : Diagramme synthétique de répartition de la contribution des sources actives de sédiments fins sur le territoire français à partir des estimations faites au cours de cette thèse.....	160
• Figure 4-1 : Figures extraites de l'article de Mezencevova et al. (2012) sur les sédiments du port de Savannah (USA).	169
Figure 4-2 : Figure extraite de l'article de Lafhaj et al., 2008 montrant l'efficacité du traitement par le procédé Novosol sur le Cu, Zn et Ni.	170
Figure 4-3 : Retrait au séchage (Jamshidi-Chenari et al., 2015) a) addition de sédiments fins (argile et silt) et sable B) sciure en proportions variables	171
Figure 4-4 : Diagramme de Winkler présentant la distribution granulométrique calculée pour les 4 mélanges.	175
Figure 4-5 : Cadre Minéralogique de Référence (CMR) et données des mélanges à partir de CA-1 et PB-1 (détails sur les légendes du chapitre 2, A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).....	176
Figure 4-6 : Diagramme Augustinik des sédiments du Port de l'Aiguillon et de Cadarache en mélanges.178	178
Figure 4-7 : Photographie des éprouvettes après cuisson : A) Mix-1 ; B) Mix-2 ; C) Mix-3 ; D) Mix-B1....	179
Figure 4-8 : Courbe de Bigot des mélanges avec dégraissants A) Des sédiments de Cadarache B) Des sédiments du puits Breton.	180
Figure 4-9 : Courbes de retraits et d'absorption d'eau en fonction de la température de cuisson des éprouvettes de Cadarache et du port de l'Aiguillon.	181
Figure 4-10 : Résistances mécaniques des sédiments bruts et des mélanges de Cadarache et du port de l'Aiguillon	183
Figure 4-11 : Diagramme de Winkler de mélanges entre sédiments du bassin versant de la Durance ...	186
Figure 4-12 : Composition minéralogique de mélanges entre sédiments du bassin versant de la Durance	187
Figure 4-13 : Diagramme Augustinik de mélanges entre sédiments du bassin versant de la Durance ...	188
Figure 4-14 : Courbe de Bigot des mélanges CA-1 + SP + Chamotte (Mix-4).....	189
Figure 4-15 : Comportement à la cuisson des mélanges CA-1 + SP + Chamotte (Mix-4).....	190
Figure 4-16 : Résistance mécanique des mélanges CA-1 + SP + Chamotte (Mix-4)	190

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques structurales des principaux phyllosilicates composant les mélanges argileux utilisés dans l'industrie de la terre cuite	33
Tableau 2 : Accumulation de colluvions dans la Valdaine (SE France) au cours de l'Holocène (évaluation en t en considérant une densité de 2) selon Macaire et al., (2002)	90
Tableau 3 : Flux de matières en suspension exportés au large des côtes françaises (Delmas et al., 2012)	91
Tableau 4 : Bilan de l'estimation de l'accumulation de sédiments fins dans les atterrissements en France	102
Tableau 5 : Composition minéralogique en Roche Totale de mélanges de production de tuiles et briques	105
Tableau 6 : Composition en Minéraux Argileux de mélanges de Production de tuiles et briques	108
Tableau 1 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des échantillons du bassin versant de la Durance. (éch. = échantillons ; Moy. = moyenne)	125
Tableau 8 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des échantillons du bassin versant amont de la Seine.....	128
Tableau 9 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des échantillons du bassin versant rive droite de la Garonne.	132
Tableau 10 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des échantillons des baies du Mont-Saint-Michel et de Somme et de l'estuaire de la Rance.....	136
Tableau 11 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) du pertuis Breton et de ses bassins versants associés.....	140
Tableau 12 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) du pertuis d'Antioche, de ses bassins versants associés et du bassin d'Arcachon.	141
Tableau 13 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre.....	143
Tableau 14 : Comportement au séchage des sédiments par systèmes sédimentaires comparé aux teneurs en minéraux argileux, en smectites et en interstratifiés Illite-Smectites qui peuvent absorber de grandes quantités d'eau au façonnage.....	151
Tableau 15 : Bilan de la comparaison entre l'approche classique de l'industrie de la Terre Cuite pour la caractérisation de la matière première et notre approche par la minéralogie à l'aide du CMR.....	158
Tableau 16 : Etablissement des mélanges par ajout de dégraissants à partir des pôles de distribution granulométrique.....	175
Tableau 17 : Etablissement des mélanges entre sédiments à partir des pôles de distribution granulométrique.....	186

Introduction

"Nous n'héritons pas de la Terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants.", Antoine de Saint-Exupéry.

Cette citation attribuée à Antoine de St-Exupéry illustre bien la notion de développement durable et donc de gestion efficace des ressources. Le rapport Brundtland publié en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement définit le développement durable comme « un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». C'est dans ce contexte que la préservation des ressources naturelles et plus particulièrement celle des ressources naturelles non renouvelables a pris une place importante dans la politique européenne et française. Le gouvernement français et l'Union Européenne ont pris et prennent des mesures législatives afin de subvenir aux besoins actuels sans se reposer sur l'utilisation non durable de ce type de ressources. Les enjeux sont donc de préserver et d'économiser la ressource naturelle sur le long terme en l'utilisant de façon optimale et efficace, en veillant à limiter le gaspillage et en privilégiant l'utilisation de ressources renouvelables et de matériaux recyclables ; d'éviter les émissions de CO₂ pour lutter contre le changement climatique ; de gérer et valoriser les déchets.

Les argiles utilisées comme matières premières pour la fabrication des produits de terre cuite sont directement concernées. Elles sont classées comme ressources non renouvelables car elles sont prélevées dans des couches géologiques dites "fossiles". Même si cette ressource a pu être considérée comme inépuisable pendant plusieurs générations, l'importance de la consommation mondiale annuelle actuelle (430 Mt) impose une réflexion sur les économies globales de matières premières et sur la gestion des ressources dans l'industrie de la terre cuite. En France, l'industrie des tuiles et briques consomme environ 7 Mt d'argiles par an.

Le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC) est le Centre Technique Industriel (CTI) français de la filière Tuiles et Briques et de la filière Roches Ornementales et de Construction. Il a pour mission de réaliser des travaux de Recherche et Développement d'intérêt générale pour la filière et des essais sur produits et/ou ouvrages pour les industriels, de développer des processus de qualité chez les industriels, de participer aux travaux de normalisation et d'assurer une veille technologique active afin de diffuser l'information technique. Il s'implique ainsi fortement dans la recherche de voies permettant l'utilisation et la gestion efficace des ressources en abordant les questions de la renouvelabilité de la ressource et de la valorisation d'aterrissements actuels de sédiments via des protocoles adaptés. Certains de ces atterrissements de matériaux fins naturels notamment ceux liés à des aménagements anthropiques sont considérés comme des déchets et nécessitent une gestion spécifique. En effet, l'atterrissement est ici une conséquence de la construction de barrières artificielles liées à des activités économiques comme l'exploitation de barrages hydroélectriques ou hydrauliques, de ports. Un envasement trop important est pénalisant pour ces activités et nécessite une gestion dans le temps. Les différents acteurs de ces activités économiques réfléchissent à différentes filières de valorisation efficace de ces atterrissements. Les volumes de sédiments stockés dans ce type d'atterrissements sont à évaluer afin de les comparer à ceux de la consommation nationale d'argile par l'industrie de la terre cuite. La valorisation des sédiments dans l'industrie de la terre cuite pourrait donc

être une des filières importantes permettant une gestion efficace des sédiments considérés comme déchets dans les retenues de barrages et les ports.

La substitution de tout ou partie de la matière première a pour but d'économiser la ressource fossile en utilisant des ressources "renouvelables" provenant des atterrissements. L'industrie s'affranchirait ainsi en partie des problèmes liés à la difficulté d'ouvrir de nouvelles carrières en diminuant les prélèvements dans les séries fossiles, ce qui augmenterait d'autant la durée de vie de la carrière. Cette substitution de la ressource "Argile" considérée comme non renouvelable passe notamment par la caractérisation de ces matériaux naturels, que sont les sédiments.

L'objectif de ce travail de thèse s'articule autour de deux thèmes :

- l'évaluation du renouvellement de la ressource en matière première au travers de l'étude des atterrissements actuels en prenant en compte les contraintes de renouvellement, de volume, de composition minéralogique ;

- la réalisation de tests sur des atterrissements potentiellement favorables, afin de voir s'ils peuvent être utilisés directement en tant que matériaux de substitution ou en mélange avec des dégraissants ou par combinaison de sédiments aux propriétés complémentaires, ou avec des matériaux de carrières, afin de diminuer le prélèvement de ressources fossiles.

Les résultats de cette étude réalisée en collaboration entre l'équipe Géologie du centre Géosciences de MINES-ParisTech et le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC) sont développés dans ce mémoire organisé en 4 chapitres.

Le **premier chapitre** présente le contexte industriel dans lequel s'inscrit cette étude. Il dresse d'abord un état des lieux de l'industrie française des tuiles et briques, la répartition de ses sites de production sur le territoire, la nature des produits fabriqués et la production annuelle. La matière première nécessaire à cette production et les processus de fabrication des produits de terre cuite sont ensuite présentés. Enfin, la dernière partie de ce chapitre décrit les ressources actuellement exploitées par l'industrie de la terre cuite afin de caractériser la matière première à substituer.

Le **second chapitre** a pour objectif l'évaluation du renouvellement de la source actuelle de matériaux fins. En premier, nous présentons une évaluation qualitative du potentiel de renouvellement des différentes sources identifiées dans le premier chapitre. Puis nous abordons la dynamique sédimentaire des systèmes fluviaux et côtiers afin de caractériser les processus de dépôt des atterrissements argileux actuels suivie d'une évaluation des flux de transport solide et des stocks disponibles qui permettent d'évaluer quantitativement le renouvellement de ces sources de matériaux fins. Pour terminer, nous présentons le développement d'un Cadre Minéralogique de Référence qui a pour objectif de caractériser de manière rapide et efficace les matériaux fins en comparaison avec les mélanges industriels de production actuellement utilisés dans l'industrie des tuiles et briques.

Le **troisième chapitre** montre la démarche mise en place pour l'évaluation du renouvellement de la ressource en matériaux fins. Ce chapitre s'articule en trois parties, tout d'abord une présentation du choix des sites d'atterrissements pilotes et la stratégie d'échantillonnage, puis la caractérisation des

sédiments prélevés dans ces atterrissements par les deux approches différentes, d'une part, à l'aide du Cadre Minéralogique de Référence, et d'autre part, par l'approche classique de l'industrie de la terre cuite et enfin après une confrontation de ces deux approches montrant la validité et l'efficacité de l'approche avec le CMR, nous présentons une évaluation de la ressource en matériaux.

Le **quatrième chapitre** montre d'abord le type de matériaux qui ont déjà été envisagés pour substituer en partie de la matière première au sein de l'industrie de la terre cuite puis des essais de valorisation de sédiments dans cette industrie. Dans un second temps, nous développons la méthodologie employée dans le but d'améliorer la composition de sédiments d'ores et déjà compatible avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite mais aussi d'élargir le potentiel des atterrissements français compatibles en incorporant par des mélanges des sédiments a priori non compatibles avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite. Nous terminons par les questions et ouvertures qui découlent d'une valorisation de sédiments dans cette industrie.

Enfin, ce manuscrit se termine par les conclusions générales de ce travail de thèse et par quelques unes des nombreuses perspectives qui en découlent pour concrétiser la valorisation.

Chapitre 1

Contexte industriel français

L'argile est l'un des matériaux les plus anciens travaillés par l'homme.

En Europe, les premières réalisations en terre cuite remontent au Paléolithique supérieur (40 000 – 10 000 BC), avec les figurines dites « venus ». Au cours du Néolithique (6 000 – 2 500 BC), la terre cuite est également utilisée dans la fabrication des ustensiles de la vie quotidienne (poteries, plats, cruches...) puis dans l'habitat. Les grecs l'utilisent pour la décoration des temples.

L'origine de la brique remonterait à 7 000 BC au Moyen-Orient. D'abord en terre crue, elle reste fragile et sensible aux intempéries. La cuisson expérimentée autour de 2 500 BC permet de réaliser des constructions de plus grande ampleur. En Europe, il faut attendre les romains pour trouver les premières constructions en terre cuite utilisant briques, tuiles et éléments de canalisations : les casernes prétoriennes de Rome (21-26 Av. JC). Les romains utilisent la brique crue dans l'opus latericium et la brique cuite dans l'opus testaceum. En France, l'usage de la brique reste limité en raison de l'abondance de pierres de construction et ne se développe vraiment que dans le Nord.

L'apparition de la tuile est attestée en Chine (entre 4 000-2 500 BC) puis se répand en Mésopotamie au cours des XII et XI^{èmes} siècles av. JC et sur le pourtour méditerranéen vers 500 BC. Les romains généralisent l'emploi de la tuile et vont créer deux formes distinctes : l'une, plate aux bords relevés (la tégula), l'autre, de forme canal posée sur la jonction longitudinale de deux tégula (l'imbrex). De ces formes vont naître au Moyen Age en France, la tuile canal au sud de la Loire et la tuile plate au Nord. La tuile canal se répand dans le Sud de la France mais cette expansion est limitée vers le nord car ces tuiles faites pour des toitures à faible pente ne sont pas adaptées à l'écoulement des pluies de faibles intensités sur de longues durées. Il faut attendre l'an 1 000 environ pour que les moines intègrent la tuile plate et permettent ainsi à la tuile de se répandre vers le nord.

Les carreaux de terre cuite largement utilisés dans la réalisation de motifs décoratifs muraux chez les grecs et les romains, seront employés au VIII^{ème} siècle en France pour daller les sols des édifices religieux. Il faut attendre le XVIII^{ème} siècle pour que l'usage se répande dans les habitations bourgeoises avant de se généraliser dans toutes les constructions au XIX^{ème} siècle.

La révolution industrielle du XIX^{ème} siècle va toucher l'industrie de la terre cuite comme les autres secteurs de transformation des matières premières. La production de tuiles et briques passe du statut d'artisanat à celui d'industrie. La substitution du bois par le charbon va permettre d'augmenter la capacité des fours (taille, efficacité). Des procédés industriels de fabrication des briques et tuiles conduisent à des géométries plus régulières et standardisées. En 1840, les frères Gilardoni créent la première tuile "mécanique" ce qui signe le début du façonnage par presse des tuiles. Cette tuile connaît un très fort développement grâce à l'industrialisation et au fort développement de la population (forte augmentation de la construction, développement de la mansarde).

Depuis, la France est devenue l'un des plus grands producteurs et exportateurs de produits de terre cuite au monde. Les fabricants de ces produits sont regroupés au sein de la Fédération Française des Tuiles et Briques (FFTb), organisation professionnelle créée en 1936. En étroite collaboration avec la FFTb, les travaux de recherche et développement de la filière Terre Cuite en France, ont été coordonnés par le Centre Technique des Tuiles et Briques (CTTB) créé en 1957 qui est devenu en 2007 le Centre Technique

de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC) avec l'incorporation de la filière Roches Ornementales et de Constructions.

Dans ce qui suit, nous allons présenter le paysage actuel de l'industrie de la terre cuite en abordant la répartition des sites industriels sur le territoire français, les processus de fabrication et la matière première utilisée.

1. Une industrie de proximité à taille humaine

Les données présentées dans ce chapitre sont tirées des informations fournies au CTMNC par ses ressortissants, l'ensemble des fabricants de terre cuite en France. La majorité de la production nationale (95 % environ) est assurée par six groupes industriels possédant chacun plusieurs sites de production : Bouyer Leroux, Briqueterie du Nord, Imerys TC, Monier, Terreal et Wienerberger. Le reste de la production est assuré par plus de 130 exploitants indépendants.

L'héritage historique se fait encore largement sentir dans l'implantation des sites industriels actuels qui sont répartis sur une grande partie du territoire français (Figure 1-1) : de nombreuses usines au sud de la Loire et dans le Nord.



(A)

<http://www.les-petites-toulousaines.com/>



(B)

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Long%C3%A8re> (Henry Moreau)



(C)

<http://www.linternaute.com/sortir/magazine/maisons-pittoresques-de-nos-regions/maison-picarde.shtml>



(D)

<http://blog.logic-immo.com/2014/12/tendances/architecture-de-nos-regions-cap-au-nord/>

Figure 1-1 : Photographie de l'architecture régionale typique des habitations liée aux matériaux présents localement. A) Maison toulousaine ; B) Longère bretonne ; C) Maison picarde ; D) Maison du Nord

1.1. Une industrie répartie sur le territoire français

L'histoire de la construction est liée à la disponibilité des matériaux naturels. Jusqu'à la révolution industrielle, les pratiques sont artisanales et les choix sont dictés par un compromis entre la meilleure qualité de construction et le moindre coût des matériaux, démarche conduisant à des techniques régionales adaptées aux matériaux disponibles et aux conditions climatiques.

Ainsi, la maison traditionnelle bretonne est en pierres taillées (roche granitique, grès rose), avec de rares fenêtres donnant peu de prise au vent et un toit pentu couvert d'ardoises. D'un style bien différent, la maison du Sud Ouest est construite majoritairement de briques, avec un toit peu pentu couvert de tuiles canal. Celle de Picardie présente une architecture mixte de briques et de pierres, ces dernières servant souvent à renforcer la maçonnerie de briques, le toit pentu est couvert de petites tuiles plates. La tuile plate est très répandue en Bourgogne aussi avec une tradition d'émaillage lui donnant cet aspect typique de la région et en Normandie avec les colombages. Dans le Nord, les constructions allient tuiles et ardoises pour la toiture et des murs en briques.

Les briqueteries et tuileries sont implantées là où la matière première est abondante, à proximité de voies de communication (voies ferrées, voies fluviales) qui permettaient le transport du charbon. Aujourd'hui, celui-ci est presque totalement remplacé par le fioul ou le gaz. Il est courant de voir des usines construites en pleine campagne, juste à côté d'une carrière.

Le produit élaboré dépendra de la nature des roches sédimentaires exploitées mais également de la demande régionale. Ainsi dans le Nord, nous trouvons des briqueteries, la couverture des toitures étant principalement réalisée en ardoises provenant du massif ardennais comme illustré dans la Figure 1-1. Au Sud de la Loire, la production est plus diversifiée entre briques et tuiles, la production des tuiles s'étant développée avec le remplacement des toits en chaume.

Le développement de l'industrie de la terre cuite en région parisienne s'appuie sur des gisements d'argile conséquents et répond à une demande croissante depuis le début du XX^{ème} siècle (population de l'Île de France multipliée par trois en un siècle et représentant aujourd'hui un cinquième de la population française) et à l'utilisation de la brique creuse dans les logements collectifs.

Depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, le nombre d'usines s'est drastiquement réduit, passant d'environ 9 000 briqueteries et tuileries en 1861 à environ 150 aujourd'hui. Ce regroupement traduit les effets conjugués de l'industrialisation et du développement des transports à faible coût (Richard, 1987).

Actuellement, la production française de tuiles et briques, autour de 5 Mt, est principalement assurée par 48 sites industriels dont les productions varient entre 15 000 et près de 400 000 tonnes par an (Figure 1-2). Une analyse détaillée de la production française en fonction de la taille des usines est présentée dans le sous-chapitre suivant.

Les différents sites de production peuvent être regroupés en six grands secteurs régionaux auxquels se rajoutent quelques sites plus isolés géographiquement :

- le Nord Pas-de-Calais - 6 % production nationale - 5 sites de production de briques et 2 de tuiles ;

- l'Alsace - 8 % production nationale - 2 sites de production de briques et 1 de tuiles ;
- l'Ile de France Picardie - 8 % production nationale - 2 sites de production de tuiles ;
- les Pays de la Loire/Charente - 16 % production nationale - 5 sites de production de briques, 2 de tuiles et 1 site tuiles et briques ;
- la région Toulousaine - 24 % production nationale - 4 sites de production de briques et 7 de tuiles ;
- les vallées de la Saône et du Rhône - 21 % production nationale - 3 sites de production de briques et 5 de tuiles.
- d'autres sites géographiquement plus isolés en Normandie, en Champagne, en Provence et en Aquitaine.

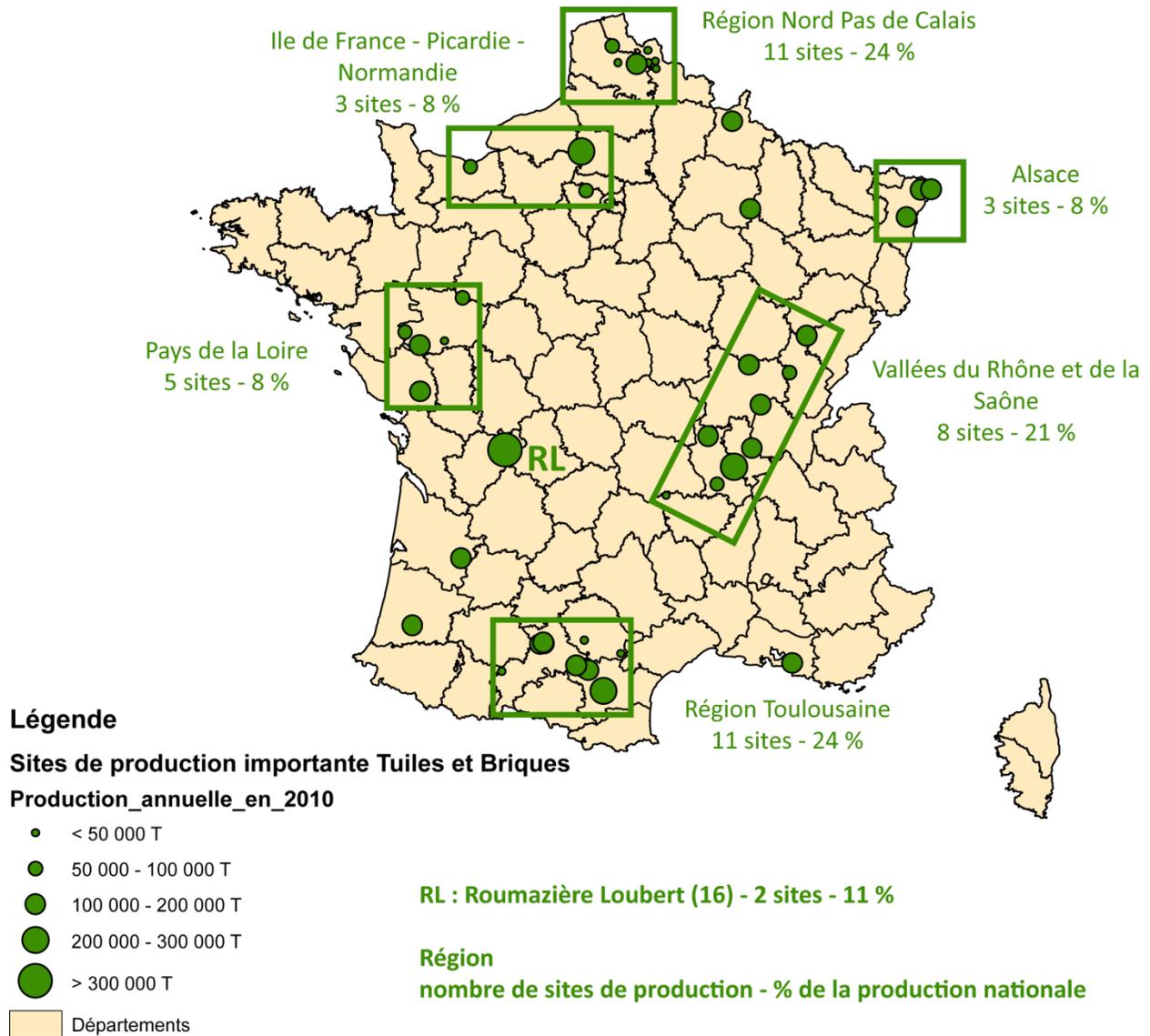


Figure 1-2 : Carte de répartition des sites industriels des tuiles et briques en France et de leur production annuelle à partir des données CTMNC (CTMNC, 2012).

1.2. L'évolution de la production

Comme précisé dans la partie précédente, 95 % de la production est assurée par 47 sites de production des 6 grands groupes industriels de la terre cuite en France. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons plus particulièrement à ces 47 sites produisant chacun au moins 15 000 tonnes de produits de terre cuite par an.

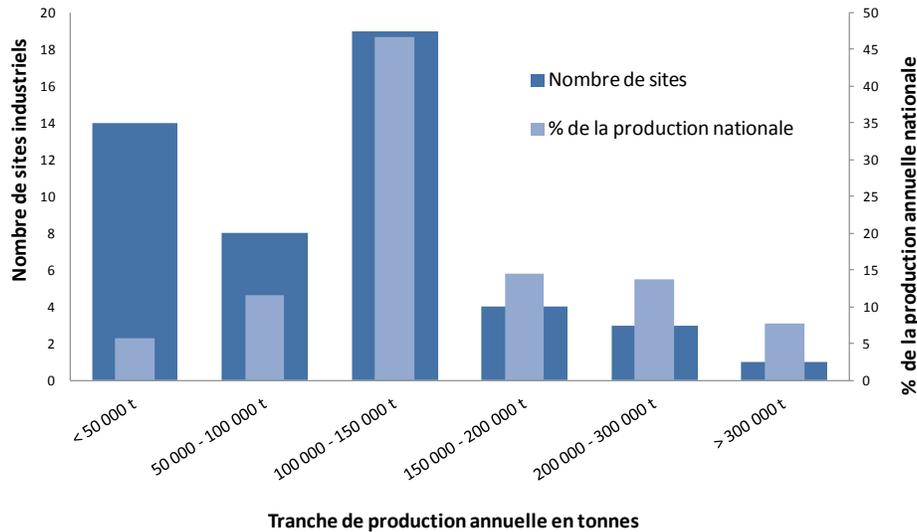


Figure 1-3 : Répartition du nombre d'usines comparée (en bleu foncé) au pourcentage du volume de production nationale (en bleu clair) par rapport au volume de production annuelle en France (CTMNC, 2012)

Une analyse de la part de la production annuelle de produits de terre cuite en fonction de la taille des usines (Figure 1-3) montre que près de la moitié de la production française est assurée par les usines (19 sites) dont la production annuelle est comprise entre 100 000 et 150 000 t/an. Le reste de la production se répartit entre quelques usines (8) à forte production entre 150 000 et 400 000 t/an et des usines (24) dont la production est majoritairement inférieure à 50 000 t/an.

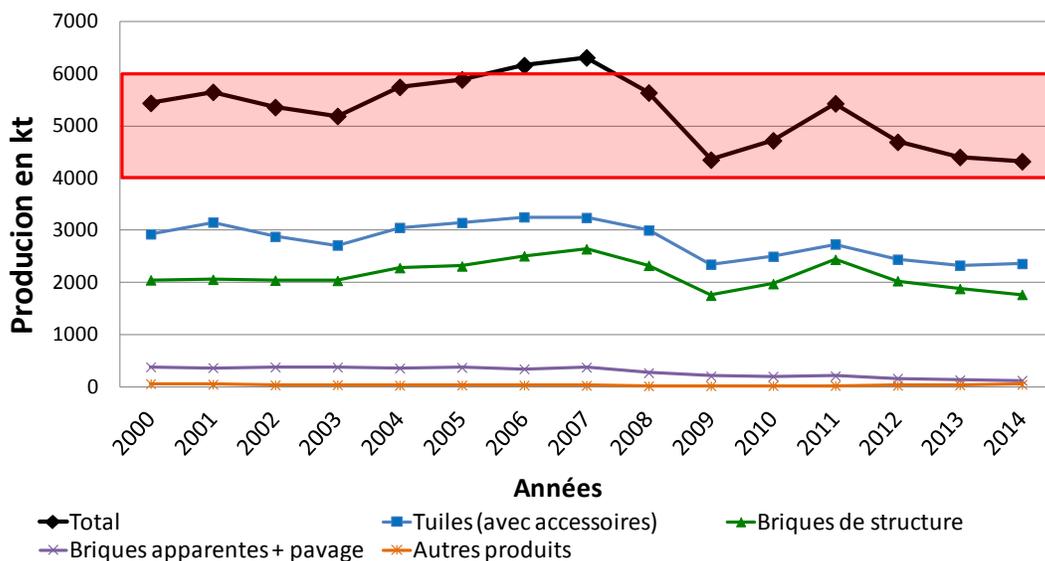


Figure 1-4 : Courbe de l'évolution de la production annuelle française de tuiles et briques (FFTb, 2014)

La majorité de la production correspond aux tuiles (environ 3 Mt/an) suivie de près par la production de briques de structure (environ 2 Mt/an), puis par la production de briques apparentes et pavage (environ 500 000 t/an) et enfin par celle des autres produits tels que les accessoires en terre cuite (environ 100 000 t/an) (Figure 1-4). Il existe très peu de sites qui ne produisent que des accessoires de terre cuite, ceux-ci sont souvent produits soit dans les usines de briques pour les accessoires briques, soit dans les usines de tuiles pour les accessoires tuiles et de toitures. La France est ainsi l'un des premiers exportateurs mondiaux de produits de terre cuite.

Le volume de matières premières nécessaire à cette production est supérieur d'environ 20 % à celui produit suite aux pertes en eau et éléments volatils lors de la cuisson.

1.3. Les processus de fabrication

Les matériaux en terre cuite sont fabriqués à partir de « terres argileuses » naturelles, composées de minéraux argileux, auxquelles l'industriel ajoute, si besoin, des dégraissants et additifs (Kornmann, 2005) afin d'obtenir un matériau cuit répondant, selon l'utilisation, à des critères rigoureux concernant l'aspect, la résistance mécanique, la durabilité dans le temps, les performances thermiques, l'imperméabilité...

Avant de présenter plus en détail la nature des matières premières utilisées dans la production, nous proposons une description des processus de production généralement utilisés dans l'industrie française, depuis la préparation de la pâte jusqu'à la cuisson.

Une fois la matière première extraite des carrières, l'étape suivante est appelée "préparation des terres". Il existe trois voies de préparation de la pâte : sèche, humide et semi-humide. En France et plus généralement pour la production de tuiles et briques, c'est la préparation semi-humide qui est généralement utilisée :

La préparation sèche n'est pas utilisée en France, mais est très développée dans les régions au climat sec sous lesquelles il est possible de produire des argiles sèches en sortie de carrière. Cette préparation présente l'avantage d'obtenir des granulométries très fines grâce à l'effritement des particules (les particules humides ne feraient que s'écraser par déformation plastique). Cette granulométrie très fine permet une meilleure homogénéité du produit, un meilleur aspect esthétique, une cuisson à plus faible température ainsi qu'une meilleure résistance mécanique. Elle est particulièrement intéressante pour les mélanges argileux comportant un pourcentage en calcaire significatif (on parle d'argile calcaire dans l'industrie de la terre cuite) car la faible granulométrie permet d'éviter la formation de grains de chaux lors de la cuisson. Les principaux inconvénients de cette préparation sont la nécessité d'un climat sec permettant l'extraction de matériaux argileux secs ou quasi secs et la nécessité d'un stockage fermé pour éviter l'ajout d'humidité entre l'extraction et la cuisson.

La préparation humide utilise une suspension de grains dans l'eau (barbotine) qui est utilisée par certains céramistes et artisans pour des productions spécifiques nécessitant un trempage du modèle dans la barbotine ou un dépôt de celle-ci au pinceau. Cette méthode généralement plus coûteuse que la préparation semi-humide (apport en eau, séchage et matériel de façonnage spécifique) reste réservée à des productions limitées.

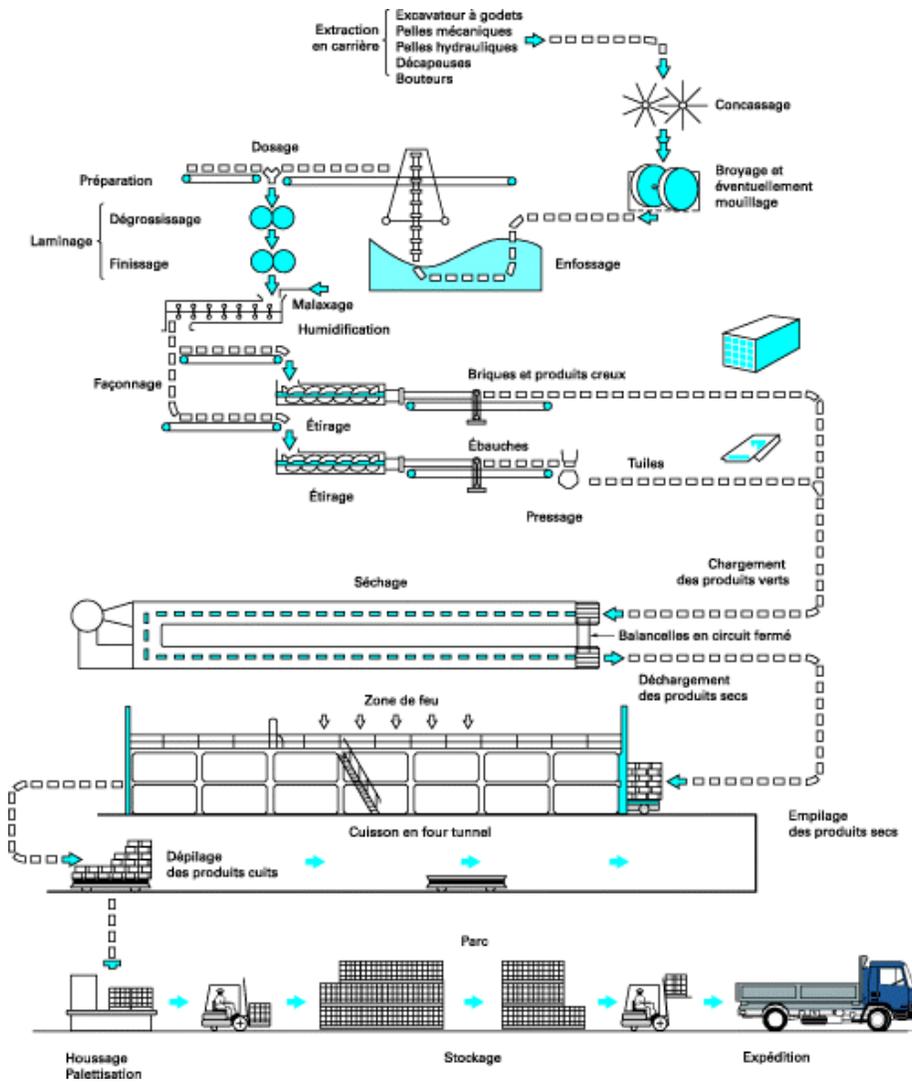


Figure 1-5 : Procédé de fabrication de produits de terre cuite (Kornmann, 2005)

La **préparation semi-humide** est la méthode utilisée en France dans la fabrication de produits industriels de construction en terre cuite.

La première étape consiste à éliminer les impuretés avec des épierreurs et des séparateurs magnétiques. Ensuite, le concassage et la fragmentation du matériau argileux favorisent l'homogénéisation du mélange et faciliteront son humidification. Un broyage est enfin effectué dans des meules verticales ou à cylindres horizontaux adaptés à la nature du mélange.

Les matières premières sont ensuite stockées dans une fosse, par superposition de couches horizontales des différents matériaux argileux exploités, c'est l'étape d'enfossage. Plusieurs mois peuvent s'écouler entre l'enfossage et la préparation de la pâte. Le prélèvement des matériaux s'effectue par tranches verticales de manière à réaliser un premier mélange auquel seront ajoutés dégraissants et éventuels additifs à l'aide de distributeurs doseurs. Un malaxage final permet d'homogénéiser le mélange et son taux d'humidité.

Une fois la pâte préparée, le **façonnage** a deux rôles principaux : d'une part donner une cohésion suffisante à la pâte (élimination de l'air inclus, amélioration de la plasticité grâce au mouillage par injection de vapeur d'eau et intensification de la compression de la pâte) et d'autre part donner à la pâte la forme finale du produit. La première étape commune à tous les produits est le filage. Ensuite, en fonction de la nature de la production, il y a pressage ou pas. La majorité des tuiles ainsi que quelques briques pleines sont produites par filage puis pressage suite aux contraintes techniques principalement liées à leur forme. La majorité de la production de briques se fait seulement par filage.

L'opération **de séchage** est une étape délicate et importante de la fabrication pour obtenir des produits de qualité. Elle est nécessaire pour que les produits ne contiennent plus que 1 à 2 % d'eau résiduelle avant la cuisson car les produits sortent du façonnage avec une teneur en eau qui varie de 15 à 30 % selon la matière première. Ce séchage doit donc être le plus uniforme possible.

Il existe deux grands types de séchoirs utilisés dans l'industrie de la terre cuite, les séchoirs statiques à chambres et les séchoirs continus. Dans les séchoirs statiques ou à chambres à grande ventilation, les produits sont posés sur des étagères et sont séchés de façon individuelle par de l'air qui est brassé. Chaque chambre est ventilée de façon séparée. Ces séchoirs sont adaptés aux temps de séchage relativement longs (12 à 72 h). Dans les séchoirs à circulation continue des produits, ces derniers passent lentement dans le séchoir sur des wagons se déplaçant sur des rails. Ces séchoirs sont parfois en ligne avec le four permettant d'éviter une manipulation entre le séchoir et le four. Les temps de séchage sont généralement plus courts que dans les séchoirs à chambre (12 à 48 h pour un séchoir tunnel traditionnel, en moins de 12 h pour un séchoir "rapide").

Afin d'obtenir les propriétés et qualités des céramiques que les produits n'ont pas en sortie de séchoir, il est nécessaire de les soumettre à la cuisson à des températures élevées (900 à 1 150°C).

Lors **de la cuisson**, de nombreuses réactions physico-chimiques se réalisent dans le mélange argileux :

- jusqu'à 200°C : dégagement de l'eau résiduelle de séchage et de l'eau d'hydratation (les smectites peuvent perdre une part importante de leur eau), on parle d'eau physisorbée ;
- de 200 à 450°C : élimination des matières organiques ;
- à 350°C : décomposition totale ou partielle des hydrates non argileux ;
- de 400 à 680°C : destruction des minéraux argileux avec départ de l'eau de constitution ;
- 573°C, appelé Point Quartz : changement de forme cristallographique du quartz ;
- 750 à 850°C : décomposition du carbonate de chaux en chaux vive et dégagement de gaz carbonique.

Les industriels des tuiles et briques utilisent principalement des fours tunnels pour leur production (Figure 1-5). Ce sont des fours continus à feu fixe et charge mobile que traversent les matériaux à cuire.

On y trouve plusieurs zones successives par lesquelles passent les produits :

- le préfour qui permet de préchauffer rapidement la charge à 100°C ;
- la zone de chauffage des produits où les vitesses de montée en température sont souvent de 30 à 100°C/h ;
- la zone de cuisson correspond au palier de cuisson ;

- la zone de refroidissement où les produits refroidissent par réchauffage de l'air soufflé qui se déplace vers la zone de cuisson. On distingue trois zones de refroidissement : la zone de trempe pour un refroidissement rapide par injection d'air frais, une zone de refroidissement lent pour le passage du Point Quartz (température critique de changement de phase cristalline du quartz pouvant générer des zones de faiblesses du produit cuit, voire des fêles) et une seconde zone de refroidissement rapide jusqu'à la sortie des produits.

Après le refroidissement, les produits nécessitent souvent des finitions :

- une rectification des briques pour la pose à joint mince (planéité et parallélisme des faces de pose) ;
- un siliconage des tuiles par trempage pour éviter d'éventuelles efflorescences ;
- un engobe pour les tuiles afin de modifier leur couleur naturelle, de leur donner un aspect lisse et/ou d'obtenir une couche de base pour un émaillage ;
- ...

Après les finitions, les produits finis subissent un contrôle qualité. La production de terre cuite nécessite un grand nombre de manutentions, de plus en plus automatisées entre les différentes étapes de production, l'empilage et le dépilage pour le séchoir et pour le four, l'emballage, la palettisation...

La composition du mélange de production a un impact direct sur la fabrication puisqu'elle en conditionne les étapes ultérieures (façonnage, séchage et cuisson) afin d'obtenir des produits respectant les cahiers des charges des industriels (aspect produit fini, dimensions finales après retrait, résistance mécanique, conductivité thermique...). Les caractéristiques du mélange, si importantes dans le processus de fabrication, font l'objet du paragraphe suivant.

1.4. La matière première

Les produits de l'industrie de la terre cuite sont élaborés à partir de matériaux argileux prélevés en carrière auxquels peuvent être ajoutés, si besoin, des dégraissants et/ou additifs de diverses natures. Le mélange ainsi obtenu est appelé "mélange de production". Le terme de "mélange argileux" sera utilisé pour décrire le mélange des matériaux argileux naturels prélevés au sein d'une ou plusieurs carrières.

L'extraction des matériaux argileux est réalisée au cours de campagnes de courte durée (de l'ordre du mois), environ une fois par an, afin d'extraire le volume de matériaux nécessaire à la production annuelle dans de bonnes conditions climatiques (mois secs de l'été), à partir de formations géologiques les plus homogènes possibles. Les propriétés des formations géologiques pouvant varier d'une zone à l'autre d'une carrière ou entre carrières, une caractérisation de la matière première est réalisée après chaque campagne de prélèvement (durée moyenne d'exploitation d'une carrière entre 10 à 30 ans). La courte période d'extraction permet aussi de limiter dans le temps les impacts écologiques, sociétaux et économiques qui y sont liés (Circulation importante de camion, poussières,...).

Les mélanges argileux utilisés dans la fabrication des produits en terre cuite sont majoritairement constitués de minéraux argileux, et en moindre proportion de quartz, silicates et oxydes. Leur granulométrie doit être fine (majoritairement inférieure à 25 μm), mais suffisamment étalée pour permettre un bon empilement de particules, une bonne cohésion et éviter les fissures au séchage.

Les roches sédimentaires généralement employées dans l'industrie de la terre cuite comprennent les minéraux argileux suivants : une proportion importante de kaolinites et d'illites, et dans une moindre part des smectites et des chlorites. Il s'agit de phyllosilicates qui présentent la caractéristique d'être formés d'un empilement plus ou moins régulier de feuillets constitués de tétraèdres T (reliés entre eux par 3 sommets) et dont le quatrième sommet est généralement relié à un autre feuillet constitué d' octaèdres O (Meunier, 2005) :

Tableau 1 : Principales caractéristiques structurales des principaux phyllosilicates composant les mélanges argileux utilisés dans l'industrie de la terre cuite

	Structure (couches tétraédriques T et couches octaédriques O)	Epaisseur interfoliaire	Formule structurale
Kaolinite	T-O	7 Å	$[\text{Si}_2\text{O}_5]\text{Al}_2(\text{OH})_4$
Illite	T-O-T	10 Å	$\text{K}_x\text{Al}_2[\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot \gamma\text{H}_2\text{O}$
Smectite	T-O-T	10 - 21 Å	$\text{M}_x^+ [(\text{Al}_{2-x}\text{Mg}_x)\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]^- \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Chlorite	T-O-T-O	14 Å	$(\text{Fe,Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

- Les kaolinites qui présentent une forte teneur en aluminium (environ 46 %), contribuent à donner une bonne plasticité facilitant le façonnage et présentent un faible retrait au séchage et à la cuisson. Elles nécessitent des températures de cuisson élevées (au-dessus de 1 000°C) et possèdent de bonnes propriétés réfractaires après cuisson ;
- les illites apportent de la plasticité au mélange argileux. C'est le type d'argile le plus répandu et le plus utilisé dans la terre cuite. La présence de potassium K dans leur structure cristalline peut abaisser la température de début de fusion vers 1 050°C ;
- les smectites, parmi lesquelles se trouve la montmorillonite, sont des argiles gonflantes, c'est-à-dire qui peuvent absorber de l'eau dans leur structure. Elles apportent une très grande plasticité et une grande cohésion au mélange argileux, par contre le séchage de celui-ci est rendu difficile par le retrait important et la forte rétention d'eau capillaire ;
- les chlorites offrent des propriétés glissantes et absorbantes.

En complément de la caractérisation minéralogique, **l'analyse chimique** des éléments majeurs de la matière première permet à partir du diagramme d'Augustinik (Augustinik, 1957) (Figure 1-6) d'identifier le potentiel du mélange pour la fabrication de produits en terre cuite ou de donner des indications sur les ajouts ou les mélanges à réaliser pour s'approcher des domaines compatibles avec la production de tuiles ou briques :

- le diagramme d'Augustinik présente en ordonnées l'appauvrissement en silice exprimé par le rapport des teneurs massiques en $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ et en abscisses la somme des teneurs en alcalins R_2O ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$), en alcalino-terreux RO ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO}$) et en oxydes de fer (Fe_2O_3) ;
- les domaines correspondant aux différents produits de l'industrie de la terre cuite ont été définis à partir de mélanges de production (Augustinik, 1957). Le rapport $[\text{Al}_2\text{O}_3]/[\text{SiO}_2]$ doit être inférieur à 0,55 pour les briques de construction et à 0,3 pour les tuiles. En fonction des

proportions de minéraux argileux présents dans le mélange (Smectite rapport Si/Al entre 2 à 2,4 ; illite 1,5), la composition du mélange doit comprendre d'autres silicates dans des proportions adéquates qui peuvent être ajustées par des ajouts ;

- le domaine de valeurs acceptables sur l'axe des ordonnées est assez restreint pour les tuiles (entre 0,09 et 0,17) et nettement plus large pour les briques (entre 0,06 et 0,25). L'ajout de silice, ou de kaolinite diminue la valeur du mélange alors que celui de l'illite, de la chlorite ou de la smectite l'augmente.

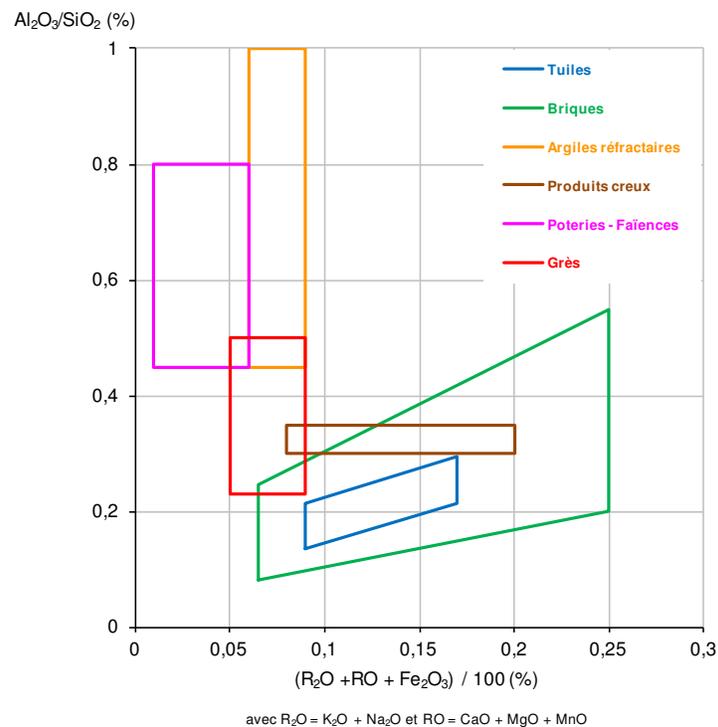


Figure 1-6 : Diagramme Augustinik (source CTMNC)

L'analyse granulométrique permet d'évaluer la distribution des différentes classes granulométriques de la matière première et éventuellement de la modifier pour obtenir un mélange aux caractéristiques compatible avec une production de qualité. Les résultats de cette analyse sont représentés sur un diagramme ternaire couramment utilisé au CTMNC, le diagramme de Winkler (Winkler, 1954) (Figure 1-7) :

- les trois pôles correspondent à la fraction fine inférieure ou égale à $2,5 \mu m$ (argiles), la fraction entre $2,5$ et $25 \mu m$ (limons) et la fraction plus grossière supérieure à $25 \mu m$ (limons grossiers, sables et graviers). Il convient de noter que le terme "argiles" ne fait ici aucune référence à la minéralogie et peut correspondre à différents minéraux.
- Une démarche analogue à celle présentée sur le diagramme d'Augustinik a permis de définir les distributions granulométriques correspondant aux critères des industriels de production de tuiles et briques établis par Winkler durant les années 50 à partir de mélanges de production d'Allemagne. La proportion de grains de la classe "argiles" ($<2,5 \mu m$ ici) augmente entre les

briques pleines (10 à 20 %), les briques creuses (20 à 40 %) et les tuiles (30 à 60 %). La proportion d'éléments de la classe des limons fins (entre 2,5 et 25 µm) qui est au minimum de 15-20 %, reste faible pour les briques pleines (max 35 %) et peut atteindre 55 % pour les autres matériaux. Quant à la fraction la plus grossière (>25 µm), sa proportion comprise entre 10 et 60 % dans les tuiles monte à plus de 70 % dans les briques creuses.

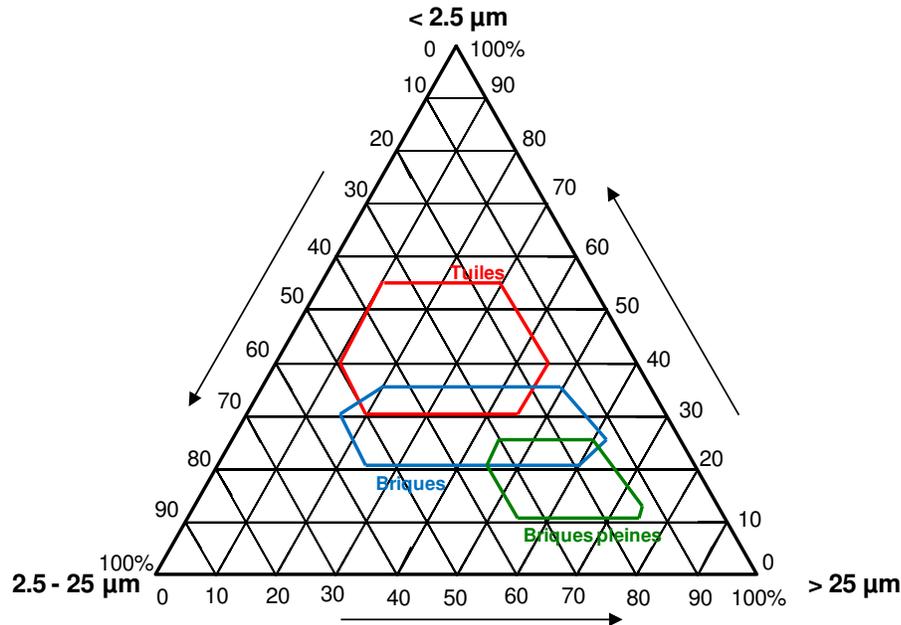


Figure 1-7 : Diagramme de Winkler (source CTMNC)

Cependant, l'information sur la distribution granulométrique apportée par ce diagramme n'est pas suffisante pour une caractérisation en vue d'une utilisation de la matière première par l'industrie de la terre cuite. Il est en effet nécessaire de connaître **la teneur en dégraissants efficaces**, éléments non plastiques qui vont faciliter la mise en forme de la pâte et qui jouent un rôle important au niveau du séchage mais aussi pour la maîtrise des dimensions des produits et de la porosité. Les dégraissants efficaces correspondent à la fraction supérieure à 200 µm qui est incluse dans la fraction supérieure à 25 µm dans le diagramme de Winkler.

La taille maximale des particules formant le dégraissant dépend de l'aspect final souhaité pour le produit :

- des particules de granulométrie comprise entre 0,5 et 1 mm seront utilisées pour la fabrication des tuiles pour lesquelles la peau extérieure est importante pour des questions esthétiques et pour des réseaux poreux compatibles avec l'usage (imperméabilité et résistance au gel) ;
- des particules d'environ 2 mm pourront entrer dans la composition des mélanges de fabrication de briques, pour lesquelles l'aspect de surface n'est pas primordial puisqu'elles seront enduites lors de la construction.

Les dégraissants permettent de diminuer la plasticité de la pâte, de réduire l'apport en eau de façonnage, de diminuer le retrait de séchage, de faciliter l'évacuation de l'eau au cours du séchage, de

faciliter le dégagement des gaz au cours de la cuisson, d'obtenir une meilleure oxydation au cœur du produit durant la cuisson et d'améliorer la tenue des produits à haute température.

Les dégraissants les plus couramment employés sont : les sables quartzeux, les sables feldspathiques ou micacés, les chamottes qui sont des déchets de produits de terre cuite broyés à la granulométrie souhaitée, les basaltes, les micaschistes et les gores (granites en cours de décomposition).

En complément des dégraissants, afin de corriger un défaut lié à la nature de certaines matières premières et/ou pour réaliser des produits avec des propriétés particulières, il est parfois nécessaire d'ajouter **aux mélanges des constituants appelés additifs**. Il peut s'agir de :

- carbonate de baryum qui précipite les sels solubles pouvant causer le phénomène d'efflorescence ;
- fluorure de calcium et dérivés du bore (borax), qui améliorent des propriétés fondantes du mélange ;
- chaux vive qui réduit l'humidité du mélange ;
- calcaire broyé fin qui augmente la porosité et éclaircit la couleur ;
- lignosulfonates qui permettent une régulation du séchage en devenant plus uniforme et qui améliore la plasticité du mélange ;
- carbonate de sodium qui améliore aussi la plasticité du mélange ;
- dioxyde de manganèse et dioxyde de titane qui permettent une coloration respective en brun (avec une argile ferrugineuse) ou en gris (avec une argile calcaire) et en orangé, jaune ou crème.

Afin de diminuer la conductivité thermique et donc d'améliorer les résistances thermiques des briques, **des porosants** peuvent être aussi ajoutés, il peut s'agir de :

- calcaires ou carbonates ;
- composés déjà poreux, inertes et stables thermiquement (perlite, vermiculite, diatomée, kieselguhr, argile poreuse, verre poreux). L'inconvénient de ces composés est qu'ils doivent être incorporés avec une teneur assez élevée pour être efficace ce qui peut affecter les propriétés du mélange ;
- composés organiques qui vont se décomposer, brûler et dégager du CO₂ à la cuisson (Sciures et écorces de bois, déchets végétaux, papier, polystyrène expansé, déchets organiques, poudres de charbon, cendres de combustions non entièrement oxydées...). Leur addition doit être limitée car ils augmentent les difficultés de contrôle de la cuisson en augmentant le pouvoir combustible du mélange.

Les diagrammes présentés dans les Figure 1-6Figure 1-7 donnent une idée des proportions de minéraux argileux, dégraissants et additifs dans les mélanges de production. Celles-ci diffèrent selon les sites de production et ne sont pas diffusées même auprès du CTMNC, il s'agit de "secret de fabrication" qui permet à chaque producteur de proposer des produits de la meilleure qualité à partir des carrières qu'ils exploitent.

2. Ressource actuelle

Dans la partie précédente, nous avons décrit les modes de fabrication de l'industrie de la terre cuite et mis en avant qu'ils étaient dépendants de la matière première et des performances du produit fini souhaitées. Cette matière première est extraite dans les carrières et sa nature dépend directement des conditions de dépôts et de formation des différentes couches géologiques. Dans cette partie, nous nous intéresserons donc aux types de roches sédimentaires exploitées par les différents industriels.

2.1. L'industrie extractive des matériaux argileux pour l'industrie de la terre cuite en France

Les tuileries et briqueteries se sont historiquement installées à proximité des sites d'extraction de la matière première nécessaire à leur production.

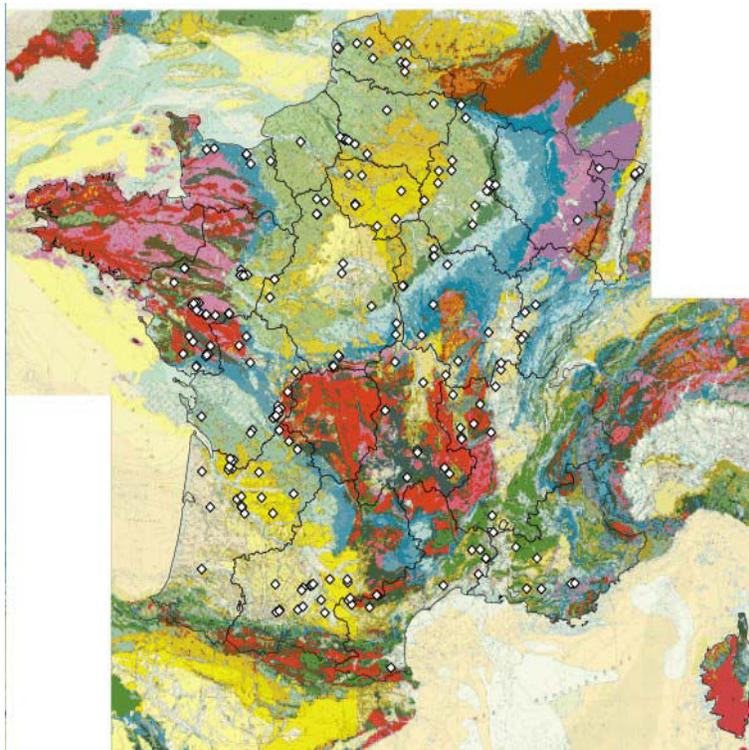


Figure 1-8 : Ensemble des carrières de production de matériaux pour l'industrie des matériaux en terre cuite en France métropolitaine (<http://materiaux.brgm.fr/CartesExploitations.aspx>)

La base de données géoréférencée « Carrières et matériaux » gérée par le BRGM recense l'ensemble des carrières de France (<http://materiaux.brgm.fr/>). Cet inventaire, mis à jour régulièrement, présente l'activité extractive en France, tous matériaux confondus. Pour chaque carrière, une fiche descriptive fournit la localisation précise du site d'exploitation, son emprise au sol, le nom de l'exploitant, la formation géologique exploitée, la production annuelle... Un exemple de fiche est présenté en Annexe 1, ainsi que l'ensemble des carrières exploitées par l'industrie de la terre cuite. Celles-ci sont localisées sur le territoire grâce au site Geoportail de l'IGN (Figure 1-9 et Figure 1-10).

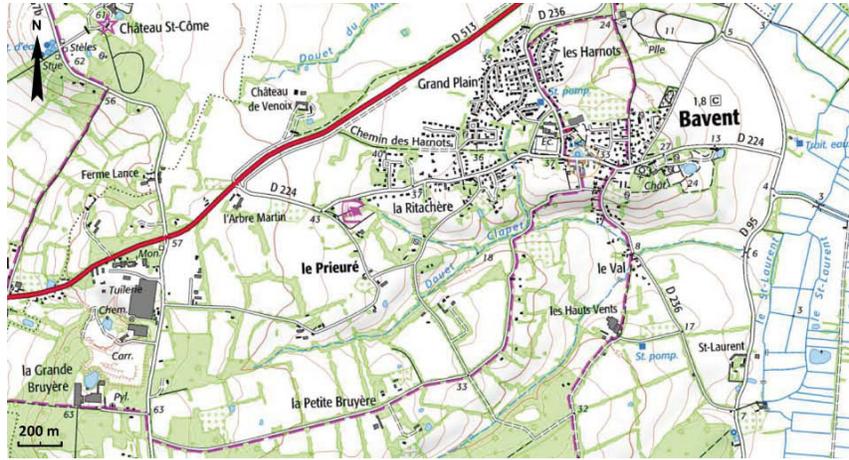


Figure 1-9 : Exemple de l'exploitation de Bavent (14) où carrière et usines se trouvent sur le même site (www.geoportail.gov.fr/)

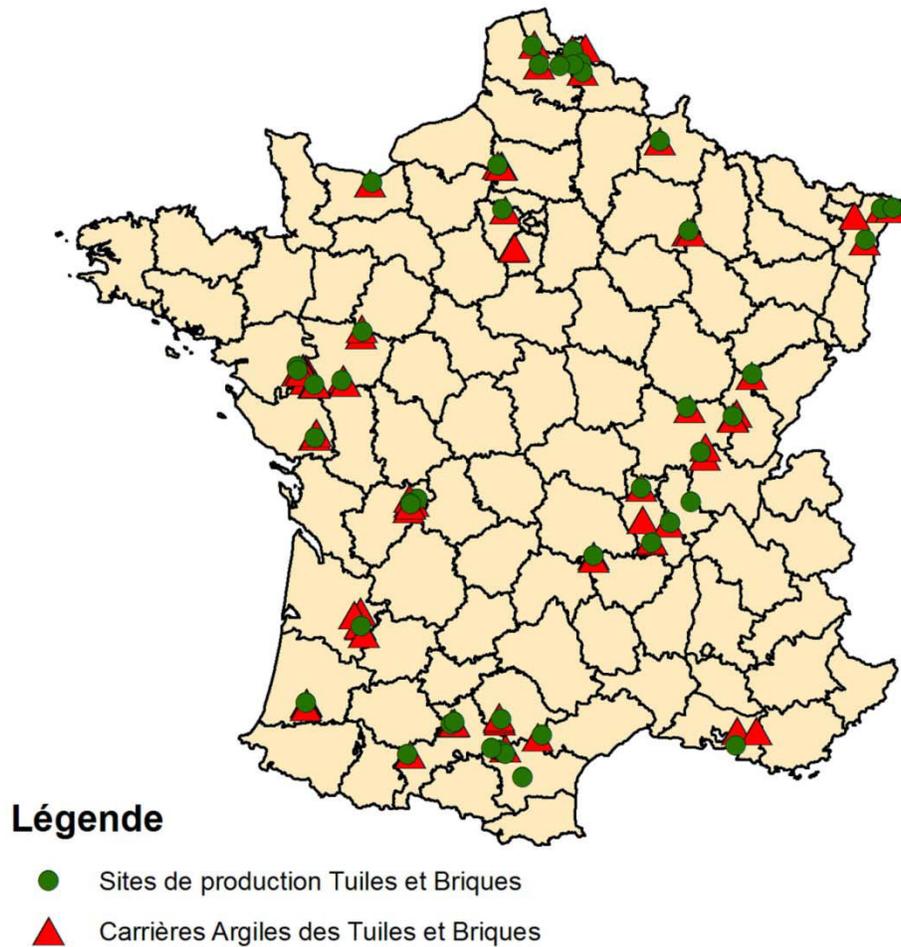


Figure 1-10 : Répartition des carrières de matériaux argileux et des usines de production des tuiles et briques (production > 15 000 t/An) en France (BRGM, 2010; CTMNC, 2012).

2.2. Les matériaux exploités

Ceux-ci ont été caractérisés à partir de l'analyse des formations géologiques correspondant à la zone d'emprise de la carrière en s'appuyant sur les informations disponibles dans les notices des cartes géologiques au 1/50 000, ou si besoin sur des publications.

Les différents gisements de matériaux argileux ont été regroupés en deux grands ensembles en fonction de leur genèse :

- **Le régolithe (R)** qui comprend toutes les formations géologiques de surface. Elles correspondent en général à des formations non consolidées. Parmi celles-ci, on distingue *les formations allochtones* [colluvions (R1), les loess (sédiments éoliens - R2) et les sédiments fluviaux (R3)] *des formations autochtones* [altérites formées sur place et dont la nature résulte des processus d'altération supergène (R4)].
- **Les roches sédimentaires consolidées (S)**, appartiennent à des séries sédimentaires issues de dépôts fluviolacustres (S1) ou de dépôts marins peu profonds (S2).

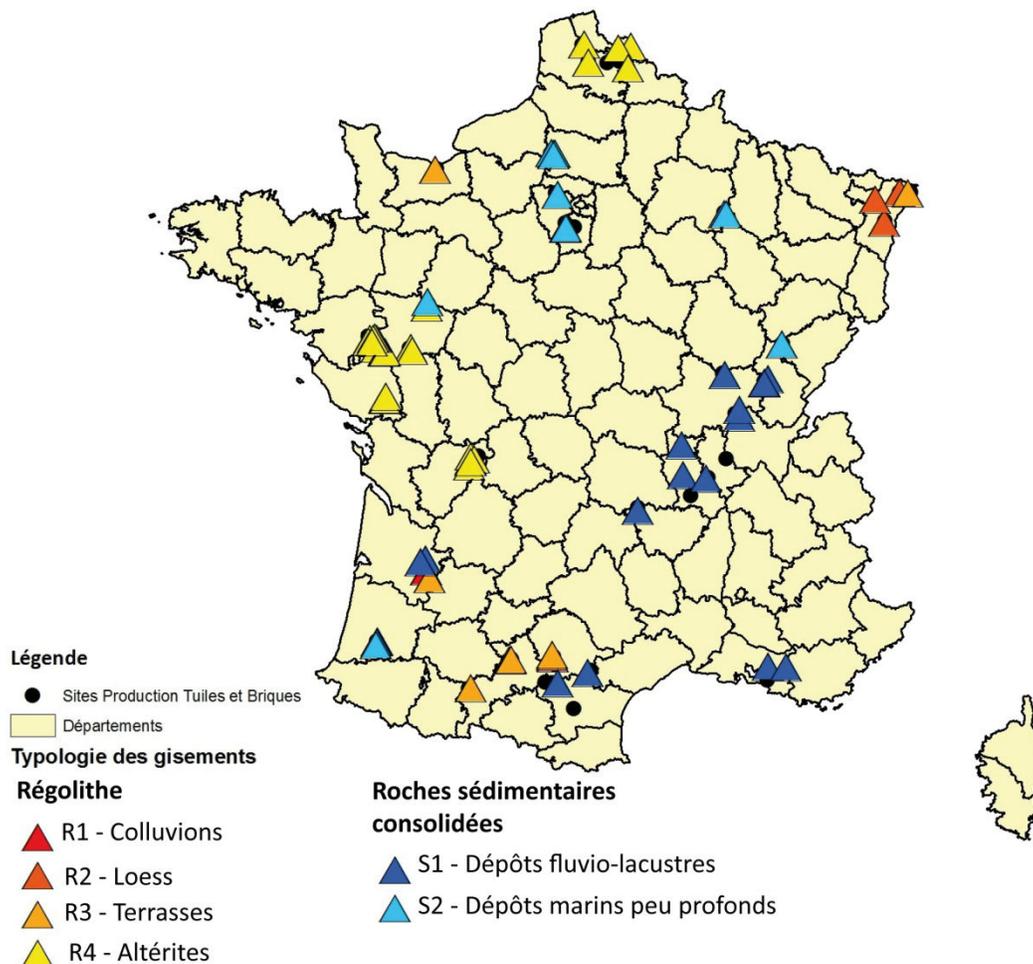


Figure 1-11 : Les deux grands modes de formation des matériaux argileux pour la production de tuiles et briques (47 sites majeurs, données CTMNC)

La répartition géographique (Figure 1-11) des carrières selon leur typologie montre certaines spécificités régionales : l'exploitation des lœss se fait exclusivement en Alsace et celle des colluvions dans la région de Bordeaux. Les sites de production du Nord-Pas-de-Calais utilisent principalement des altérites d'origine sédimentaire, ce sont des limons de plateaux contrairement aux altérites exploités par les producteurs de la région Pays de la Loire qui proviennent de l'altération du socle hercynien du massif Sud Armoricaïn. L'exploitation des séries sédimentaires consolidées et des sédiments fluviatiles est assez répartie sur l'ensemble du territoire français.

Dans ce qui suit, nous présentons les conditions de formation de chaque type de gisement et leur part dans l'industrie française de la terre cuite.

2.2.1. Le Régolithe

L'exploitation du régolithe représente un peu moins de la moitié de la production nationale ($\approx 43\%$) qui se répartit entre 19 % pour les formations allochtones et 24 % pour celles autochtones) (Figure 1-12).

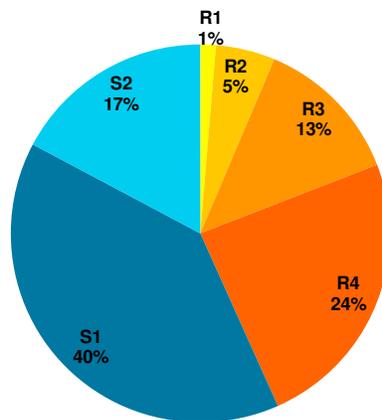


Figure 1-12 : Répartition de la production nationale en fonction des types de gisement

2.2.1.1. Les formations allochtones

Les colluvions (R1) sont le produit de l'érosion des terrains par ruissellement et gravité. Plusieurs mécanismes conduisent à leur formation :

- le ruissellement qui entraîne les particules en bas de pente lorsque la capacité de saturation du sol est dépassée lors de fortes précipitations,
- des coulées de débris ou coulées boueuses qui glissent sur les pentes sous l'effet de la gravité et de leur perte de cohésion due à la saturation du sol en eau (Leopold and Volkel, 2007).

Ils s'accumulent au pied des versants, en fond de vallée, les coulées de solifluxion pouvant remobiliser de grands volumes de la couverture altérée. Les colluvions sont mal triées et présentent très souvent des granulométries très hétérogènes (amas de blocs) ou beaucoup plus homogènes dans des cônes peu stratifiés riches en argiles. Leur géométrie peut être très variable, les coulées de solifluxion donnant naissance aux volumes les plus conséquents.

La formation des colluvions résulte d'interactions complexes entre les pentes locales, la formation des sols qui déstructurent le substrat des versants, la distribution des événements climatiques exceptionnels qui favorisent la formation de coulées de débris. S'ils se forment en permanence, il est difficile d'évaluer leur volume. Des études sur l'érosion de surface, montrent que seulement 10 % du matériel érodé s'accumule hors de la zone d'érosion, le reste restant piégé dans les ravines et rigoles.

Les colluvions représentent une part minime des altérites allochtones exploitées en France (moins de 1 %) répartis entre deux sites, l'un dans la Gironde (Gironde sur Drop - 33) et l'autre dans le Tarn (Damiatte - 81). D'après les âges de ces formations donnés par la carte géologique, il s'agit de formations fossiles mises en place lors de la dernière grande période glaciaire (Würm, soit entre 100 000 et 40 000 ans BP).

En Europe (Figure 1-13), **les loëss** (R2) se sont formés lors des dernières périodes glaciaires du quaternaire par accumulation de particules fines principalement d'origine éolienne (Pye, 1995) au niveau du front de la calotte glaciaire (Haase et al., 2007).

Les conditions périglaciaires qui régnaient en France avaient conduit au développement d'une steppe, avec une végétation discontinue de petite taille, où peuvent s'accumuler des particules fines transportées par le vent (Leplat, 1968).

Ces dépôts forment en Europe deux grandes bandes d'orientation Est-Ouest qui se rejoignent en Russie et sont parallèles aux fronts d'avancées extrêmes des glaciers Scandinaves pour la bande Nord (loëss du Nord de la Bretagne, du Bassin parisien et du Nord de la France) et à ceux des glaciers Alpains pour la bande Sud (loëss du bassin Rhodanien et de la vallée du Rhin à laquelle appartiennent les sites exploités dans l'industrie de la terre cuite) (Pye, 1995).

Peu de sites industriels exploitent les loëss qui représentent cependant 5 % de la production annuelle. Ils se situent tous en Alsace (Achenheim, Betschdorf et Seltz - 67). L'utilisation spécifiquement pour la production briques traduit les caractéristiques bien spécifiques de ce sédiment.

En Alsace, les loëss appartiennent au Pléistocène supérieur à moyen et montrent quatre cycles séparés par des pédo-complexes en partie interglaciaires (Lautridou et al., 1986). L'épaisseur la plus forte est observée dans les exploitations et atteint 30 m. Les loëss sont caractérisés par une granulométrie fine homogène qui facilite leur exploitation.

Les dépôts alluviaux ou sédiments fluviaux (R3) qui bordent les vallées des cours d'eau actuels s'organisent en terrasses étagées qui correspondent à des paliers d'incisions. Ceux-ci se sont formés au cours des cycles glaciaires/interglaciaires du Pléistocène moyen et supérieur. Les incisions se produisent lors de périodes d'instabilité climatique (Figure 1-14). L'incision majeure se produit à la transition période interglaciaire/période glaciaire en réponse à une forte augmentation du débit alors que les apports sédimentaires sont toujours limités par la couverture végétale. La période froide est caractérisée par des dépôts de sables et graviers de cours d'eau énergétiques. Les débits liquides augmentent en réponse à une infiltration limitée du fait du pergélisol et une évapo-transpiration réduite de la végétation steppique. Les apports solides conséquents proviennent du démantèlement des roches par les cycles gel/dégel. A la transition climatique suivante (glaciaire/interglaciaire), on observe à nouveau une incision, souvent plus faible qui traduit les déséquilibres entre flux hydrologique et apports sédimentaires, le cours d'eau voit son débit diminuer et un système méandrique se met en place (Bridgland et al., 2009). Ainsi chaque terrasse correspond à la relique d'une nappe alluviale qui s'est formée pendant un cycle glaciaire /interglaciaire dont la durée est évaluée autour de 100 000 ans.

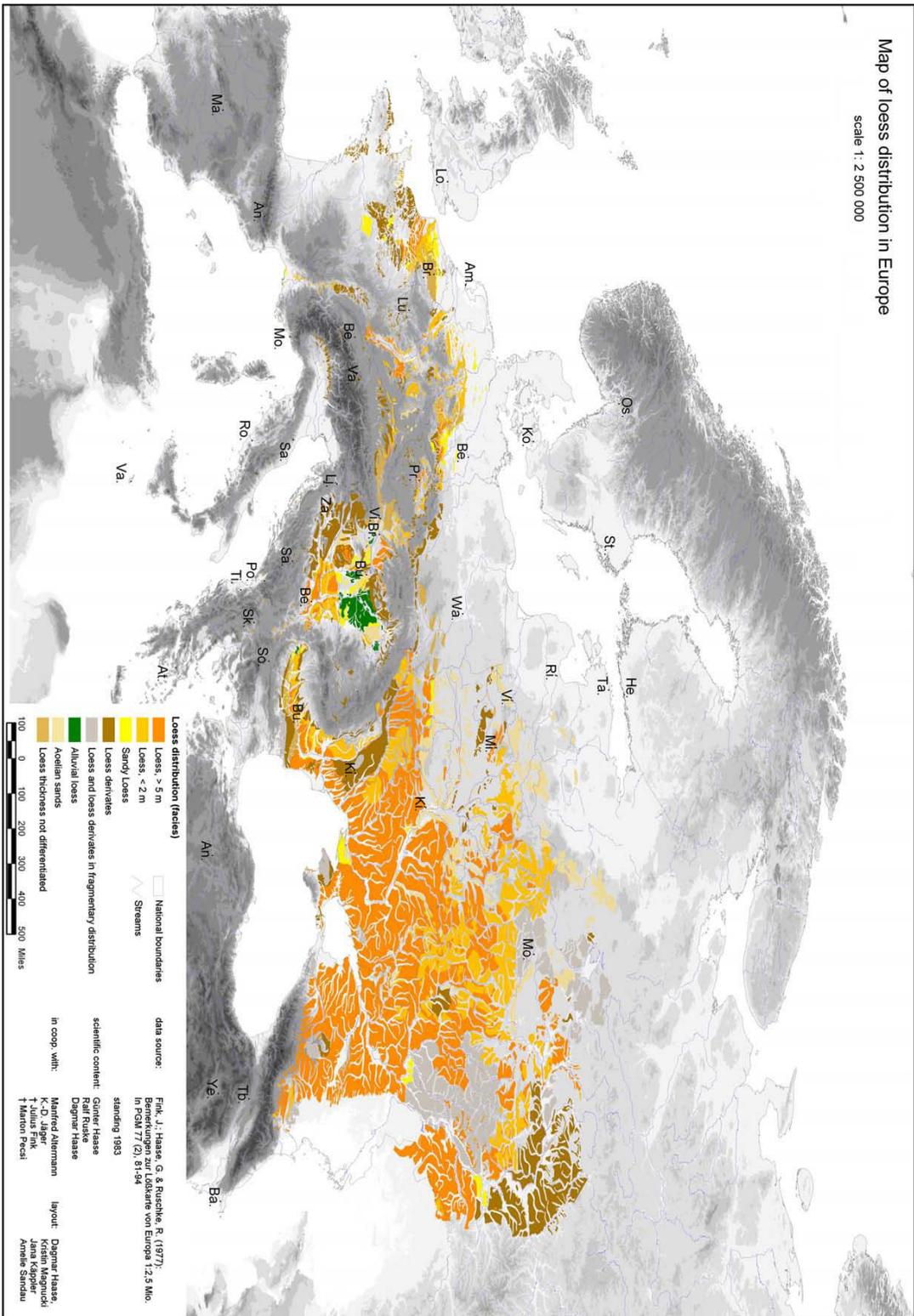


Figure 1-13 : Carte de distribution des loess en Europe (Haase et al., 2007)

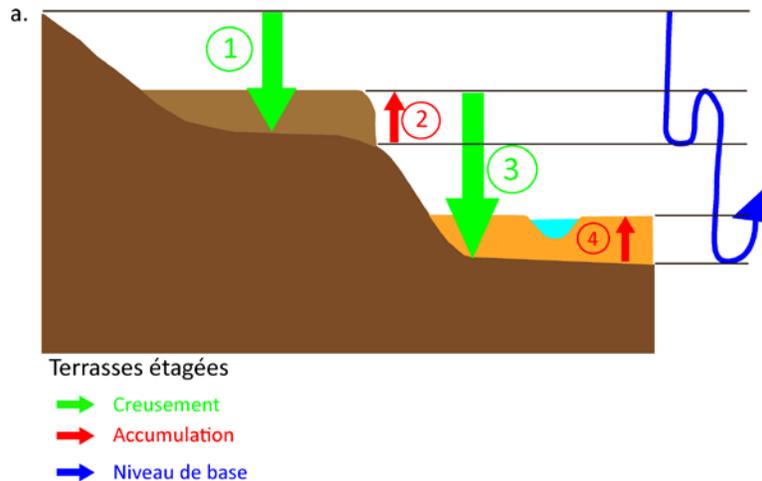


Figure 1-14 : Schéma théorique de la formation de terrasses étagées

Environ 13 % de la production française sont élaborés à partir des sédiments fluviaux. Les carrières exploitant ce type de formation se trouvent dans la vallée de la Garonne [6 sites dont 2 à Colomiers (31) et les autres à Leguevin (31), Blajan (31), Damiatte (81) et Gironde sur Dropt (33)], celles du Rhin [dépôts alluvionnaires anciens du Rhin remaniés par de petits cours d'eau pour Seltz (67)] et de l'Orne en Normandie [Bavent (14)].

2.2.1.2. Les formations autochtones

Celles-ci sont le résultat des interactions entre géosphère, biosphère, hydrosphère et atmosphère qui contrôlent le développement de profils d'altérations formés *in situ*. Les caractéristiques minéralogiques des altérites sont héritées des matériaux parentaux et évolueront avec l'intensité de l'altération supergène.

Les processus d'altération se divisent en deux (Cojan and Renard, 1997) : l'altération chimique qui transforme la composition initiale des roches par la mise en solution et/ou précipitation d'éléments chimiques ; l'altération mécanique, plus connue sous le terme d'érosion, qui arrache mécaniquement des particules d'une roche qui sont ensuite transportées par le ruissellement de surface, n'affectant ainsi ni la composition minérale ni la composition chimique.

Ce sont les réactions de l'altération chimique, principalement l'hydrolyse, qui vont attaquer la structure des minéraux silicatés (micas, feldspaths et plagioclases) (Figure 1-15) pour donner les phyllosilicates, les minéraux argileux. Le climat (température et eau) est un acteur majeur dans la formation des produits d'altération et divers types d'altérites peuvent se former : profils kaoliniques, cuirasses ferrugineuses, croûtes siliceuses ou carbonatées. Les processus de formation sont très lents, de l'ordre de 1 à 10 m par Ma (Ricordel-Prognon et al., 2009).

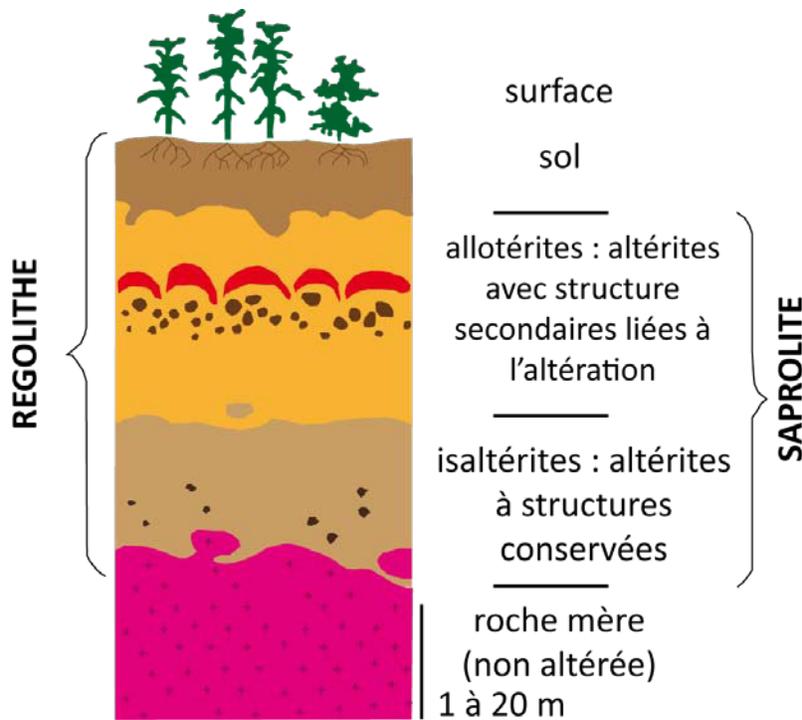


Figure 1-15 : Profil d'altération selon (Ricordel-Prognon et al., 2009)

D'après les données de la carte géologique (infoterre.brgm.fr/), **les altérites** (R4) sont largement représentées sur le territoire français (Figure 1-16). On trouve les altérites de séries sédimentaires dans le Bassin Parisien et celles de socle sur la bordure Est du Massif Armoricaïn et la bordure Ouest du Massif Central. L'absence d'altérites dans les autres zones traduit une compétition entre altération chimique et érosion mécanique en faveur de la seconde.

La production associée à l'extraction d'altérites (R4) correspond à 24 % de la production nationale. Les altérites utilisées par les industriels des tuiles et briques représentent soit les produits de l'altération de séries sédimentaires, appelés limons de plateaux [Nord de la France, Flines les Raches, Lomme, Phalempin et Templeuve (59), Cauchy à la Tour, Hulluch et Wardrecques (62)] ou du socle [Grand Ouest, La Boissière du Doré (44), Durtal, La Séguinière, St Laurent des Autels et Vihiers (49), St Martin des Fontaines (85) et en Charente, Roumazières Loubert (16)].

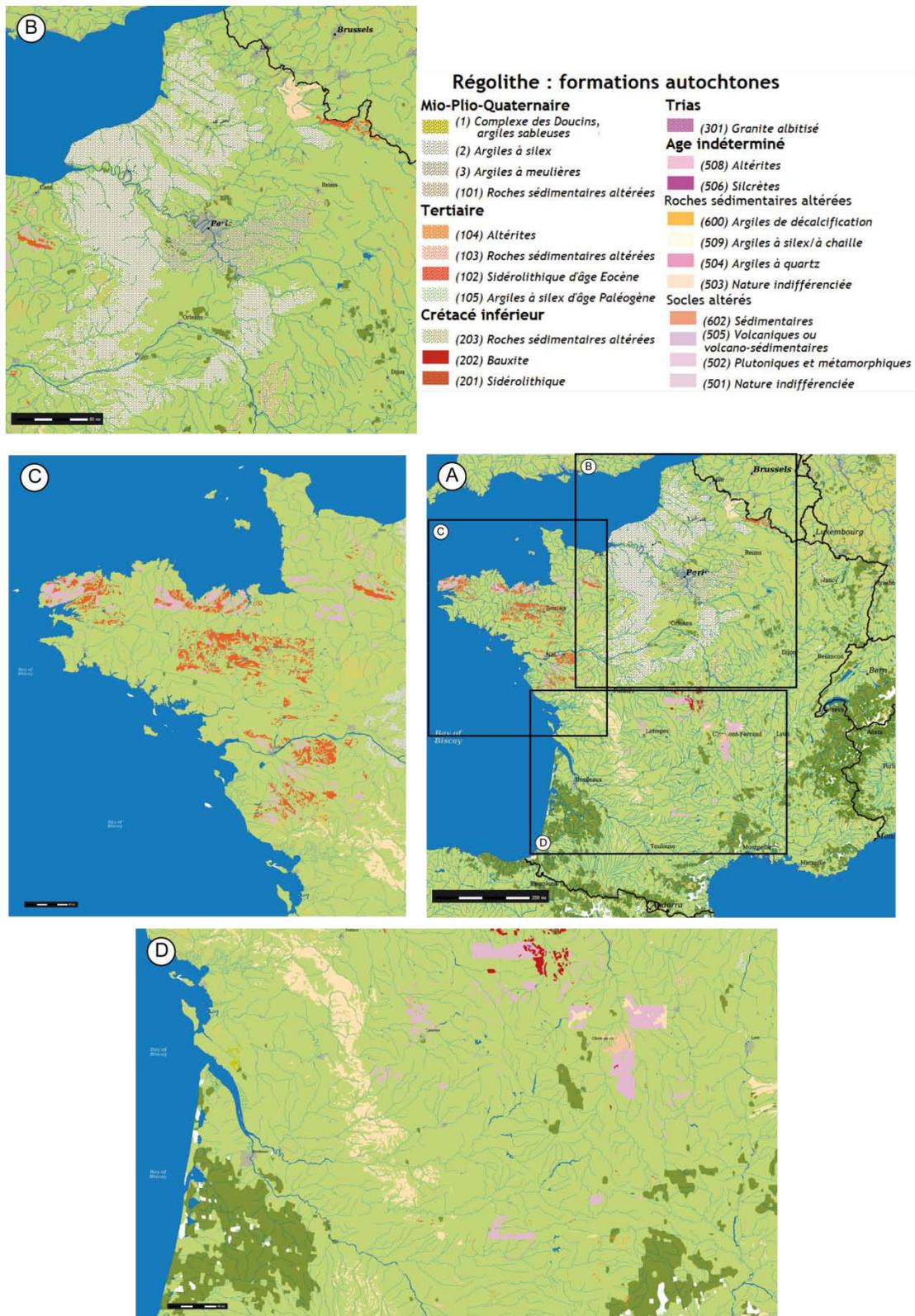


Figure 1-16 : La carte du Régolithe allochtone (BRGM, 2015) et encarts sur les régions possédant des formations conséquentes : A) Carte de France entière ; B) le Bassin parisien ; C) le Massif Armoricain ; D) le Massif Central et le Bassin Aquitain.

2.2.2. Les roches sédimentaires (S),

Celles-ci correspondent généralement à des séries sédimentaires anciennes, déposées bien avant le Quaternaire. Dans les carrières actuellement en exploitation, les âges se répartissent entre le Mésozoïque (entre 216 à 65 Ma) et le Cénozoïque (55-2 Ma) auxquels on peut ajouter une carrière dont les formations géologiques sont plus anciennes, datées du Paléozoïque (entre 305 et 295 Ma).

Leur exploitation représente 56 % de la production nationale. Deux types de formations sont exploitées, d'une part des dépôts fluvio-lacustres (S1) et d'autre part des dépôts marins (S2).

2.2.2.1. Les dépôts fluvio-lacustres

Le bassin versant d'un cours d'eau peut être divisé en trois parties : la zone amont dans laquelle les processus érosifs dominent, le cours moyen, lieu d'accumulation de sédiments et de leur remaniement par les divagations des chenaux fluviaux et enfin l'embouchure siège des interactions complexes entre processus fluviaux, tidaux et de la houle.

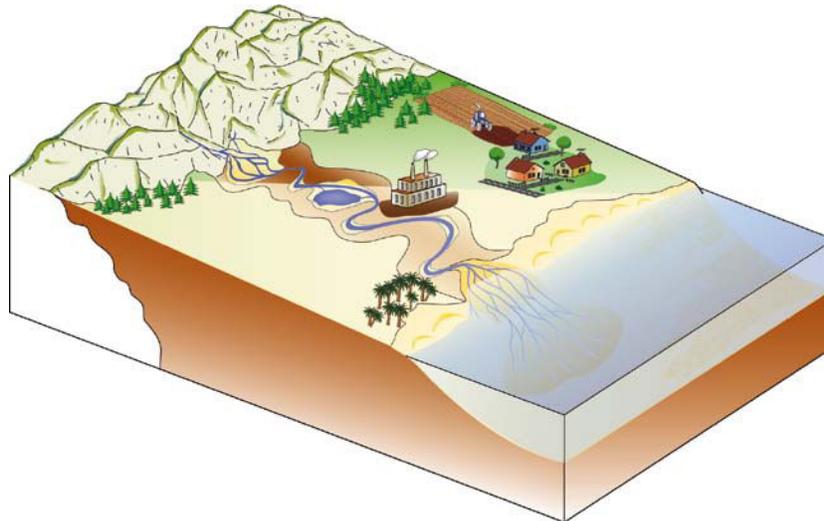


Figure 1-17 : Schéma d'un bassin versant

Les dépôts fluvio-lacustres (S1) qui sont exploités dans les carrières appartenaient aux cours moyens de paléo- cours d'eau. La plaine d'inondation (lit majeur) est alimentée par les crues de débordement qui permettent le transfert des sédiments en suspension du cours chenalisé vers les étendues aux morphologies peu marquées qui caractérisent la plaine d'inondation. La granulométrie des sédiments ainsi déposés diminue en s'éloignant du cours d'eau, sables sur les levées passant à des limons puis à des argiles qui s'accumulent dans les points bas du lit majeur qui jouent le rôle de bassins de décantation. Le taux de sédimentation dépend de la charge sédimentaire, de la fréquence des crues, des valeurs autour de 0,1 à 0,3 cm par siècle sont proposées (Bridge, 2003). Les dépôts fins de la plaine d'inondation peuvent être disséqués lors de la migration latérale des chenaux qui inciseront les dépôts fins et déposeront des sables.

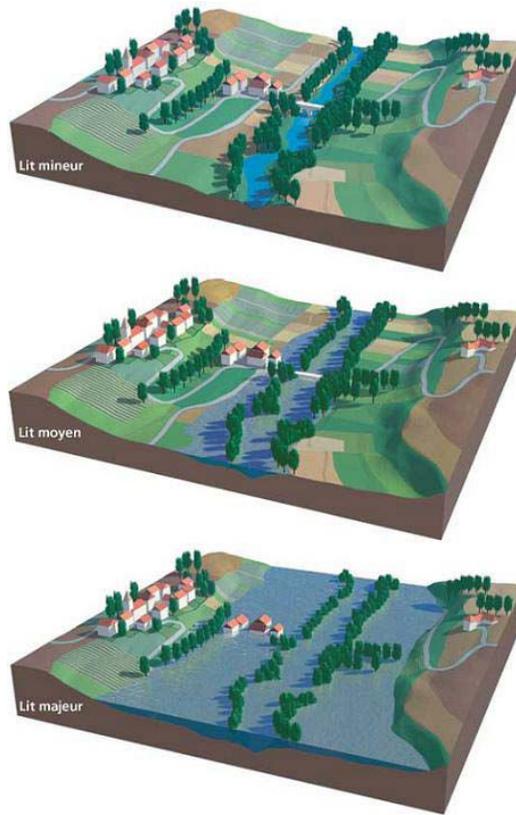


Figure 1-18 : Les différents lits d'une rivière © MEDD - Dossier informations inondations (août 2004)

Les systèmes lacustres sont généralement alimentés par les cours d'eau qui se jettent dans ces masses d'eau immobiles. Aux périodes de crues seront associées des dépôts silto-sableux alors que les dépôts argileux s'accumuleront pendant les périodes de bas niveau des eaux fluviales. Si les conditions climatiques sont contrastées entre les étés et les hivers, ces dépôts stratifiés correspondent à des varves dans lesquelles les dépôts fins et sableux alternent de façon régulière. Les taux d'accumulation, de l'ordre de quelques centimètres par an à proximité de l'embouchure des cours d'eau, diminuent rapidement lorsque l'on s'en éloigne.



Figure 1-19 : Panache de sédiments à la sortie d'un estuaire
<http://epod.usra.edu/blog/2005/05/cayuga-lake-sediment.html>

Des analogues modernes à ces séries fluviolacustres fossiles sont à rechercher dans les plaines alluviales bien développées des grands cours d'eau français : la Seine en amont de Monterault Fault Yonne, la Loire en Sologne, le Rhône, la Saône dans sa traversée de la Bresse, la Garonne,... Cependant comme nous le verrons par la suite, les aménagements hydrauliques ont profondément modifié le régime des crues et limité les apports dans les plaines d'inondations de ces cours d'eau.

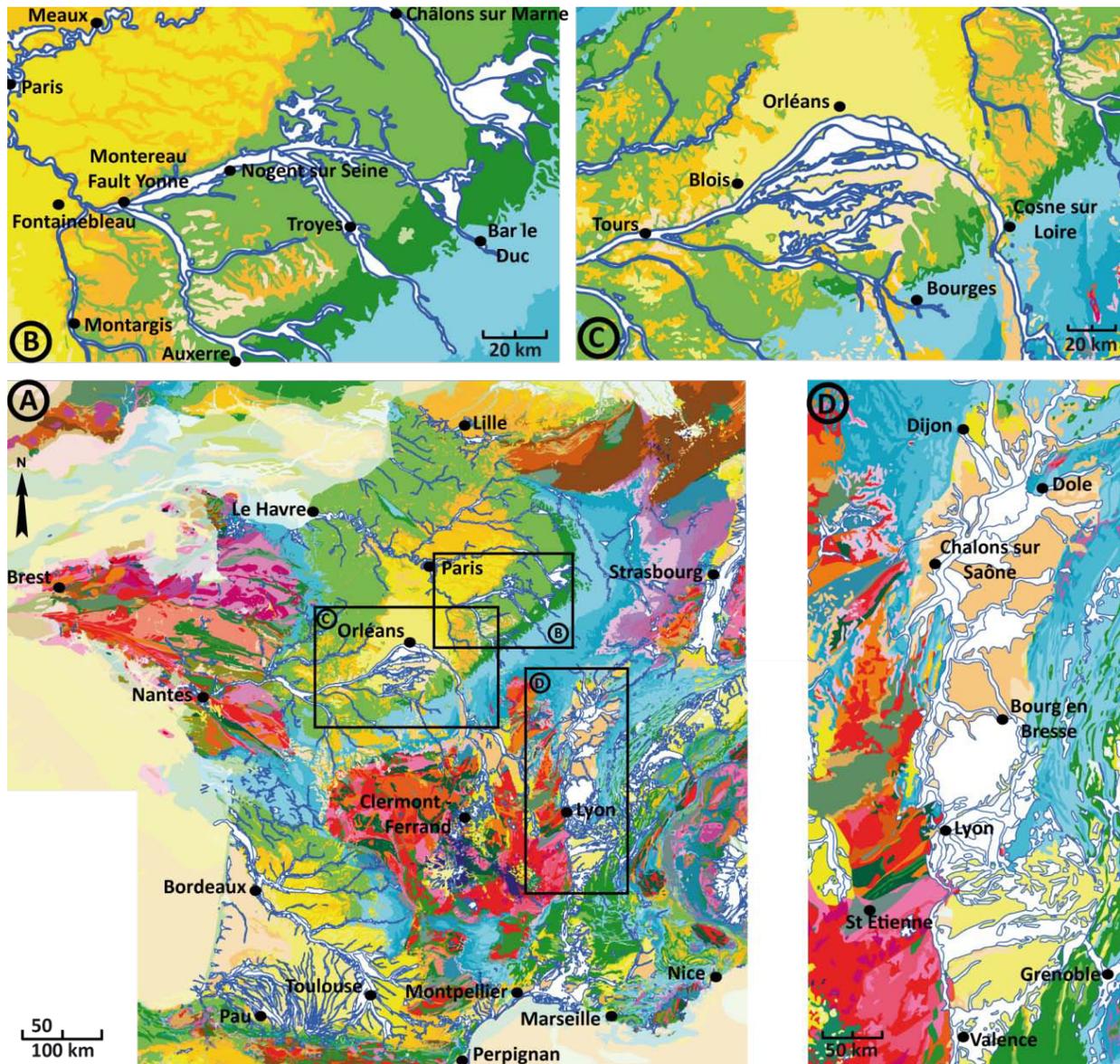


Figure 1-20 : Répartition des zones de dépôts fluviolacustres à partir de la Carte géologique de la France au 1/1 000 000^{ème} (BRGM, 2015) : A) carte géologique de la France ; B) Zoom sur la plaine de la Bassée (bassin versant de la Seine) ; C) Zoom sur la plaine d'Orléans (bassin versant de la Loire) ; D) Zoom sur la vallée du Rhône et de la Saône.

L'exploitation des dépôts fluviolacustres contribue à 40 % de la production annuelle en tuiles et briques, ce qui en fait la première source de matériaux argileux en France alimentant dix sept sites de production répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain : sept sites en vallée de la Saône et du Rhône [Pont de

Vaux (01), Commenailles (39), Mably et St Marcellin en Forez (42), Quincieux et Ste Foy l'Argentière (69) et Chagny (71)], un site en Provence [Marseille (13)], six sites en région toulousaine [La Bastide d'Anjou, Lasbordes, Limoux, St Martin Lalande et St Papoul (11) et St Amans Soult (81)], deux sites dans le bassin aquitain [Gironde s/ Dropt (33) et St Geours d'Auribat (40)] et un en Haute Loire [Vergongheon (43)].

2.2.2.2. Les dépôts marins peu profonds

Les dépôts marins peu profonds (S2), souvent appelés dépôts de plaines côtières, se sont accumulés dans les embouchures des fleuves (estuaires et deltas) et le long de la zone littorale. Les matières en suspension dominant dans ces domaines de sédimentation, grâce aux apports des cours d'eau et à la dérive littorale.

Plusieurs facteurs influent sur les conditions de sédimentation : la fréquence des apports fluviaux, la morphologie de la côte et l'hydrodynamisme marin (marées et houle). Les formes géométriques des corps sédimentaires et la répartition dépendront du facteur dominant. Les particules argileuses transportées par les eaux douces du fleuves flocculent en présence de l'eau de mer et forment le bouchon vaseux caractéristique des zones estuariennes. Les apports fluviaux peuvent également conduire à la formation de bancs sableux, comme dans la Gironde.

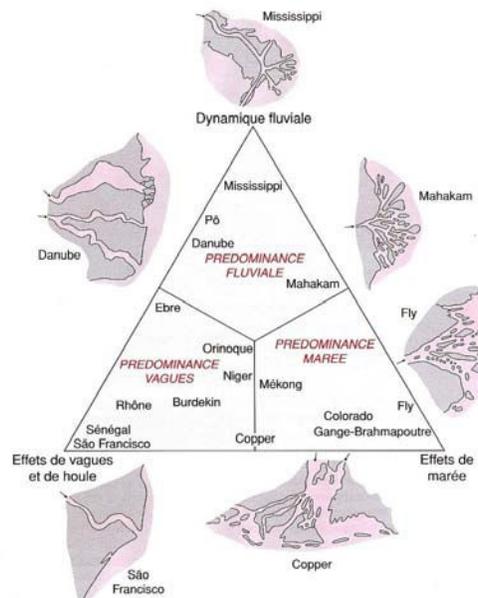


Figure 1-21 : Les différents types de deltas en fonction du processus sédimentaire dominant (Pomerol, 2005)

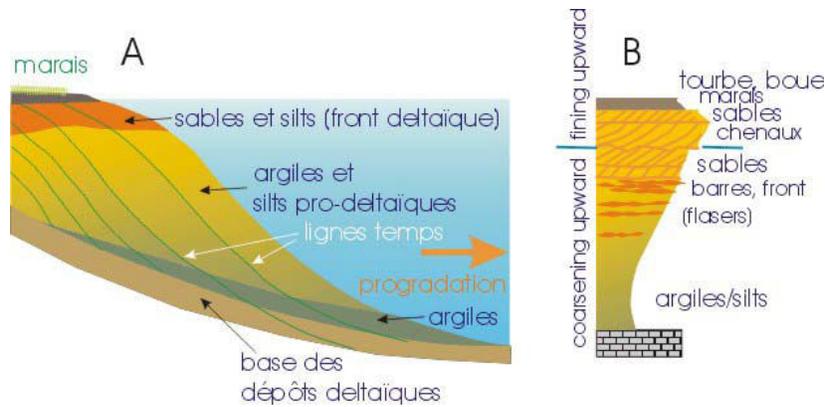


Figure 1-22 : Schéma de l'empilement sédimentaire des dépôts littoraux

Les caractéristiques des dépôts littoraux sont plus contrastées que dans les embouchures fluviales, notamment du fait de l'hydrodynamisme marin. Les vasières littorales se distinguent des plages et cordons littoraux par la présence majoritaire de sédiments fins (argiles et limons) qui confèrent aux dépôts des propriétés cohésives qui les protègent des actions régulières de la houle ou des marées. Les particules fines proviennent généralement des apports fluviaux et sont redistribuées le long des côtes par les courants des marées et les courants de dérive littorale.

Sur le littoral français, plusieurs baies côtières sont en voie de comblement par des sédiments fins résultant de l'interaction entre les apports fluviaux et la dérive littorale : bassin d'Arcachon, Pertuis Breton,....



Figure 1-23 : Image Satellite du Pertuis Breton (Google Earth)

Dans l'industrie des tuiles et briques, la production à partir de matériaux provenant de dépôts côtiers représente 17 % de la production annuelle française. Les sites exploités se trouvent pour la plus grande partie dans le Bassin parisien et sur son pourtour [Durtal (49), Pargny s/ Saulx (51), St Germer de Fly (60) et Les Mureaux (78)], un site est exploité dans les Landes [St Geours d'Auribat (40)] et un autre dans le Doubs [Lantenne Vertière (25)].

3. Conclusions

La répartition géographique des briqueteries et des tuileries reflète un héritage millénaire qui a vu le passage d'une production artisanale à une production industrielle au cours du XIX^{ème} siècle. Cette évolution s'est faite en intégrant les usages régionaux, ce qui explique aujourd'hui la répartition des briqueteries et tuileries sur le territoire français. Pour des raisons économiques, les carrières sont généralement à proximité des usines de transformation.

L'adéquation d'un mélange argileux extrait en carrière avec la fabrication des produits de terre cuite nécessite une composition minéralogique ainsi qu'une granulométrie complémentaires. Des ajustements par des ajouts peuvent permettre de se rapprocher des couples de caractéristiques ciblées.

Les matériaux exploités proviennent presque à part égale des produits du régolithe et de roches sédimentaires consolidées. Parmi ces ressources, toutes fossiles, certaines se sont formées à la faveur de conditions climatiques passées qui n'existent plus sur notre territoire : environnement périglaciaire ; d'autres résultent de processus très lents qui se sont exercés sur des périodes de temps allant des centaines de milliers d'années au million d'années.

Les évolutions réglementaires et la pression sociétale croissante rendent de plus en plus difficile l'extension de carrières existantes ou l'ouverture de nouveaux sites.

C'est dans ce contexte, que nous allons évaluer dans le chapitre suivant la renouvelabilité de la ressource en matériaux argileux sur le territoire français : existe-il des atterrissements argileux actuels qui possèdent des caractéristiques minéralogiques en accord avec celles des gisements actuellement exploités et quels sont les volumes correspondants ? Ces atterrissements pourraient soit venir en remplacement des extractions actuelles, soit être utilisées pour diminuer les prélèvements dans les sites "fossiles".

Chapitre 2

Les matériaux argileux,
une ressource renouvelable
en France ?

Les contraintes environnementales et sociétales abordées à la fin du chapitre précédent nous conduisent à mener une réflexion sur la préservation et le renouvellement de la ressource "matériau argileux".

Le concept de ressource renouvelable, d'abord utilisé dans le domaine de l'énergie, s'applique de plus en plus à celui de la construction. Cette industrie prélève en effet les matières premières dont elle a besoin dans des séries géologiques fossiles dont la réserve diminue suite à une exploitation depuis plus d'un siècle des sites favorables et à la difficulté d'ouverture de nouvelles carrières en lien avec la pression sociétale.

Tout comme pour l'énergie, une ressource sera considérée comme renouvelable si elle se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de notre société. Nous trouvons là la notion d'équilibre entre vitesses de reconstitution et de consommation.

Dans le domaine qui nous intéresse, le qualificatif de « renouvelable » est appliqué à la ressource et ne doit pas être confondu avec celui de matériaux renouvelables qui s'applique aux éco-matériaux issus de la production végétale.

Une ressource est renouvelable si elle provient de **sources que la nature renouvelle**. L'industrie de la terre cuite extrait ses matières premières dans des séries géologiques fossiles d'âges très variés allant de plusieurs dizaines de millions d'années à quelques millénaires (cf. Chapitre 1). Le renouvellement de ces sources de matériaux peut se faire soit dans des milieux actuels correspondants aux paléoenvironnements dans lesquels les séries fossiles actuellement exploitées se sont formées, soit à partir d'environnements modernes différents, atterrissements dans lesquels s'accumulent des sédiments aux caractéristiques favorables à une utilisation dans l'industrie de la terre cuite.

Les sites d'accumulation de matériaux argileux qui sont qualifiés par leurs propriétés minéralogiques, doivent, pour contribuer au renouvellement de la ressource, posséder des **vitesse d'accumulation suffisantes** pour compenser les volumes prélevés dans les séries fossiles. Le taux de renouvellement doit être abordé sur une échelle de temps en rapport avec la dynamique des processus qui conduisent à l'accumulation des matériaux. Nous serons ainsi amenés à considérer des périodes pouvant atteindre plusieurs milliers d'années pour les dépôts de type évènementiels afin d'obtenir des valeurs moyennes significatives.

Une fois les milieux favorables à un renouvellement de la source de matériaux identifiés, **les caractéristiques minéralogiques et physiques** des matériaux argileux devront être évaluées. L'industrie de la terre cuite s'appuie classiquement sur des études géochimiques et granulométriques complétées par des essais physiques. Nous avons développé dans ce travail **un nouvel outil, le cadre de référence minéralogique**, qui permet une première qualification des matériaux argileux à partir d'associations de minéraux clés qui décrivent les propriétés géochimiques, physiques et minéralogiques et fournissent indirectement une information globale sur les propriétés recherchées par l'industrie de la terre cuite.

Ces trois points vont être développés dans les paragraphes suivants.

1. Le renouvellement de la source en matériaux argileux

Avant d'aborder les milieux actuels dans lesquels les matériaux argileux s'accumulent, nous présentons un bref rappel des conditions de formation des matériaux argileux exploités aujourd'hui dans l'industrie de la terre cuite.

1.1. Le caractère renouvelable des types de dépôts actuellement exploités

En France, la matière première utilisée par l'industrie de la terre cuite pour la confection des briques et tuiles se fait uniquement à partir de formations fossiles. Dans ce qui suit, nous allons examiner le caractère renouvelable de celles-ci en fonction de leurs conditions de formation présentées dans le chapitre 1.

1.1.1. Le Régolithe

Les formations appartenant au Régolithe se forment pour partie sous les conditions actuelles, c'est le cas des colluvions (R1) et altérites (R4) ; et pour les autres sous des conditions climatiques froides de période glaciaire, ce sont les loëss (R2) et terrasses fluviales (R3).

Les processus actifs sous les conditions climatiques actuelles :

- les colluvions (R1) se forment à la faveur d'évènements exceptionnels, et occupent des volumes élémentaires restreints et disséminés sur le territoire français ;
- les altérites (R4) résultent de processus lents et diffus qui affectent les formations superficielles, et couvrent de grandes surfaces dans les régions stables sur le plan géomorphologique.

Les processus associés à des dynamiques de période froide ne sont pas actifs actuellement, car nous sommes en période interglaciaire (Holocène). Le calendrier de la prochaine glaciation varie significativement en fonction du schéma d'évolution climatique pris en compte, selon que l'on considère un scénario naturel (influence anthropique négligeable) ou perturbé (influence anthropique significative) :

- dans le cas du scénario naturel, les simulations climatiques estiment que le prochain maximum glaciaire aura lieu entre 60 et 100 000 ans avec une diminution de l'insolation à partir de 28 000 ans (Loutre and Berger, 2000) ;
- dans le cas d'un scénario fortement perturbé, prenant en compte une pression en CO₂ égale à au moins 5 fois la pression actuelle (BIOCLIM, 2005), la première glaciation se produirait au plus tard dans 500 000 ans.

Quel que soit le scénario envisagé, les ressources que constituent les loëss (R2) et terrasses alluviales (R3) ne sont pas renouvelables à l'échelle de temps qui nous intéresse. Par contre, les colluvions et altérites se renouvellent dans les conditions actuelles.

1.1.2. Les roches sédimentaires consolidées

Les roches sédimentaires consolidées, dépôts fluviaux lacustres (S1) et marins peu profonds (S2) correspondent à des dépôts très anciens (plusieurs millions à dizaines de millions d'années) dont il existe des analogues actuels :

- les systèmes fluviaux lacustres associés aux grands cours d'eau actuels qui drainent la France, charrient de larges volumes de matières en suspension dont une partie s'accumule sur le continent (crues de débordement et atterrissements anthropiques) et l'autre atteint le domaine marin où elle est redistribuée par les courants entre le domaine côtier et le plateau continental ;
- les baies côtières du littoral de la Manche et de l'Atlantique piègent également un volume conséquent de matières en suspension provenant des fleuves et de la dérive littorale.

Les analogues actuels des milieux de dépôts correspondant à S1 et S2 constituent des lieux de renouvellement des atterrissements argileux qui seront évalués dans notre approche de caractérisation du caractère renouvelable de la ressource.

1.2. Les zones d'accumulation de matériaux argileux

Dans ce qui suit, nous considérons les processus sur des périodes de temps suffisamment longues pour être caractéristiques et pour permettre ensuite d'évaluer des taux d'accumulation. Notre réflexion porte sur l'interglaciaire dans lequel nous vivons, l'Holocène (Yin and Berger, 2015). On peut en effet considérer que les conditions actuelles prévalent depuis au moins 10 000 ans. Cette période comprend une première phase pendant laquelle l'évolution naturelle dominait et une seconde marquée par l'empreinte de l'homme. Les modifications des processus au cours de ces deux phases seront présentées, lorsque nécessaire, pour les différents types d'accumulation de matériaux argileux.

1.2.1. Le Régolithe : colluvions et altérites

Depuis les années 2010, le Régolithe fait partie des données de surface consultables sur le site du BRGM InfoTerre. Les données sont assez parcellaires et nous nous appuyons sur les synthèses du BRGM dans cette présentation (BRGM, 2015).

1.2.1.1. Le Régolithe autochtone

Le Régolithe autochtone, autrement appelé altérites (R4), s'étend sur une large surface du territoire où l'érosion chimique domine l'érosion mécanique comme évoqué dans le chapitre 1. Ces altérites peuvent provenir de l'érosion chimique de roches sédimentaires ou de roches du socle. La carte des formations autochtones en France issue des données du BRGM (BRGM, 2015) est représentée dans la Figure 2-1. Plusieurs grandes surfaces d'altération ressortent à l'échelle du territoire avec des origines spécifiques en fonction des régions. Un zoom sur chacune d'entre-elles est présenté dans la Figure 2-1 :

- dans le **Bassin Parisien (Figure 2-1-B)**, les altérites proviennent de l'altération de formations sédimentaires dont l'âge varie. A l'ouest du bassin, celles-ci reposent actuellement sur du Crétacé inférieur et se sont développées dès le Paléogène. Au nord du bassin, les altérites se sont développées sur des dépôts mio-plio-quadernaires et sont donc relativement récentes. Au centre du Bassin parisien, les altérites couvrant les formations sédimentaires de l'Oligocène au cours du Mio-Plio-Quaternaire ont contribué à la formation des argiles à meulères. Enfin dans le secteur ouest et sud du bassin, les altérites affectent des formations sédimentaires du Jurassique moyen et se sont développées au cours du Mio-Plio-Quaternaire.

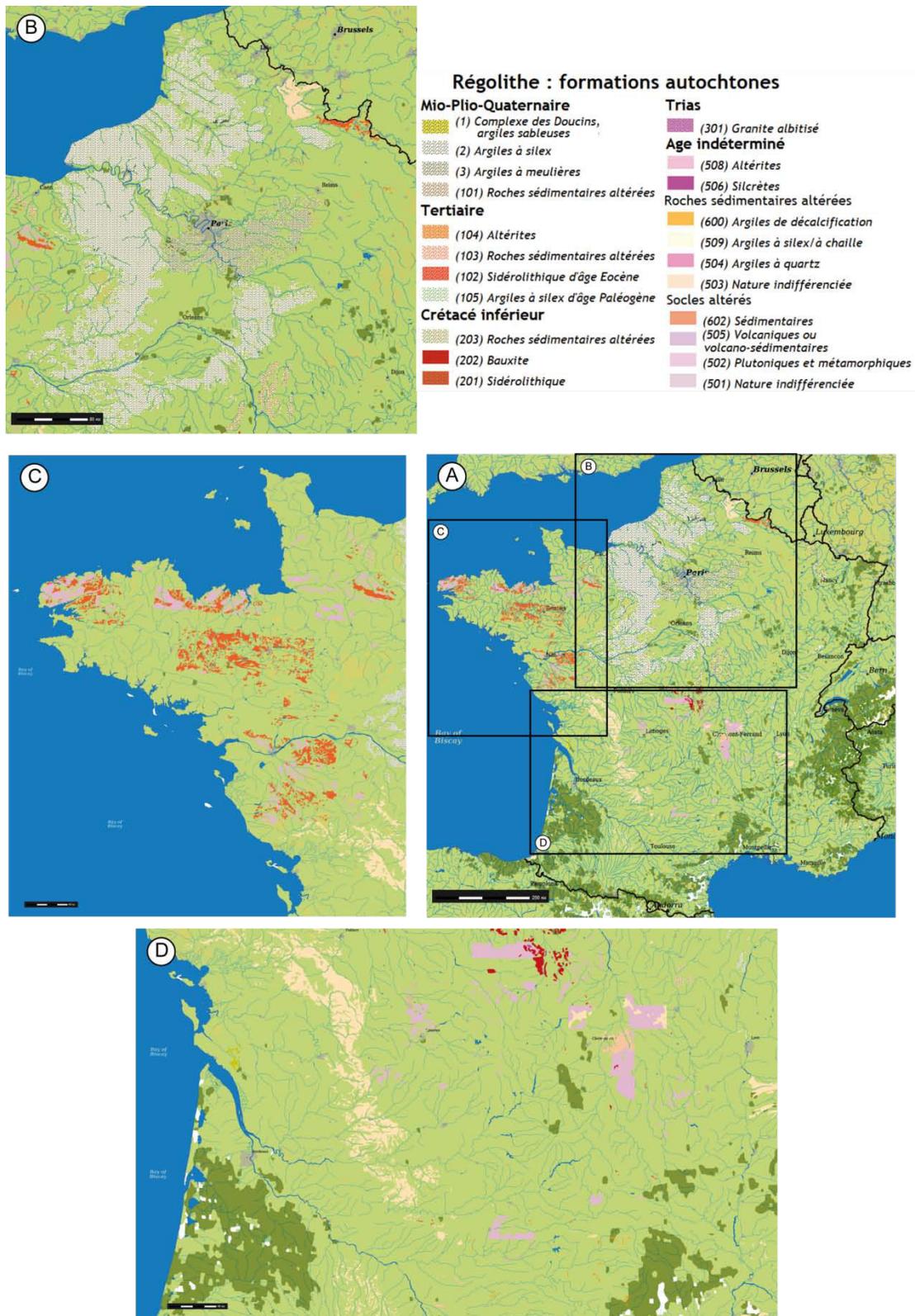


Figure 2-1 : La carte du Régolithe allochtone (BRGM, 2015) et encarts sur les régions possédant des formations conséquentes : A) Carte de France entière ; B) le Bassin parisien ; C) le Massif Armoricain ; D) le Massif Central et le Bassin Aquitain.

- dans le **Massif Armoricain** (Figure 2-1-C), les altérites proviennent de l'altération du socle constitué de formations sédimentaires anciennes et de formations plutoniques et métamorphiques. Au nord du cisaillement Nord-Armoricain, elles se sont formées à partir de l'altération de roches intrusives hercyniennes et cadomiennes et de formations sédimentaires du Briovérien (Protérozoïque). Au Centre Est du massif, elles résultent de l'altération de formations sédimentaires Briovérienne et Ordo-Silurienne ; et au sud du massif de l'altération de roches intrusives hercyniennes et formations sédimentaires Briovérienne et Ordo-Silurienne ;
- le long d'une bande nord et est du **Bassin Aquitain** (Figure 2-1-D), les altérites proviennent également de l'altération de formations sédimentaires, mais dont l'âge n'est pas connu. Elles sont situées sur une large bande orientée NNW-SSE comprenant le Seuil du Poitou (Jurassique moyen) et la moitié Est des formations du Crétacé inférieur. On note, au sud de cette bande, l'altération de formations sableuses et calcaires du Tertiaire durant le Mio-Plio-Quaternaire (bassin de la Seudre située au nord de l'estuaire de la Gironde sur la côte charentaise).
- dans le **Massif Central** (Figure 2-1-D), les altérites proviennent de l'altération du socle constitué principalement de formations plutoniques et métamorphiques dans ses parties extrêmes Ouest, Nord et Est. Les formations sidérolithiques au nord correspondent à des zones soumises à l'altération depuis le Trias (Ricordel-Prognon, 2007) et de l'altération de formations sédimentaires de l'Oligocène dans la plaine de la Limagne.

1.2.1.2. Les colluvions

Les colluvions occupent des situations géomorphologiques spécifiques liées à la topographie locale : les parties concaves des flancs de versants, les pieds de pente, en position de talus en bordure de terrasses alluviales, ou en milieu de pente à la faveur d'aménagements anthropiques. Les formations colluviales ont tendance à s'épaissir dans leur partie basse et leur granulométrie s'affine en leur pied.

En domaine tempéré, les atterrissements nouveaux ne sont pas très fréquents, surtout dans les zones où la couverture végétale protège le sol. Ils peuvent cependant se produire lors d'une disparition de la végétation suite à un changement de pratique agricole conduisant à une dénudation du sol, à un défrichement, à un incendie...

Les colluvions sont classiquement indiquées sur les cartes géologiques par le symbole C (C1 colluvion de pente et C2 colluvion de vallée sèche). Il existe cependant peu de données pour évaluer les parts respectives des colluvions relevant de l'évolution naturelle et de celle contrôlée par l'homme dans les colluvions qui se sont formées au cours de l'Holocène (Notebaert et al., 2014). La nature des colluvions est comparable à celle de la zone d'alimentation, les horizons superficiels.

1.2.1.3. Conclusion sur les modes d'accumulation actifs du Régolithe

Le Régolithe présente deux modes actifs d'accumulation de matériaux argileux qui contribuent sous les conditions climatiques actuelles au renouvellement de la source. Les zones concernées couvrent de larges surfaces sur le territoire national. Ces deux modes d'accumulation présentent cependant de grandes différences quant à leur formation, leur localisation et leur étendue. Les

colluvions forment peu de nouveaux atterrissements dans les conditions climatiques tempérées sauf lors de changement de type d'occupation des sols menant à une dénudation du sol. Leur formation est très directement liée à l'activité humaine. Ces accumulations locales et ponctuelles sont difficilement quantifiables. A l'opposé, les altérites se forment sur de larges étendues couvrant une grande partie du territoire français. Elles se forment de manière régulière en fonction des conditions climatiques comme nous le verrons dans la partie 2.2. de ce chapitre.

1.2.2. Les systèmes fluviaux lacustres

L'érosion est un processus naturel qui transforme les reliefs en arrachant du matériel rocheux à un endroit donné, en le transportant et le redéposant ailleurs. Ainsi, c'est en diminuant les reliefs que l'érosion alimente et engraisse les vallées et crée des plaines propices à l'agriculture. **Différents types d'érosion** liés aux agents mobilisés dans ce processus sont recensés, les principaux étant :

- l'érosion mécanique sèche, où la gravité et/ou la pression des instruments agricoles participent au transfert d'éléments des hauts topographiques vers les dépressions sans l'action de l'eau ou du vent (Roose, 1994) ;
- l'érosion éolienne, qui façonne les paysages de par les processus d'abrasion (usure mécanique d'un matériau cohérent) et de déflation (transport de matériel fin dans l'atmosphère) (Roose, 1994) ;
- l'érosion hydrique, qui présente différentes formes, de l'érosion en nappe à l'érosion linéaire en passant par l'érosion hydrographique ou même en masse (Roose, 1994).

Les systèmes fluviaux assurent le transfert des sédiments depuis les zones hautes dominées par les processus d'érosion mécanique et chimique vers les océans. Au cours du transport, une partie non négligeable de la matière charriée s'accumule dans les plaines alluviales et les lacs qui jalonnent les cours d'eau.

1.2.2.1. Les types de systèmes fluviaux et les charges solides associées

Différentes classifications existent pour décrire les styles fluviaux les plus fréquents. La morphologie des cours d'eau et leur dynamique sont liées à différents paramètres que sont le climat (régime des précipitations), le couvert végétal, la morphologie de la vallée, la nature du substratum. Ce sont ces paramètres qui vont contrôler la charge solide et la charge liquide (le débit).

Les cours d'eau sont classés en fonction de leur hydrodynamisme qui influe sur la géométrie du chenal, la charge sédimentaire et la granulométrie des matériaux transportés (Figure 2-2).

La charge sédimentaire est classiquement séparée en :

- charge en suspension qui comprend les particules qui sont transportées sans toucher le fond à la faveur des turbulences de l'écoulement. Elle est constituée d'argiles et de silts, c'est-à-dire de matériaux de faible granulométrie ;
- charge de fond qui correspond aux éléments trop gros pour être mis en suspension. En fonction de leur taille et densité, ils roulent sur le fond ou sont transportés par saltation.

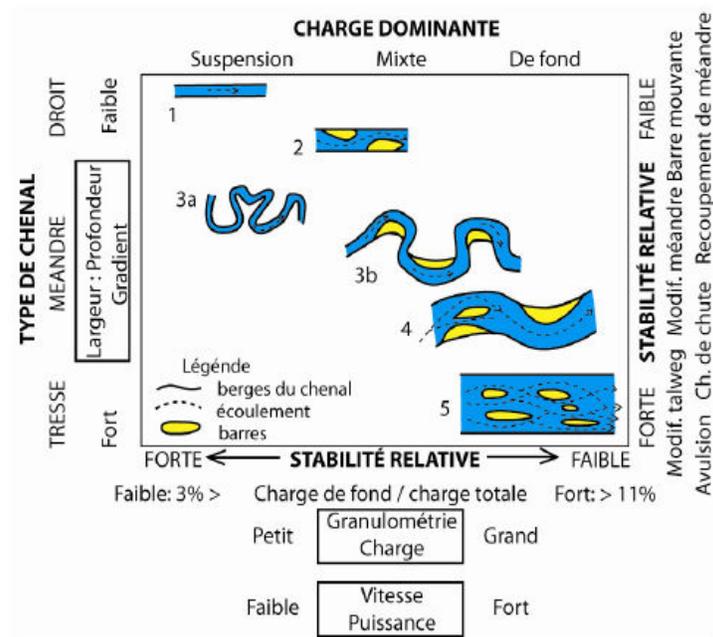


Figure 2-2 : Classification des cours d'eau prenant en compte la charge sédimentaire d'après Schumm (1985)

Le transport de cette charge sédimentaire est régi par deux paramètres d'un cours d'eau :

- sa compétence, qui correspond au diamètre maximum des particules que le cours d'eau peut transporter, est essentiellement fonction de la vitesse de l'écoulement (Figure 2-3) ;
- sa capacité, qui correspond à la quantité maximum de matériaux solides que le cours d'eau peut transporter, dépend de la vitesse, du débit et de la section (forme et rugosité).

Ces deux propriétés ne sont pas directement liées : la compétence décroît vers l'aval, ce qui n'est pas le cas de la capacité.

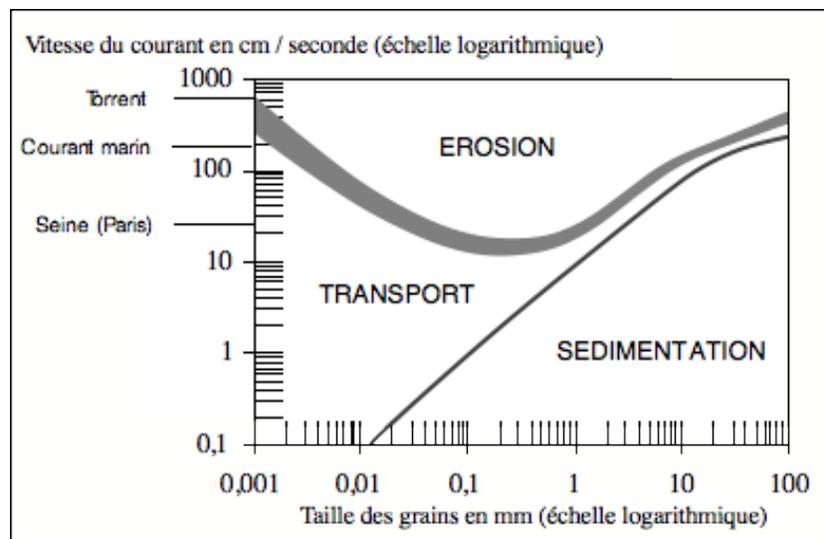


Figure 2-3 : Diagramme érosion/transport/sédimentation en fonction de la taille des particules et la vitesse du courant (Hjulström, 1935)

Un cours d'eau est défini par plusieurs ensembles morphologiques :

- le lit mineur, partie du chenal d'écoulement qui est toujours en eau (référence par rapport à la période d'étiage) ;
- le lit moyen (bande active), occupé par l'écoulement entre le niveau d'étiage et celui de plein bord ;
- le lit majeur (plaine d'inondation ou plaine alluviale), zone inondée lors des crues de débordement dont la fréquence est variable en fonction des événements exceptionnels qui caractérisent le domaine climatique concerné (ex. orage de la zone méditerranéenne).

C'est dans le lit majeur que sont piégées les particules fines lors des crues de débordement dont la fréquence dépend du climat.

1.2.2.2. Distribution des plaines alluviales en France

L'extension des plaines alluviales est liée à la morphologie des vallées dans lesquelles les cours d'eau s'écoulent. La plaine alluviale ou lit majeur correspond à la zone de dépôt de sédiments hors du chenal lors de crues de débordement. Alors que le cours chenalisé est le siège d'érosions multiples, les processus de dépôts dominent dans la plaine alluviale qui n'est ennoyée que lors d'inondations. Les plaines alluviales se développent à l'aval de la zone amont des bassins versants dans lesquels les processus d'érosion dominent.

En France, les plaines alluviales sont réparties sur l'ensemble du territoire mis à part les massifs montagneux. L'état naturel de ces plaines alluviales, c'est-à-dire avant les aménagements anthropiques significatifs, peut être considéré comme correspondant aux dépôts alluviaux de la période Holocène (Figure 2-4). La superficie d'une plaine dépend de la morphologie de la vallée active, du débit du cours d'eau, du régime de crues et du flux de MES (Matières en Suspension). La superficie de la zone inondée croît avec l'augmentation de ces paramètres. Les larges plaines d'inondation sur le territoire français se trouvent le long des grands systèmes fluviaux que sont la Loire, la Garonne, le Rhin, le Rhône et la Seine :

- **les cours de La Loire et de ses grands affluents** (l'Allier, le Cher, l'Indre, la Vienne et la Mayenne), sont jalonnés de plaines d'inondations relativement larges. Après la sortie du Massif Central, la Loire s'écoule dans un relief relativement plat (les plaines du Puy, du Forez et du Roannais, la Sologne, la Touraine, l'Anjou et la région Nantaise) de même pour l'Allier qui traverse la plaine de la Limagne. Le Cher et l'Indre qui prennent leur source dans le Massif Central, sont jalonnés de plaines d'inondation de tailles plus restreintes dans le Val de Loire. Les zones les plus remarquables sont situées dans la région d'Orléans où la plaine alluviale atteint une largeur de 8 km et une superficie de 320 km² environ. La zone tourangelle (entre Tours et Angers) avec la confluence avec la Vienne, voit également le développement d'une plaine alluviale de 10 km de large pour une superficie d'environ 650 km² ;
- **le bassin versant de la Garonne** comprend plusieurs zones dans lesquelles la plaine d'inondation est fort développée. Très en amont, à la sortie du massif des Pyrénées, les plaines alluviales atteignent une largeur significative. Ainsi, 85 % du cours de la Garonne est entouré d'une plaine d'inondation dont la largeur moyenne atteint 4 km et peut s'étendre sur plus de 10 km à proximité de la confluence avec la Dordogne. De nombreux affluents de la Garonne en rive

gauche possèdent également des plaines d'inondation développées mais de tailles plus modestes à l'image des débits qui les caractérisent. En rive droite, où les grands affluents de la Garonne ont leurs bassins versants (le Lot, le Tarn, la Dordogne et l'Aveyron), les plaines d'inondations sont plus limitées à cause de la géométrie des bassins versants qui sont plus encaissés et des formations géologiques résistantes qui les composent. En effet, une grande partie de ces cours d'eau traversent les roches intrusives du Massif Central, plus résistantes à l'érosion que les formations sédimentaires parcourues par les cours d'eau de la rive gauche.

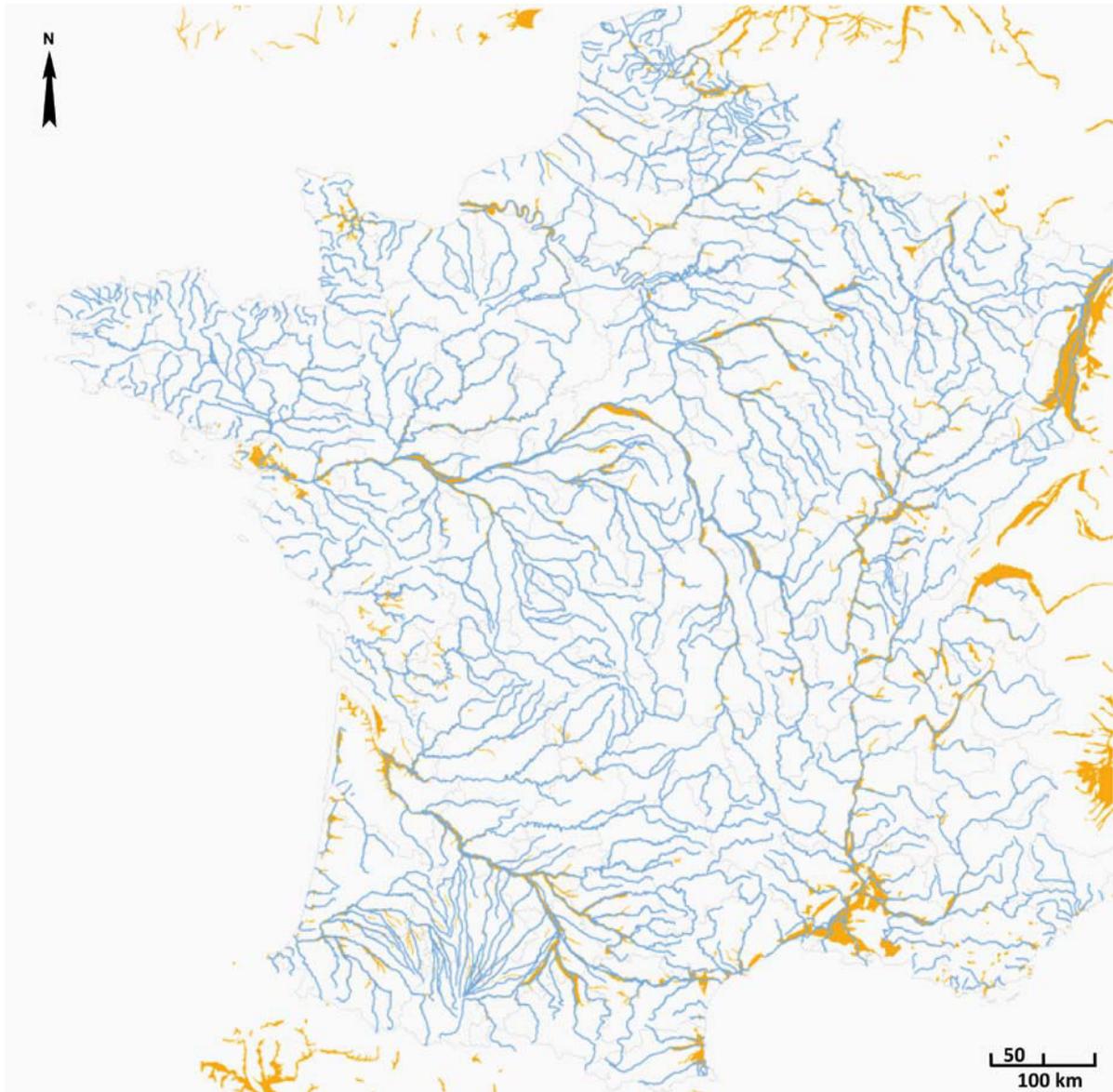


Figure 2-4 : La carte des plaines alluviales à l'Holocène à partir de la base de données Carthage et de la carte géologique de la France au 1/1 000 000.

- Dans l'est de la France, **le Rhin** présente la plaine d'inondation la plus large de l'ensemble du territoire français car elle peut atteindre 25 km. Elle représente une superficie de plus de 3 000 km² que nous partageons avec l'Allemagne et dont environ 2 000 km² se trouvent en France. Cette configuration est guidée par la structure géologique que traverse le Rhin, le fossé rhénan, large fossé d'effondrement aux flancs relevés bien marqués ;
- **la vallée du Rhône** en France est jalonnée de plaines d'inondation d'une largeur restreinte pour la dimension du cours d'eau (1 à 2 km de large). Cette morphologie particulière de la plaine d'inondation du Rhône est liée aux structures géologiques qu'il traverse (le massif du Vercors, la plaine du Dauphiné entre le Vercors et le Massif Central). La même observation peut être faite sur la quasi totalité du cours de la Saône (l'un des affluents les plus importants du Rhône). Les affluents du Rhône issus des Alpes présentent des plaines alluviales développées à l'amont d'anciens verrous glaciaires là où les glaciers ont largement érodé les vallées :
 - l'Isère dans la région de Grenoble avec une plaine alluviale d'une superficie proche de 500 km² ;
 - la Durance moyenne autour de Sisteron (confluence avec le Buëch, l'Asse, la Bléone et le Verdon) avec une plaine d'inondation d'une superficie supérieure à 200 km² ;
 - la Durance aval de Cadarache à la Camargue avec près de 200 km² de plaine alluviale relativement large (environ 5 km).
- La partie de la plaine alluviale de **la Seine** la plus développée correspond à la Bassée (5 km de largeur en moyenne entre Romilly s/ Seine et Montereau-Fault-Yonne pour une superficie totale de 365 km²). Les cours du Loing, de la Marne et de l'Oise et celui de la Seine à l'aval de la Bassée possèdent des plaines d'inondations réduites, dont la largeur n'excède pas le kilomètre. Seules deux petites zones, juste à l'amont de Paris et dans le centre de Paris sont un peu plus larges (respectivement la plaine du Val de Marne, 45 km² et les 4 premiers arrondissements de Paris ainsi qu'une partie des 12, 13 et 15^{ème} arrondissements, 15 km²). Ce sont des zones où le risque d'inondation est plus élevé et qui sont à l'origine de la volonté de l'écrêtement des crues du bassin versant de la Seine notamment après l'importante inondation de 1910 dans Paris.

D'autres systèmes de tailles plus modestes possèdent également des plaines d'inondations conséquentes :

- la Meuse et la Moselle, dont seule les parties amonts sont sur le territoire français, présentent des plaines d'inondation relativement moyennes mais qui remontent très en amont dans le massif des Vosges pour la Moselle et dans l'est Bassin parisien pour la Meuse ;
- les fleuves côtiers des Pertuis charentais, l'Eyre, la Somme et la Vilaine présentent des plaines d'inondation assez étroites plutôt dans leur partie aval relativement proche de l'estuaire ce qui est principalement dû aux débits de crues relativement limités ;
- l'Adour et ses affluents présentent des systèmes fluviaux de même morphologie et même fonctionnement que ceux de la partie rive gauche du bassin versant de la Garonne, avec des plaines d'inondation assez étroites mais qui remontent très amont ;

- les fleuves côtiers languedociens, fort de l'amplitude importante entre les débits d'étiages et les débits de crues, présentent des plaines d'inondation très importantes comparées à la taille de leur bassin versant et relativement proches de leurs embouchures.

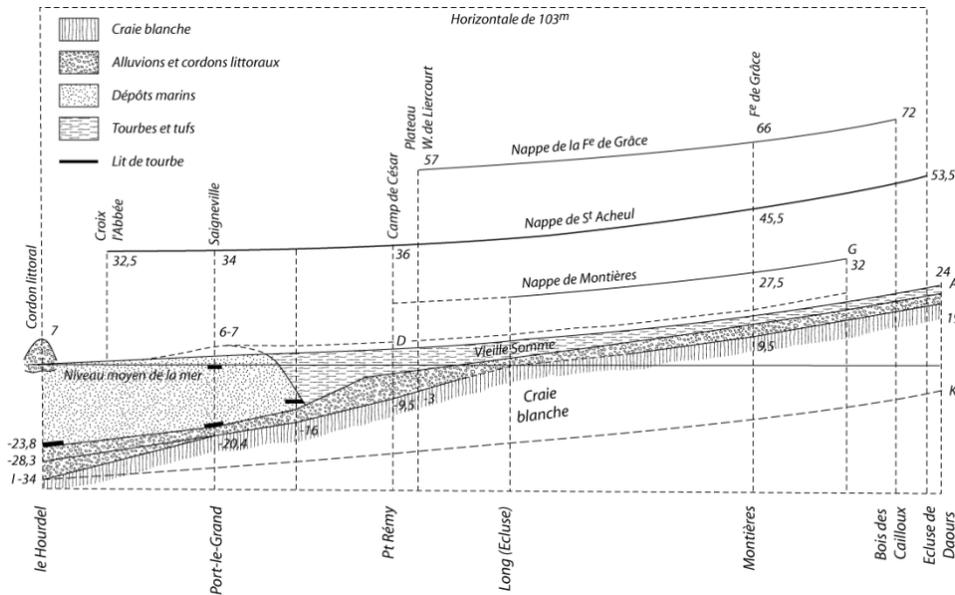


Figure 2-5 : Incision de la vallée de la Somme lors des dernières glaciations d'après Lamothe (1918)

Au cours de l'Holocène, les plaines d'inondation se sont bien développées autour des fleuves montrant des apports en MES importants et des grandes variations de débits entre l'étiage et les crues comme illustré par le remplissage de la vallée incisée de la Somme lors des dernières glaciations (Figure 2-5). Cependant depuis le XX^{ème} siècle, la volonté de limiter les risques d'inondation par écrêtement des crues a nettement réduit l'amplitude et la fréquence des crues de débordement et donc l'alimentation des plaines d'inondation.

1.2.2.3. Des systèmes fortement aménagés

Les cours d'eau français ont été fortement aménagés que ce soit pour la navigation, la protection vis-à-vis des crues, la production d'électricité et l'irrigation. Ces aménagements ont modifié de façon significative la dynamique sédimentaire fluviale naturelle présentée dans le sous-chapitre 1.2.2. , notamment en ce qui concerne les zones de dépôts.

Le premier barrage mis en service en France, en 1675, est celui de Saint Ferréol (31) sur le Lautot, un sous affluent de l'Agout, du Tarn et de la Garonne. S'il est toujours en service aujourd'hui, moins de 1 % des barrages actuels existaient avant 1850. En effet, les aménagements des cours d'eau sont relativement récents, avec 24 % des barrages actuels construits entre 1850 et 1950, 60 % entre 1950 et 1990 et 16 % depuis 1990. Malgré cela, le réseau fluvial est fortement aménagé et il existe plus de 500 barrages en France selon le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR). Même si la plupart remplissent plusieurs objectifs, plus de la moitié permet de produire de l'hydroélectricité, 19 % servent pour l'irrigation, 18 % pour l'alimentation en eau des villes, 6 % pour le tourisme, 4 % seulement pour l'écrêtement des crues et 3 % pour la navigation (CFBR and Réservoirs).

Selon le type d'aménagement, les effets sur la dynamique sédimentaire sont plus ou moins importants. Les ouvrages destinés à l'écrêtement des crues sont conçus pour diminuer le débit maximum du cours d'eau pendant la crue en stockant une partie de l'eau des précipitations dans de grands bassins maintenus, préalablement à la période des pluies, à un bas niveau. Cette eau est ensuite restituée au cours lorsque la crue diminue.

- Sur le **bassin versant de la Seine**, certains de ces aménagements sont en dérivation du cours d'eau (le lac d'Orient en dérivation de la Seine, les lacs d'Amance et d'Auzon Temple en dérivation de l'Aube et le lac du Der en dérivation de la Marne), alors que d'autres barrages interrompent l'écoulement comme le barrage de Pannecière sur l'Yonne (qui en plus d'écrêter des crues, produit de l'hydroélectricité) et celui de Crescent sur la Cure. L'installation des ouvrages pour l'écrêtement des crues diminue nettement les débordements dans les plaines d'inondation du bassin versant de la Seine, plaines qui ne sont plus alimentées en sédiments de façon régulière et sont affamées.
 - Ces aménagements sont d'une très grande efficacité pour les crues moyennes (ou normales) qui reviennent tous les ans empêchant ainsi les débordements grâce à une capacité totale pour les grands lacs de Seine d'environ 850 millions de m³ d'eau. Par contre, leur efficacité est plus limitée pour la gestion des crues centennales comme celle qui a touché Paris en 1910 avec un débit maximum de 2 400 m³/s soit 10 fois plus que le débit normal de la Seine à Paris avant les aménagements et une hauteur maximale de 8,65 m (sous le Pont d'Austerlitz). L'Etablissement Public Territorial du Bassin Seine Grands Lacs (SeineGrandsLacs, 2015) estime que pour une crue centennale similaire, la montée du niveau de l'eau serait réduite de 0,7 m, diminuant les surfaces inondées de 17 % ;
 - les aménagements en dérivation prélèvent des eaux peu chargées en MES dans les canaux d'amenée (canaux permettant l'alimentation des barrages réservoirs). Les taux de sédimentation sont ainsi très faibles dans les retenues des lacs-réservoirs ;
 - à la différence des barrages en dérivation, les ouvrages qui barrent le lit moyen coupent la dynamique sédimentaire, c'est notamment le cas pour le barrage de Pannecière sur l'Yonne. Située dans une zone à faible taux d'érosion, la retenue est faiblement envasée.
- Plus généralement, les cours d'eau du **bassin versant du Rhône** (notamment la Durance, l'Isère, l'Ain, la Saône,...) et ceux de la rive droite du **bassin versant de la Garonne** (notamment le Tarn, le Lot, l'Aveyron, la Dordogne,...) sont très aménagés pour produire de l'hydroélectricité et écrêter les crues, ce qui limite là encore les apports dans leurs plaines d'inondation ;
 - comme nous le verrons par la suite, le bassin versant de la Durance est situé dans la région de France qui possède les taux d'érosion les plus élevés du territoire français. Les apports en MES sont très conséquents et les retenues s'ensavent rapidement, comblées par un matériel en grande majorité de granulométrie fine. La construction de ces barrages a été très efficace pour l'écrêtement des crues de la Durance en réduisant par 3 les débits de crue maximum passant de 6 000 m³/s au XIX^{ème} siècle (avant les aménagements) à environ 1 900 m³/s en 1994 (après l'ensemble des aménagements de la Durance), valeur qui correspond encore à une crue très importante. Le principal effet

de cet écrêtement sur la dynamique sédimentaire est l'appauvrissement en sédiments des plaines d'inondation de la basse Durance (à l'aval de la retenue de Cadarache).

Finalement, les besoins d'écrêtements des crues, de production d'électricité, d'irrigation, de réserve en eau potable ont conduit à la construction de barrages qui créent des retenues temporaires d'eau, modifient l'écoulement du cours d'eau et le transport des sédiments et favorisent la formation d'atterrissements dans les parties amont des lacs de retenue créés par ces ouvrages. La régulation des débits des cours d'eau et l'écrêtement des crues contribuent par ailleurs à une réduction de l'apport en sédiments dans les plaines d'inondation.

D'autres aménagements sur le territoire peuvent modifier la dynamique sédimentaire générale des bassins versants et notamment créer des atterrissements d'argiles, ce sont les aménagements liés à la navigation et plus particulièrement les canaux qui ont été créés pour favoriser le transport fluvial moins coûteux que la plupart des autres moyens de transport. Ces canaux sont jalonnés de barrages et d'écluses qui peuvent être des pièges à sédiments provenant d'environnements proches ou des cours d'eau qui alimentent le canal. Les taux d'envasement de ces canaux ne sont pas élevés étant donné que les gérants de canaux filtrent une bonne partie des particules qui pourraient y pénétrer mais le besoin d'entretien régulier de ces canaux pour la navigation, en font de véritables sources de sédiments "dragués" que l'on peut considérer très certainement comme pérennes dans le contexte de développement actuel des canaux à large gabarit (VNF, 2010).

Le territoire français est riche en retenues susceptibles d'être de véritables pièges à sédiments et qui nécessitent pour chacune d'entre elles des études fines en les replaçant dans leur contexte régional (climat, taux d'érosion, formations géologiques, topographie du bassin versant...) dans l'objectif de quantifier leurs taux d'envasement.

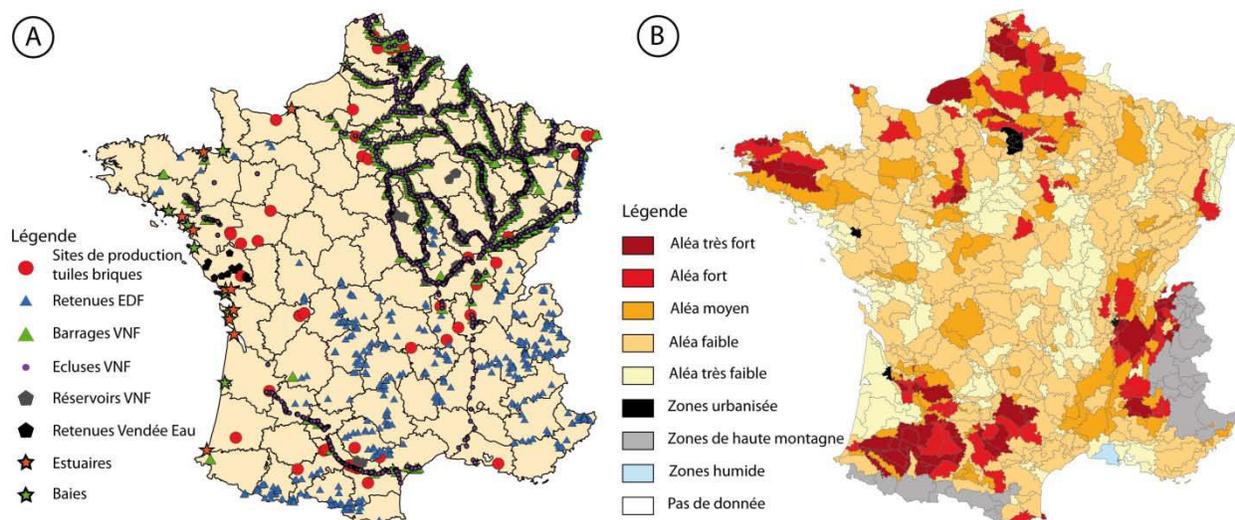


Figure 2-6 : A) Carte de répartition des retenues EDF, VNF et Vendée Eau en France. B) Carte de l'aléa érosion des sols en France par petite région agricole estimé à l'aide du modèle Mesales (Montier et al., 1998)

Afin d'évaluer ces taux d'envasement fortement liés aux taux d'érosion, l'ensemble des retenues gérées par EDF, Voies Navigables de France et Vendée Eau sont reportées dans la Figure 2-6 qui permet de réaliser une analyse croisée entre la localisation des retenues, celle des sites de production des tuiles et briques et les valeurs des aléas érosion. Cette figure donne une première idée du potentiel d'accumulation des sédiments dans les ouvrages selon les régions. Une analyse quantifiée est proposée dans la partie 2. de ce chapitre.

L'analyse croisée de la carte de l'aléa « érosion » et de la répartition des aménagements hydrauliques en France conduit à l'identification de quatre contextes :

- **le premier contexte** correspond aux régions avec un taux d'érosion élevé et un fort aménagement. Ce sont les zones où les taux d'envasement des ouvrages hydrauliques sont susceptibles d'être les plus élevés. On le retrouve dans 3 secteurs :
 - le Sud-Est de la France, en rive Gauche du bassin versant du Rhône et sur le bassin versant de la Saône. Ces lacs de retenues, dont les ouvrages sont principalement gérées par EDF, possèdent des superficies importantes ;
 - le Sud-Ouest de la France, en rive droite du bassin versant de la Garonne jusqu'en Gironde, une partie des retenues de tailles importantes sont gérées par EDF avec les mêmes objectifs que pour les retenues du Sud-Est et une autre partie par les conseils généraux locaux principalement pour l'irrigation. On peut ajouter à ces retenues, les barrages et écluses gérés par VNF en particulier le long du canal du Midi. Ce sont des retenues de tailles plus modestes mais qui pourraient présenter un intérêt pour cette étude en fonction des volumes de sédiments qui s'y accumulent ;
 - le nord de la France (Nord Pas de Calais et Picardie), les barrages et écluses gérés par VNF sont du même type que ceux du canal du Midi afin d'assurer la navigation ;
- **le second contexte** résulte de la combinaison d'un taux d'érosion élevé et d'un faible aménagement. Les flux de matières en suspension des cours d'eau sont élevés et le restent jusqu'à l'exutoire, car peu de sédiments sont piégés. Il s'agit de systèmes fluviaux relativement naturels qui alimentent les plaines d'inondation. Les zones correspondant à ce contexte sont localisées dans deux grands secteurs :
 - la région Bretagne où les précipitations intenses dans la durée érodent particulièrement les sols et où peu d'aménagements permettent le piégeage des sédiments ;
 - l'Aquitaine avec le bassin versant de l'Adour, et la partie de la rive Gauche du bassin versant de la Garonne qui est non aménagée (bassins versants relativement étroits de la Gélisse, de l'Osse, de la Baïse, du Gers, de l'Arrats et de la Gimone) ;
- **le troisième contexte** correspond aux zones avec un taux d'érosion faible ou moyen et un fort aménagement. Ce sont les zones où la gestion des sédiments liés aux ouvrages hydrauliques pose moins de problèmes sauf pour des activités économiques ciblées comme la navigation dans les canaux. On retrouve ce contexte dans 3 secteurs :
 - l'Est de la France (régions Champagne Ardennes, Lorraine, Alsace et Bourgogne) où les aménagements comprennent les lacs réservoirs du bassin de la Seine gérés par Seine Grands Lacs qui ont été évoqués précédemment, les canaux utilisés pour la navigation fluviale et

- l'endiguement des berges (Rhin) qui réduit les apports dans la plaine d'inondation et favorise l'envasement au niveau des barrages même si les volumes sont très faibles ;
- le Massif Central, dans lequel les vallées encaissées ont été aménagées avec principalement des retenues hydroélectriques gérées par EDF. Le faible taux d'érosion réduit considérablement leur taux d'envasement et les lacs de retenue ne nécessitent pas de gestion récurrente des sédiments. D'autres retenues ne présentant pas de taux d'envasement conséquents non plus sont gérées par les Conseils Généraux locaux pour la gestion de l'irrigation comme en Charente ;
 - la région Pays de la Loire (Vendée et Loire Atlantique) dans laquelle les barrages et écluses du canal de Nantes à Brest (Loire Atlantique) gérés par VNF, présentent des taux d'envasement minimales. Les retenues hydrauliques gérées par Vendée Eau et la commune de La Roche s/ Yon en Vendée dont les superficies sont moyennes (de 0,7 à 2,2 km²) sont situées dans des secteurs avec des taux d'érosion plutôt faibles. Une évaluation devrait être réalisée prochainement par les autorités locales car certaines pré-retenues (retenues en amont d'autres retenues permettant de diminuer l'envasement) montrent un envasement anormalement conséquent ;
 - le **quatrième contexte** recouvre les zones avec un faible taux d'érosion et peu d'aménagements. Ce sont les zones correspondant principalement aux bassins Parisien et Aquitain.

1.2.2.4. Conclusion sur les modes d'accumulation des systèmes fluviaux

Avant les grands aménagements des systèmes fluviaux qui ont débuté à partir du XIX^{ème} siècle, les principales zones de stockage des sédiments des systèmes fluviaux sont les plaines d'inondation alimentées en sédiments lors des crues de débordement. Les aménagements, notamment pour écrêter ces crues, pour produire de l'électricité, pour l'irrigation et le stockage d'eau potable, ont nettement modifié la dynamique sédimentaire de ces cours d'eau. Les aménagements de types barrages et écluses traversant le cours d'eau coupent la dynamique sédimentaire et créent de nouvelles zones d'atterrissement à l'amont des ouvrages, réduisant l'alimentation en sédiments des plaines d'inondation. On assiste ainsi à un "transfert" des zones d'accumulation des sédiments des plaines d'inondation vers les retenues de barrages.

La combinaison des aléas érosion et du taux d'aménagement a permis de définir au niveau du territoire français quatre contextes. Les plus forts taux d'envasement sont à attendre du premier contexte qui combine fort taux d'envasement et aménagements multiples.

1.2.3. Les embouchures, zones de transition entre domaines fluviaux et côtiers

La dynamique sédimentaire fluviale se poursuit jusque dans l'embouchure des fleuves, transition avec le domaine marin dans lequel les sédiments fluviaux sont en partie exportés vers le large ou le long de la côte en fonction des courants littoraux.

Il existe deux types d'embouchure, l'estuaire et le delta. L'estuaire correspond à la partie marine d'une vallée ennoyée dans laquelle s'accumulent les sédiments apportés par le fleuve et par la mer, ce qui en fait une zone de transition entre les influences marine et continentale. Le delta, au contraire de l'estuaire avec son chenal unique, est formé d'un réseau de chenaux interconnectés. Les phénomènes sédimentaires sont comparables à ceux observés dans les estuaires et nous les traiterons ensemble.

La France possède 3 grands estuaires : deux sur la façade atlantique, ceux de la Garonne-Dordogne (estuaire de la Gironde) et de la Loire, et un sur la Manche, celui de la Seine. De nombreux autres estuaires de taille beaucoup plus modeste jalonnent les côtes françaises (Figure 2-7). Dans leur ensemble, les estuaires sont fortement aménagés que ce soit pour la pêche ou la navigation de plaisance (port de l'Aiguillon sur le Lay, port d'Arcachon dans l'estuaire de l'Eyre,...), l'activité économique de transport de fret (ports du Havre et de Rouen dans l'estuaire de la Seine, port de Nantes-St Nazaire dans l'estuaire de la Loire, port de Bordeaux dans l'estuaire de la Gironde,...), la production d'énergie (la Rance) ou le soutien à l'approvisionnement en eau (barrage d'Arzal sur la Vilaine,...).

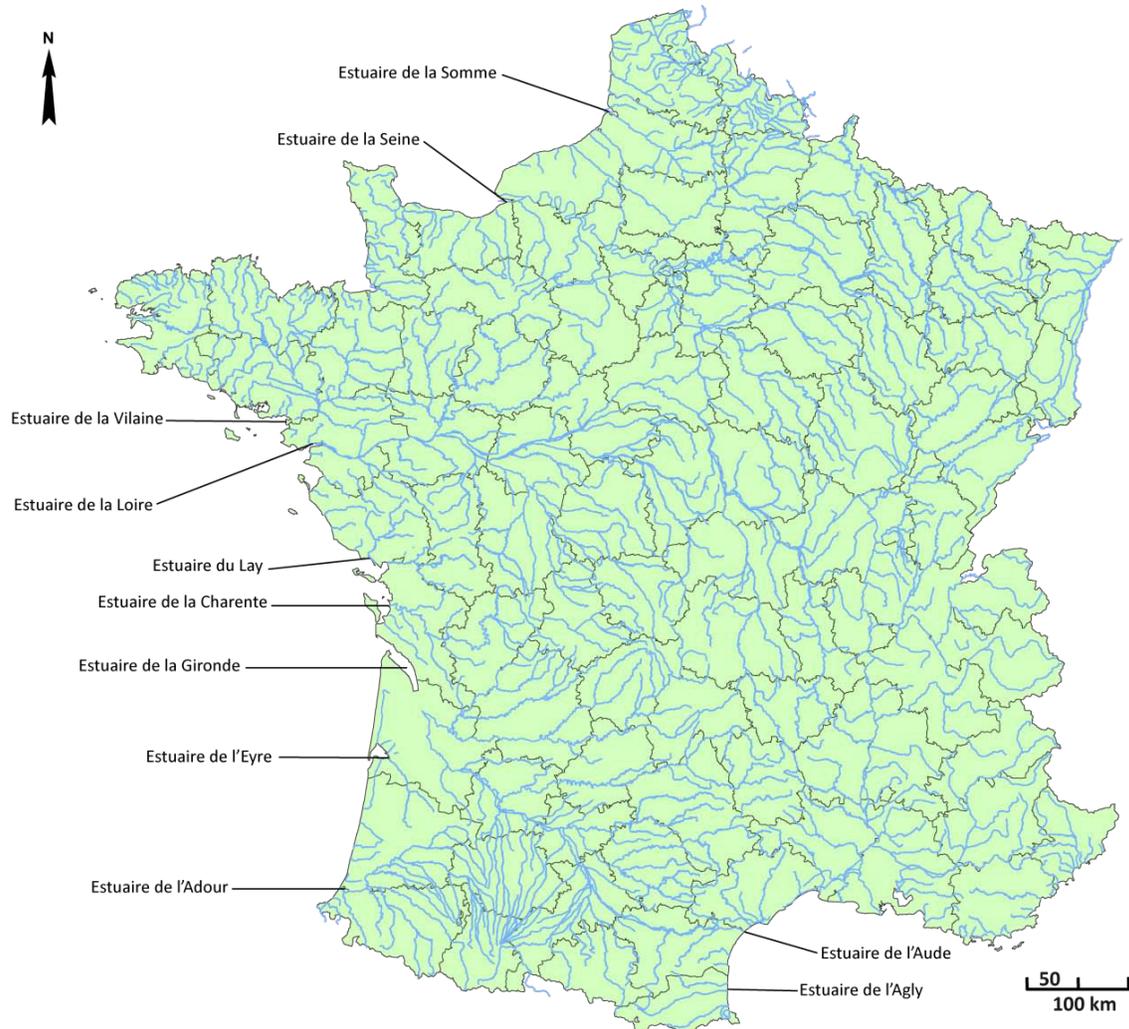


Figure 2-7 : Carte de France des estuaires. Identification des grands estuaires et de certains estuaires de taille moyenne.

Dans ce qui suit, nous présentons d'abord la dynamique de la sédimentation fine dans un estuaire avant de présenter en détail les caractéristiques des grandes embouchures françaises. Malgré sa faible dimension, l'estuaire de la Rance fait l'objet d'une présentation spécifique du fait de son aménagement unique, l'usine marémotrice.

1.2.3.1. Les bouchons vaseux et la crème de vase

Cette large embouchure sur une mer ouverte qu'est un estuaire voit s'opposer deux forces antagonistes, le débit fluvial et l'onde de marée. La diminution de la vitesse de l'écoulement due à la rencontre de ces deux forces ainsi que la différence de densité entre les eaux douces et marines conduisent au dépôt de sédiments tout d'abord sableux et silteux. Ensuite, c'est la différence de charge ionique entre les eaux douces et salées qui provoque la formation du **bouchon vaseux**, c'est-à-dire la floculation des particules fines, les argiles, créant une zone de forte turbidité, de 100 à 500 fois plus importante que celle rencontrée dans les milieux marins ou cours d'eau (Pomerol, 2005; Romaña, 1994). Ce bouchon vaseux se forme autour du point de pénétration maximale de la salinité et peut s'étendre à l'extérieur de l'estuaire lors des périodes de crues et remonter plus en amont, au cours des étiages, comme le montrent les données sur l'estuaire de la Seine (Figure 2-8).

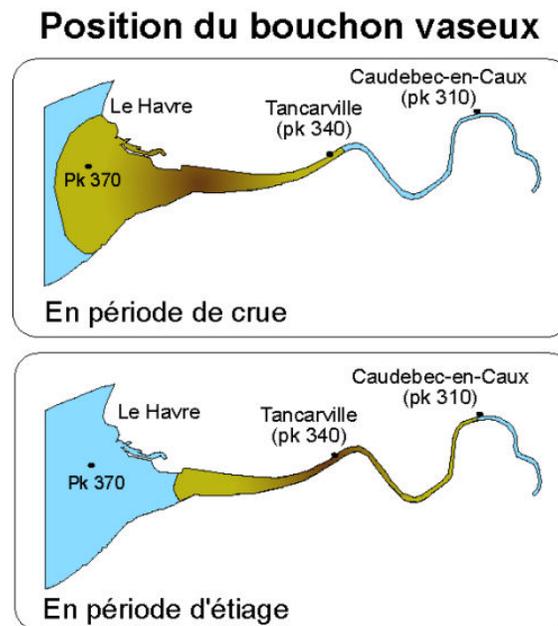


Figure 2-8 : Position du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine (Dupont et al., 2001; GIP-Seine-Aval, 2008)
(pk distance linéaire le long du cours d'eau)

La crème de vase se forme préférentiellement lors des marées de mortes eaux durant lesquelles l'étale est plus long et les courants sont plus faibles facilitant les dépôts de matières en suspension plus fines.

Le bouchon vaseux de la Seine occupe une position moyenne à Tancarville (pk 340). Lors des crues, il s'étire en baie de Seine sur plus de 15 km (pk 370) alors qu'en période d'étiage, il remonte jusqu'à Caudebec en Caux (pk 310).

Le volume de sédiments piégés dans le bouchon vaseux peut représenter 1 à 3 années d'apports sédimentaires fluviaux (Etcheber et al., 2007). Une partie de ces sédiments stockés est remobilisée au gré des variations des débits fluviaux et des amplitudes des marées, l'autre est stockée de façon permanente (crème de vase) et tend à combler les estuaires (Dupont et al., 2001).

1.2.3.2. La dynamique des estuaires au cours de l'Holocène

L'Holocène est marqué par le réchauffement climatique postglaciaire qui provoque notamment une remontée du niveau marin (Nichols, 2009). Associés à cette remontée du niveau marin, les apports sédimentaires, qu'ils soient marins ou fluviaux, comblent progressivement les estuaires. Ce remblaiement est différent selon que l'estuaire est dominé par les actions de la marée ou de la houle.

Un estuaire dominé par la marée montre la séquence sédimentaire suivante :

- des dépôts grossiers (graviers, sables) à la base, liés à la mise en place des chenaux de marées ;
- des dépôts fins (vases) riches en matière organique succèdent aux dépôts grossiers et correspondent à la basse vaseuse tidale, la slikke ;
- des dépôts sableux de petits chenaux séparant les deux dépôts de vaseuses peuvent s'intercaler dans la séquence ;
- des dépôts fins (vases) contenant de nombreux restes de végétaux correspondant à la haute vaseuse, le schorre et terminent la séquence.

Un estuaire dominé par la houle montre une séquence sédimentaire verticale moins marquée avec une alternance de dépôts fins lagunaires parfois riches en matière organique lorsque la houle fait chuter l'intensité du débit fluvial et permet aux particules les plus fines de se déposer, avec des dépôts plus grossiers sableux montrant des rides de courants lors d'influences marines plus importantes.

Les dépôts stockés dans l'estuaire actuel se sont donc accumulés suite à la remontée du niveau marin qui a suivi la fin de la dernière glaciation. Après une première phase de comblement par des matériaux sableux, les marais se sont développés.

1.2.3.3. L'estuaire de la Gironde

La Gironde, estuaire commun de la Garonne et de la Dordogne (Figure 2-9), est le plus vaste estuaire français et même européen. Il s'étend sur plus de 75 km de long et 12 km de large, couvrant une superficie de 625 km².

L'évolution morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Gironde est sous double influence des phénomènes naturels et de l'action anthropique au travers des régulations de débit du fleuve et des dragages.

L'estuaire de la Gironde (Garonne et Dordogne) constitue, en effet, le deuxième plus gros exportateur fluvial de sédiments de France avec 1,86 Mt/an créant un panache important à l'exutoire. Son débit moyen est de 650 m³/s mais peut atteindre 1 450 m³/s en hiver voire 7 500 m³/s lors de crues. La morphologie de l'embouchure de la Gironde est caractérisée par un plateau rocheux qui sépare deux passes : la passe Sud et la passe Ouest. Ce plateau reçoit les débits fluviaux de la Gironde mais aussi une partie des débits fluviaux de la Charente et de la Sèvre plus au nord par le Pertuis de Maumusson entre l'île d'Oléron et la côte Sud Charentaise. Le vent dominant dans ce secteur vient du Sud-Ouest. La circulation des eaux et donc des MES au sein du proche plateau continental est soumise à de multiples facteurs, le vent, les températures, les crues et les tempêtes.



Figure 2-9 : Photographie satellite de l'estuaire de la Gironde

Les études sur l'estuaire montrent que le matériel fin (crème de vase) est en partie exporté vers le large lors de forts débits fluviaux qui étirent le bouchon vaseux sur le plateau continental (Allen et al., 1974). Le matériel déposé sur le plateau continental est alors repris par les courants marins et exporté vers le large ou le long des côtes.

1.2.3.4. L'estuaire de la Loire

L'estuaire de la Loire s'étend sur environ 110 km entre Ancenis et son embouchure au large de St-Nazaire (Figure 2-10). Sa largeur est très variable de 2 km au niveau du goulet de St-Nazaire jusqu'à 11 km pk 0 et occupe une surface d'environ 60 km² (Desmazes et al., 2000).

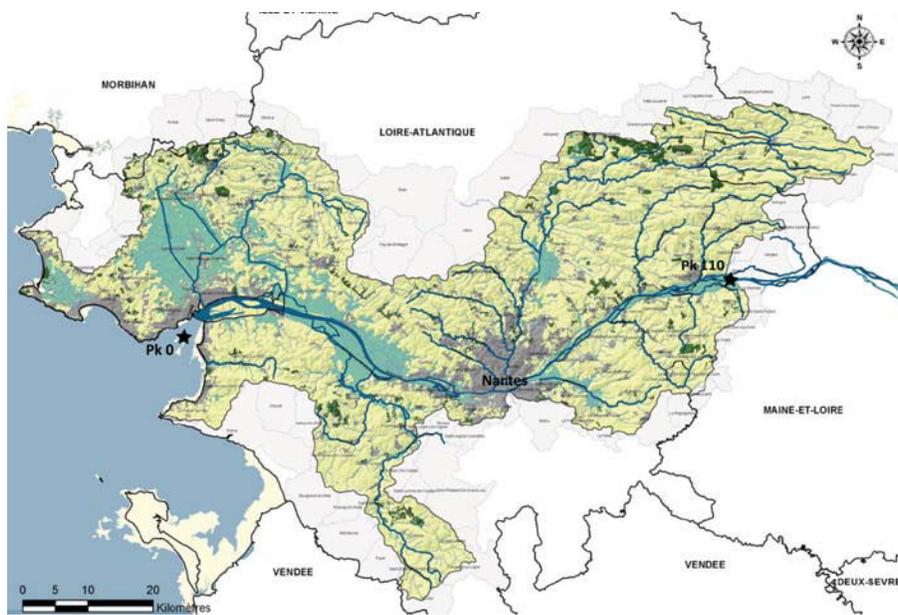


Figure 2-10 : Territoire du SAGE Estuaire de la Loire (GIP-Loire-Estuaire, 2015)

Jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, l'estuaire de la Loire se caractérisait par une sédimentation importante, favorisant le développement de vasières. A partir du milieu du XIX^{ème} siècle, l'estuaire a été l'objet de travaux d'aménagement considérables dont les principaux peuvent se résumer à des endiguements et au creusement d'un chenal unique. Ces aménagements sont liés au développement économique de l'ensemble portuaire maintenant connu sous le nom de Grand Port Maritime Nantes-St-Nazaire, avec notamment l'aménagement du lit du fleuve dès 1903 pour permettre l'accès de navires grande taille jusqu'au port de Nantes, la construction de terminaux agro-alimentaire, méthanier, roulier et charbonnier notamment à Montoir de Bretagne et les chantiers navals de St-Nazaire.

Ces travaux qui ont limité la divagation naturelle du lit de la Loire ont conduit à la formation de berges estuariennes soumises à la marée en lieu et place de l'ancien lit de la Loire (Figure 2-11).

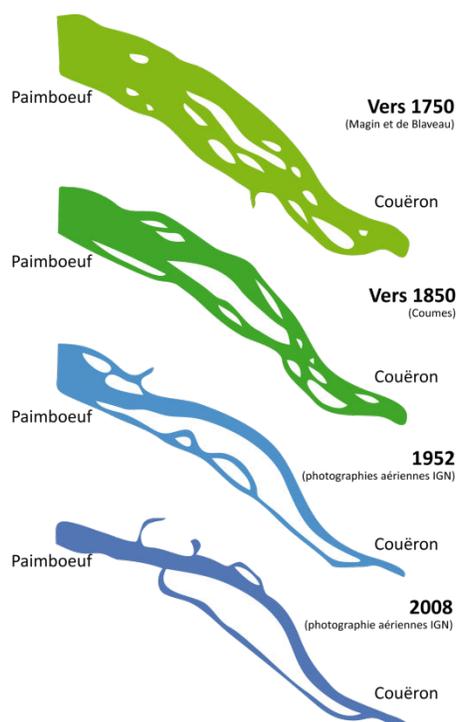


Figure 2-11 : Evolution de la morphologie de l'estuaire de la Loire entre Paimboeuf et Couëron de 1750 à 2008 (GIP-Loire-Estuaire, 2015)

Chaque année, environ 0,5 à 1,5 Mt de sédiments sont piégés dans l'estuaire de la Loire pour un apport fluvial annuel estimé entre 0,3 et 2,4 Mt par an. En fonction de la marée et des débits fluviaux, le bouchon vaseux s'étend de quelques kilomètres à plus de 60 entre Mauves s/ Loire et St-Nazaire (GIP-Loire-Estuaire, 2014). La crème de vase se forme en période de mortes eaux pendant lesquelles les courants atténués et la durée accrue des étales favorisent le dépôt sédimentaire des particules argileuses. L'épaisseur actuelle de la crème de vase est de 1 à 3 m, sur une longueur de 20 km, pour une masse estimée à 100 000 t (Sanchez-Angulo, 2000; Staebler, 2006). Finalement, la Loire exporte une partie de ces MES au large vers la baie de Bourgneuf notamment et l'estuaire de la Vilaine.

1.2.3.5. L'estuaire de la Seine

L'estuaire actuel de la Seine s'étend sur 160 km de long. Sa limite amont, le barrage de Poses, est artificielle. A l'aval, l'embouchure de la Seine s'élargit à partir de Tancarville où elle fait 600 m de large pour atteindre 16 km entre Sainte-Adresse et Trouville-sur-Mer. L'estuaire couvre ainsi une superficie de 50 km² (Guézennec et al., 1999).

Très aménagé et industrialisé depuis 1834 pour permettre l'accès aux navires de grande taille aux ports du Havre et de Rouen, l'estuaire est divisé en 3 zones (GIP-Seine-Aval, 2011) (Figure 2-12) :

- l'estuaire amont ou fluvial entre Poses (pk 202) et Vieux-Port (pk 325) qui pourrait être divisé en deux à Rouen avec une zone amont peu aménagée (55 % des berges à l'état naturel) et une zone aval plus aménagée (80 % des berges) ;
- l'estuaire moyen entre Vieux-Port et Honfleur (pk 365) où se situe la majorité de l'échange de salinité (point maximum de pénétration de la salinité) et qui est une zone totalement endiguée. On y retrouve cependant des zones humides plus ou moins connectées à la Seine comme le Marais Vernier, le Marais Cressenval et la vallée de la Risle ;
- l'estuaire aval ou marin de Honfleur à la partie orientale de la baie de Seine, où est exporté le bouchon vaseux lors des crues (cf partie 1.2.3.1.).

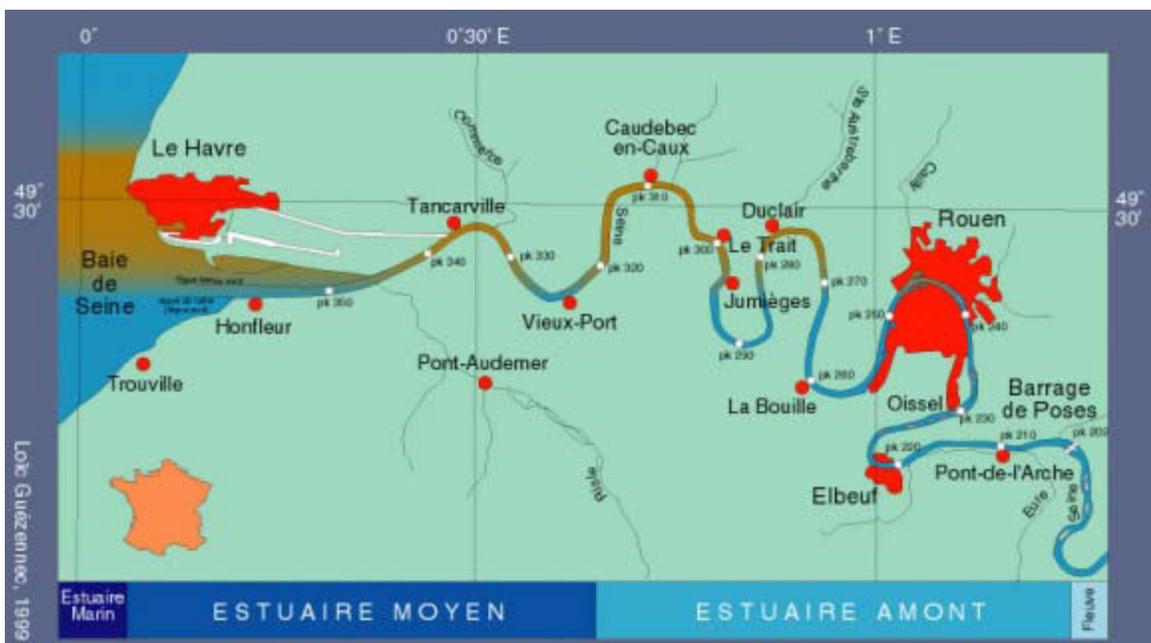


Figure 2-12 : Schéma de l'estuaire de Seine (Guézennec et al., 1999)

Les aménagements importants de l'estuaire ont conduit à un déplacement vers l'aval du bouchon vaseux. La crème de vase correspondant à des dépôts plus ou moins indurés de MES dans l'estuaire est formée préférentiellement durant les mortes eaux et sont appelés localement des "vapies". Plus 650 000 t de sédiments par an transitent par le barrage de Poses depuis le bassin versant amont de la Seine. Le piégeage naturel de MES dans le bouchon vaseux de l'estuaire est estimé entre 20 000 et 400 000 t/an (Figure 2-8).

1.2.3.6. Le delta du Rhône, un système en recul

Le Rhône est le seul grand fleuve français qui se termine par un delta. Ce delta s'est construit depuis la fin de la dernière glaciation en réponse aux interactions entre la remontée du niveau marin et les forts apports sédimentaires. Les crues exceptionnelles et leurs charges sédimentaires conséquentes ont contribué au développement de multiples chenaux qui ont favorisé la croissance du delta et la progradation de la ligne de côte depuis 6 000 ans (Provensal et al., 2004).

Avant l'endiguement de son cours dans la région d'Arles, le Rhône divaguait dans sa vallée créant de nombreux bras actifs ou partiellement abandonnés. L'endiguement du Rhône et le renforcement de ses berges, au cours du milieu du XIX^{ème} siècle ont contribué à définir un lit majeur stable, contribuant au rehaussement de celui-ci (zone délimitée par les digues) et à la famine de la plaine d'inondation (Pont and Roditis, 1993).

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, les apports sédimentaires ont nettement diminué suite aux travaux de stabilisation des terrains de montagne (RTM, 2015), à la réduction de la surface des terrains agricoles depuis 150 ans au profit d'aménagements urbains et du développement de forêts et à la construction de nombreux barrages depuis les années 1930 (Arnaud-Fassetta, 2003).

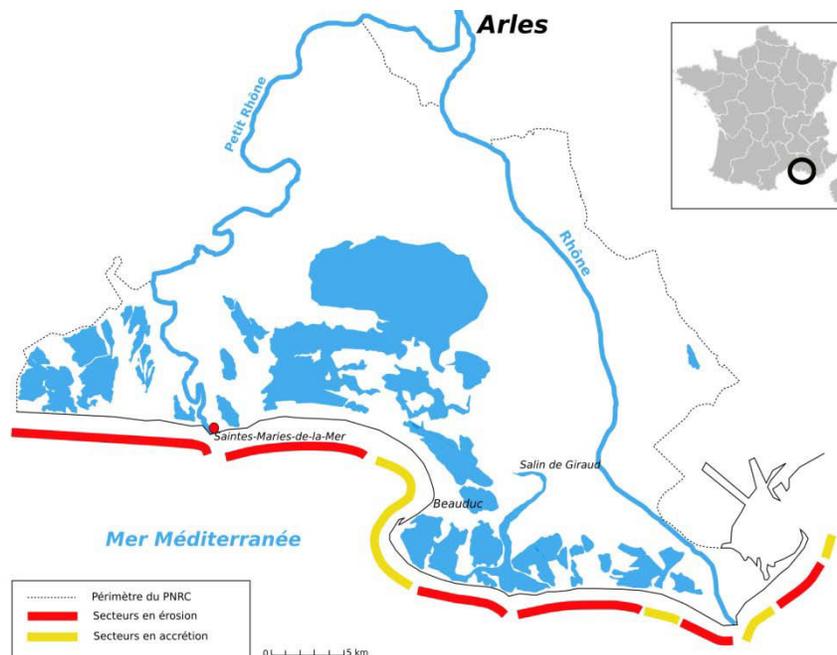


Figure 2-13 : Erosion et accrétion sur littoral camarguais (Allouche and Nicolas, 2015)

Le flux sédimentaire alimentant le delta du Rhône est ainsi passé de plus de 30 Mt/an à moins de 10 Mt/an actuellement. Ainsi, après une phase de stabilisation, le delta du Rhône est en recul depuis une cinquantaine d'années (Provensal et al., 2004). Il n'existe plus actuellement de lieu de stockage des sédiments exportés par le Rhône dans le delta. A l'instabilité naturelle du littoral du delta du Rhône, s'ajoute la diminution de son alimentation en sédiments ce qui explique qu'une large part du littoral soit en érosion (Figure 2-13).

1.2.3.7. L'estuaire de la Rance, un aménagement unique

L'estuaire de la Rance est unique sur le territoire français car il a fait l'objet de plusieurs aménagements dont le plus remarquable est celui de l'usine marémotrice, mise en service en 1966. Cette usine, avec une capacité de 240 MW, a été longtemps la plus grande usine marémotrice au monde, avant l'ouverture en 2011 de celle de Sihwa Lake (Corée du sud, puissance 254 MW).

L'estuaire, qui s'étend sur près de 25 km², est situé dans une zone de fort marnage, les amplitudes des marées peuvent atteindre 14 m lors de vives eaux exceptionnelles. Le fonctionnement de l'usine a modifié le régime de marée de l'estuaire, conduisant à une augmentation du niveau moyen d'eau, une réduction du marnage et une prolongation des étales. Tous ces changements amplifient la tendance naturelle à la sédimentation dans ces zones soumises auparavant au va-et-vient du bouchon argileux. Suite à ce changement de régime, on observe une tendance à l'envasement dans les anses et dans la partie amont de l'estuaire. Cet envasement est constitué de matériel très fin dans la partie située entre l'écluse du Châtelier et le Mont Garo à l'aval (Figure 2-14).

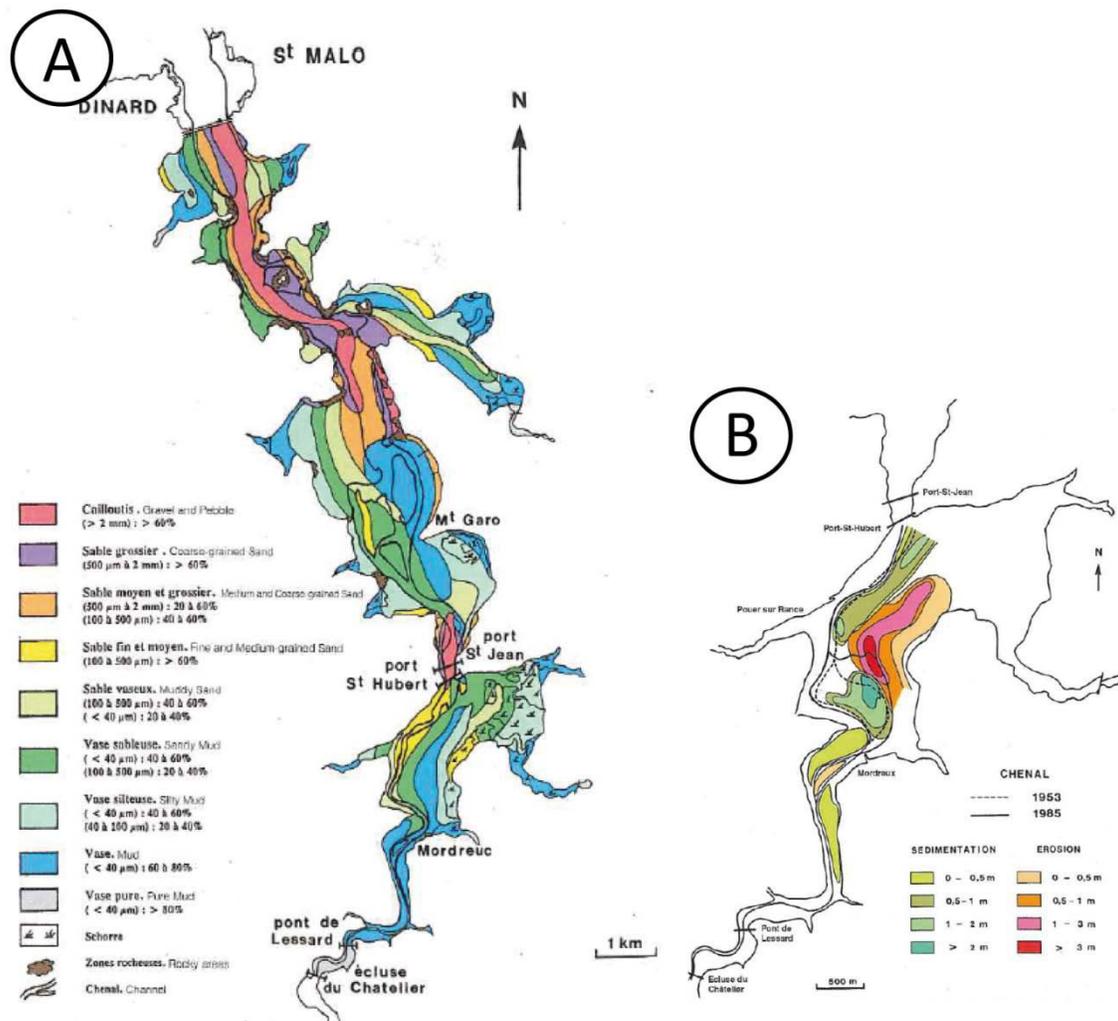


Figure 2-14 : Estuaire de la Rance (Bonnot-Courtois et al., 2002). A) Répartition des sédiments superficiels en 1994 ; B) Evolution des fonds entre Mordreuc et Port-Saint-Jean entre 1953 et 1985.

1.2.3.8. Conclusion sur les modes d'accumulation dans les systèmes estuariens

Avant les grands aménagements qui ont débuté dès le milieu du XIX^{ème} siècle, les grands systèmes estuariens qui bordent les côtes françaises étaient le siège d'une dynamique sédimentaire complexe, régie par les marées et la dynamique fluviale. Les bouchons vaseux et crème de vase ont constitué une large part des sédiments fins qui ont contribué à leur comblement et à l'avancée, dans le cas du Rhône, de sa vaste plaine deltaïque.

Depuis le début des aménagements, et notamment durant le XIX^{ème} siècle pour permettre l'accès aux grands ports estuariens aux navires de grande taille, le creusement de chenaux, l'endiguement des berges et les réductions des apports sédimentaires ont conduit à des situations contrastées :

- le delta du Rhône est en érosion ;
- l'estuaire de la Gironde est en équilibre, expulsant lors des crues une grande partie des matières en suspension et du bouchon vaseux au large de l'estuaire ;
- les estuaires de la Seine et de la Loire n'alimentent plus les grandes plaines d'inondations qui les bordent.

Ces accumulations contribuent au renouvellement de la matière, en particulier la crème de vase.

1.2.4. Les dépôts côtiers

Avec ses trois façades maritimes, la Manche (et la mer du Nord), l'Océan Atlantique et la mer Méditerranée, le littoral français s'étend sur près de 20 000 km. Nous nous intéressons ici aux zones situées en dehors des grands estuaires présentés auparavant. Une grande partie de ces côtes est protégée par la loi Littoral (JORF, 1986) mais les aménagements restent nombreux que ce soit pour la protection des rivages ou les activités de loisirs.

Après une présentation de la dynamique côtière, nous décrivons le fonctionnement des côtes françaises avec un accent particulier sur les zones en comblement.

1.2.4.1. La dynamique des côtes

Le trait de côte présente une dynamique d'évolution qui est gouvernée par la houle, la marée et les courants associés. Les vagues représentent la principale source d'énergie transmise à la zone littorale et sont souvent considérées comme le principal agent de transport sédimentaire le long du littoral, mais la situation peut être nettement plus complexe, notamment dans les baies côtières.

La limite d'action de la houle varie en fonction du milieu et de son ouverture sur le large. On considère en général que celle-ci s'exerce jusqu'à 5-25 m, pour les vagues de beau temps et peut atteindre 100 m pour les vagues de tempête (Figure 2-15). Ces limites permettent de définir des domaines sédimentaires. Dans l'avant plage soumise à l'influence permanente de la houle, les particules argileuses ne peuvent pas se déposer. Au-delà de la limite d'action des vagues de beau temps, les argiles de décantation alternent avec les dépôts sableux amenés lors des tempêtes alors qu'au large, seules les argiles de décantation sédimentent.

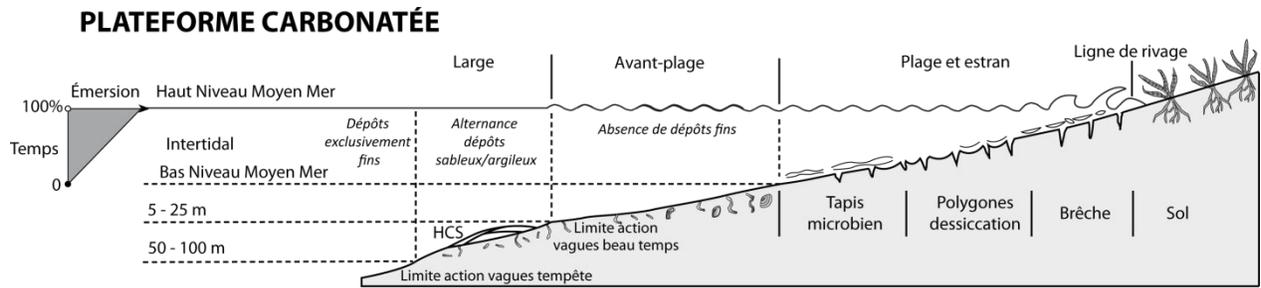


Figure 2-15 : Schéma d'une plateforme carbonatée et de la dynamique des dépôts côtiers

La vitesse des courants littoraux est d'autant plus grande que le vent souffle parallèlement aux isobathes. Des vitesses de 10 -20 cm/s sont assez courantes. Lors de son déferlement sur le littoral, le jet de rive se fait dans la direction de propagation, alors que le retrait des eaux se fait selon la pente de la plage. Le mouvement résultant est un déplacement le long du rivage des particules. Ce transport sédimentaire dit "en dent de scie", correspond à la dérive littorale (Figure 2-16 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Si le vent change de direction, la dérive s'adapte tant en intensité qu'en direction.

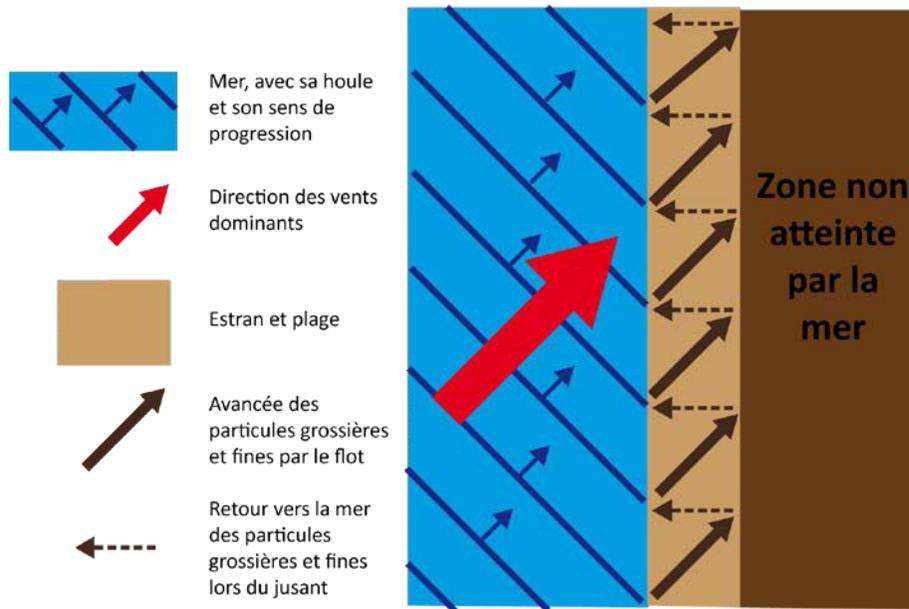


Figure 2-16 : Schéma illustrant la dérive littorale et le trajet d'une particule après le déferlement de 7 vagues

La marée que l'on observe sur la façade ouest de la France est engendrée par une onde provenant de l'Atlantique. Cette onde, de faible amplitude (inférieure à un mètre), se déforme en fonction de la configuration du rivage, conduisant à des marnages d'amplitudes fortement contrastées (près de quatorze mètres en baie du Mont-Saint-Michel en vives eaux contre moins de quatre mètres sur la côte landaise en mortes eaux - Figure 2-17).

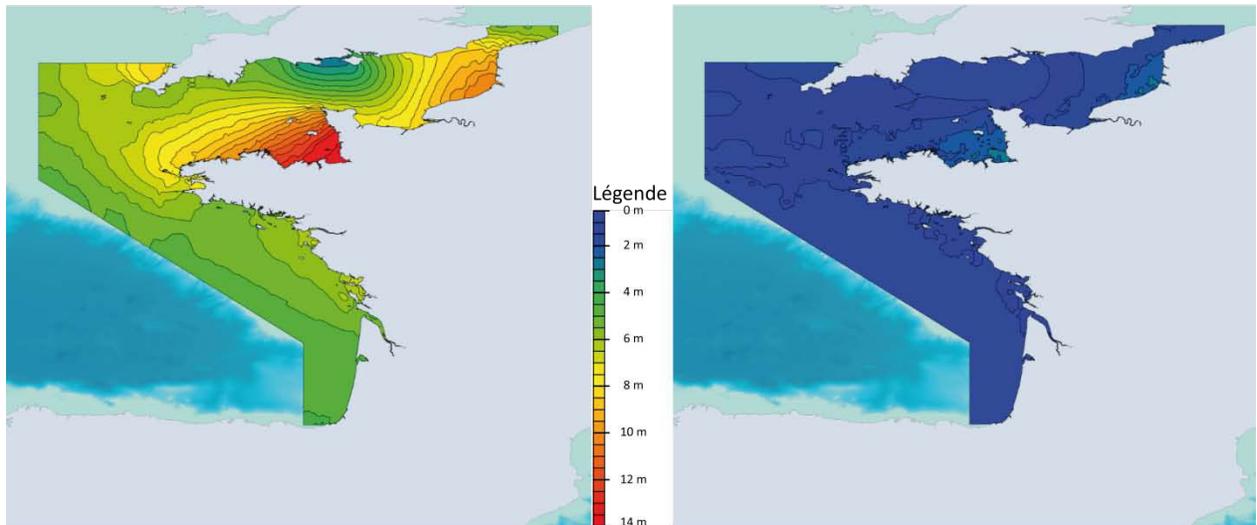


Figure 2-17 : Cartographie du marnage sur les côtes françaises A) en vives eaux ; B) en mortes eaux (SHOM, 2015)

Dans les zones de fort marnage, la vitesse des courants de marée peut atteindre des vitesses de quelques mètres par seconde, avoir des effets comparables à ceux des vagues et contribuer à la redistribution des sédiments notamment vers le large.

Ces dynamiques hydrauliques contrastées, contraintes par la morphologie du littoral, conduisent à l'accumulation de matériel argileux fin dans différentes zones :

- les baies et estuaires moyens plats dans lesquelles les vasières correspondent à la partie basse des estuaires inondée par chaque marée (la slikke) alors que les prés salés (le schorre) représentent la partie haute des estuaires qui n'est inondée que lors des grandes marées. Ces derniers sont actuellement en extension en raison du comblement des baies et estuaires moyens plats ;
- les marais et lagunes côtiers s'étendent le long des côtes basses. Les lagunes sont alimentées en eau de mer soit par un chenal unique soit par une infiltration sous des cordons de graviers. Certains de ces marais ont été aménagés lors de l'abandon des surfaces par la mer ou lors de leur prise par des systèmes de digues qui les protègent des incursions marines.

1.2.4.2. Le littoral français

L'érosion du littoral français touche le quart des côtes (IFEN, 2006). Cette évolution est très liée à la nature des côtes. Les littoraux rocheux sont relativement stables, les côtes sableuses sont les plus soumises à l'érosion et les côtes vaseuses (vasières, estuaires maritimes et marais maritimes) s'engraissent dans les 2/3 des cas (soit 370 km de côte) (Figure 2-18).

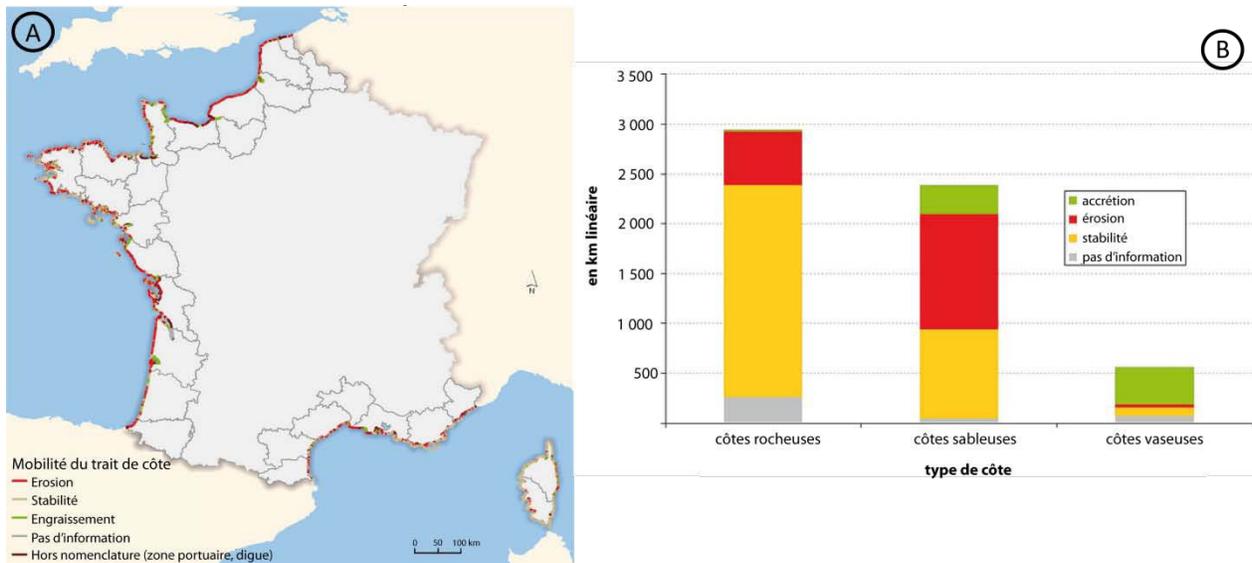


Figure 2-18 : L'évolution du littoral français A) Carte de mobilité du trait de côte ; B) Histogramme de l'évolution du littoral en fonction de la nature des côtes (ONML, 2004)

Sur les côtes de la Manche et de la mer du Nord, les secteurs épargnés par l'érosion sont les vasières de l'estuaire de la Seine et les baies de la Canche, l'Authie et la Somme. Sur les côtes de Bretagne et Loire-Atlantique, le linéaire côtier est relativement stable. Sur la côte Atlantique au sud de l'estuaire de la Loire, seuls les marais littoraux (baie de Bourgneuf, marais poitevin et bassin d'Arcachon) et d'importantes portions du littoral dunaire aquitain sont préservés de l'érosion. Le pourtour méditerranéen et le littoral corse sont épargnés par l'érosion alors que les zones des lagunes héraultaises et la Camargue sont particulièrement concernées.

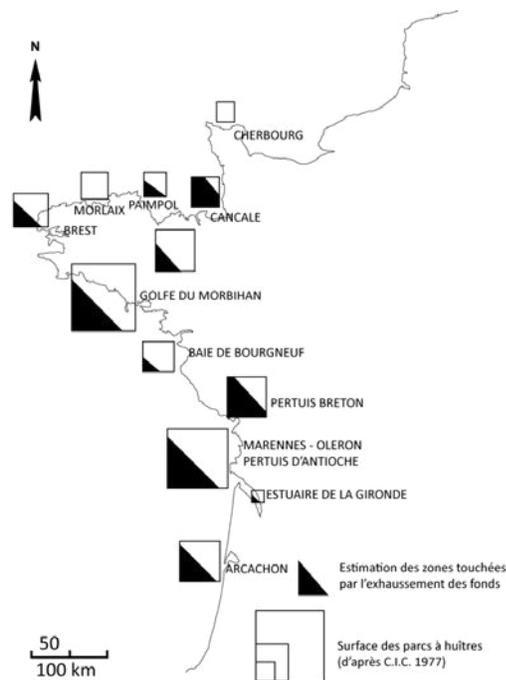


Figure 2-19 : Exhaussement des fonds liés à l'ostréiculture d'après Kervella (2010)

Les cultures ostréicoles et mytilicoles se font dans des zones abritées, telles que les baies et bassins qui présentent des conditions hydrodynamiques propices au dépôt de sédiments fins. Ces cultures se pratiquent sur différents supports (pieux, tables...) qui constituent des obstacles pouvant perturber la propagation des vagues, les écoulements de marée et modifier le transport sédimentaire. On observe un envasement général dans les zones de conchyliculture qui résulte d'une interaction complexe entre la dynamique de la baie et l'ostréiculture.

1.2.4.3. La baie de Somme

La baie de Somme est constituée de l'estuaire de la Somme qui divague dans une large baie dont morphologie est héritée de la vallée incisée lors des dernières glaciations. Elle s'étend sur près de 70 km² et est soumise à un régime macro-tidal (marnage de 9-10 m et vitesse des courants de 2 m/s). Les apports de sédiments dans la baie de Somme sont principalement marins car la contribution de la Somme est relativement faible (faibles débits et paysage mature).

La canalisation de la Somme, la construction du viaduc ferré entre Noyelles et St Valery-sur-Somme et celle des digues ont accéléré le colmatage du fond de la baie en diminuant la surface d'action du flot (courant de marée généré par la marée montante à l'opposé du jusant lié à la marée descendante) (Diluca, 1975). Le régime tidal fort est dominé par le flot, cette dissymétrie des courants de marée explique en grande partie le colmatage de la baie. Les dépôts argileux, appelés localement les mollières, se trouvent en fond de baie et sur sa partie méridionale, alors que les dépôts sableux dominent dans la partie externe de la baie. Cet ensablement naturel est favorisé par l'Homme qui a cherché à favoriser la stabilisation du trait de côte par l'endiguement et par la végétation dans le fond de baie.

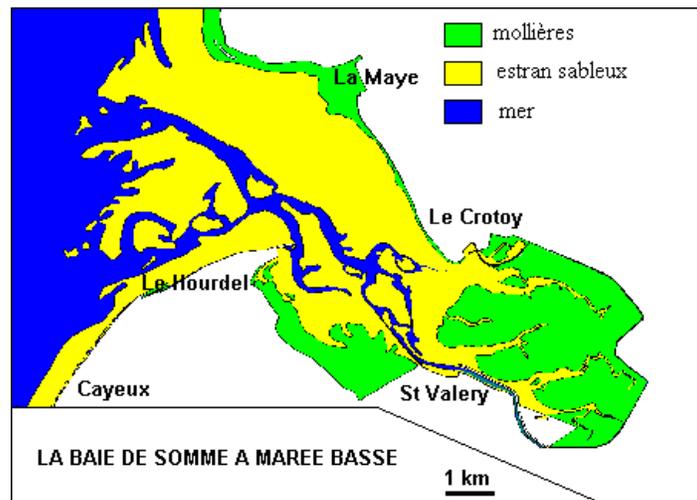


Figure 2-20 : Répartition sédimentaire dans la baie de Somme

1.2.4.4. La baie du Mont-Saint-Michel

La baie du Mont-Saint-Michel est une vaste dépression d'environ 600 km². Elle est située entre Granville sur la côte cotentine et la pointe du Grouin au nord de Cancale. La baie interne est composée d'un large estran qui se découvre sur plus de 10 km au moment des grandes marées de vives eaux (Bonnot-Courtois et al., 2002). Le marnage maximum dans la baie est de 14 mètres en vives eaux ce qui en fait le plus important de l'ensemble des côtes françaises et un des plus importants au monde (Figure 2-17). La vitesse des courants de marée est en moyenne de 1 m/s, diminuant à 0,3 m/s dans la baie de Cancale (partie occidentale de la baie du Mont-Saint-Michel) mais pouvant atteindre 2,2 m/s dans la zone estuarienne orientale (Ehrhold, 1999).

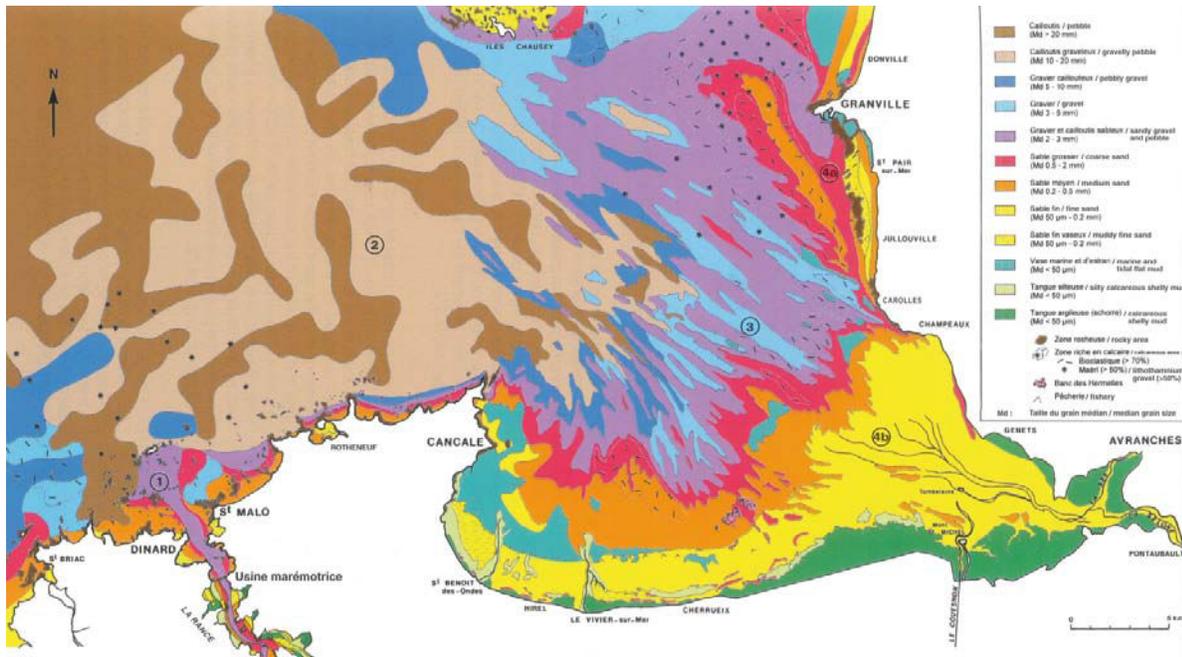


Figure 2-21 : Carte de répartition des sédiments superficiels dans la baie du Mont-Saint-Michel (Bonnot-Courtois et al., 2002)

Les apports de sédiments dans la baie du Mont-Saint-Michel sont principalement marins car la contribution des fleuves côtiers (la Sée, la Sélune et le Couesnon) est relativement faible du fait de leur faibles débits moyens respectifs (8 m³/s, 17 m³/s et 11,3 m³/s) et leur charge négligeable en MES qui en découle (Ehrhold, 1999).

Ces faibles apports fluviaux sont d'ailleurs en partie accentués par la poldérisation de la baie depuis 150 ans, par la canalisation des fleuves depuis un siècle et l'aménagement d'un barrage sur le Couesnon.

La répartition des sédiments au sein de la baie (Figure 2-21) reflète ainsi la dynamique de l'onde de marée. Le flot représente le courant de marée dominant dans la baie. Son énergie et sa capacité de transport des sédiments diminuent vers l'intérieur de la baie. On observe ainsi une diminution de la taille des particules sédimentaires du large vers le rivage. Les dépôts fins sont ainsi localisés aux extrémités du dispositif tidal où les courants sont les plus faibles (Bonnot-Courtois et al., 2002) :

- dans la baie de Cancale à l'Est, où les courants sont faibles et où les activités ostréicoles et conchylicoles constituent des obstacles piégeant les MES ;
- aux débouchés des estuaires de la Sélune, de la Sée et du Couesnon ;
- dans le domaine intertidal supérieur (la côte Sud de la baie) avec des dépôts importants de slikke et de schorre.

1.2.4.5. Les Pertuis Breton et d'Antioche

Les Pertuis Breton et d'Antioche (Figure 2-22) sont situés le long du littoral Atlantique entre l'estuaire de la Loire au nord et celui de la Gironde au sud. Le plus au Nord, le **Pertuis Breton** s'étend en bordure de la côte vendéenne et charentaise, entre Les Sables d'Olonne et La Rochelle, et sa bordure maritime constitue la plus grande partie de l'anse de l'Aiguillon. Il reçoit les apports des bassins versants du Lay (1 972 km²) et de la Sèvre Niortaise (3 650 km²) qui alimentent le pertuis aussi bien en eau qu'en sédiments. Il correspond, tout comme la baie de Somme, au comblement des vallées incisées pendant les dernières glaciations de ces deux fleuves côtiers (Chaumillon et al., 2008). Ce comblement a été accéléré par la poldérisation et la canalisation des cours d'eau côtiers comme dans la baie du Mont-Saint-Michel (Weber, 2004).

Le **Pertuis d'Antioche** auquel on peut associer le Pertuis de Maumusson est, quant à lui, situé sur la côte charentaise, entre Marennes et La Rochelle. Il est associé aux bassins versants de la Charente (9 855 km²) et de la Seudre (855 km²) qui l'alimentent en eau et en sédiments.

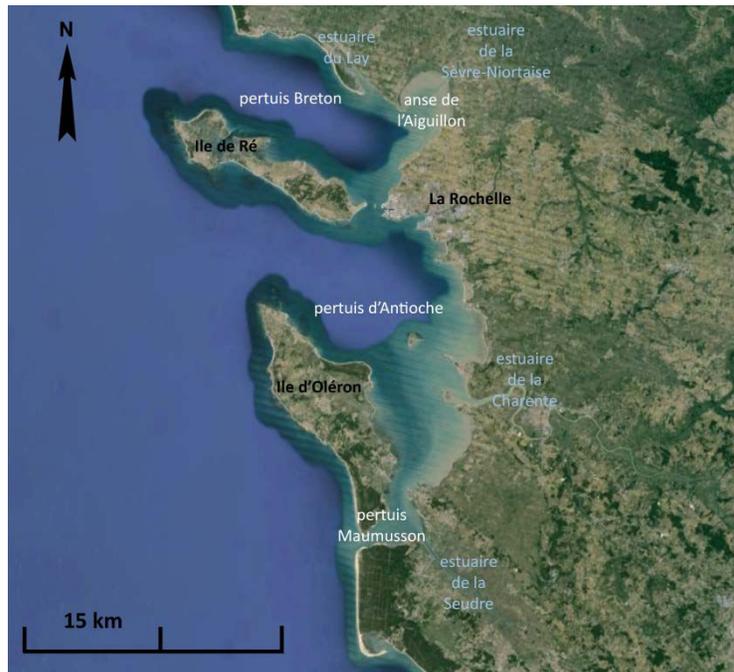


Figure 2-22 : Photographie satellite des pertuis charentais (Google earth)

Sur le littoral vendéo-charentais, le marnage est en moyenne de l'ordre de 4 m, oscillant entre 2 et 6 m en fonction des coefficients de marée. Du fait de la morphologie de la côte, ce marnage tend à diminuer à l'approche des rivages de l'anse de l'Aiguillon et des marais de Brouage et de Marennes-Oléron. Les

vitesse maximale des courants de marée sont observées aux pointes des îles de Ré et d'Oléron, dans les coureux de La Pallice (zone entre la pointe sud de l'île de Ré et La Rochelle) et d'Oléron (zone entre la pointe sud de l'île d'Oléron et La Tremblade) et dans les estuaires. Elles ne dépassent cependant pas les 2 m/s de moyenne.

Les résultats de simulations numériques (Froidefond et al., 1998) montrent que, selon les conditions de débit, marées et vents, une partie du panache girondin (sédiments exportés par la Garonne et la Dordogne - cf. 1.2.3.2.) est exportée vers le Nord en direction de l'île d'Oléron et à l'intérieur du **Pertuis d'Antioche**. Ce dernier constitue une zone relativement protégée des courants marins et donc propice aux dépôts sédimentaires. Il n'est pas seulement alimenté par le panache girondin comme évoqué ci-dessus mais aussi et en grande partie par les apports fluviaux de la Charente (100 000 t/an) et de la Sèvre (environ 20 000 t/an) et par une remobilisation par la dérive littorale d'une partie des sédiments du **Pertuis Breton** situé au nord via le goulet (ou coureau de la Pallice) entre La Rochelle et l'île de Ré.

Le **Pertuis Breton** est quant à lui alimenté d'une part grâce à la dérive littorale par des sédiments exportés par de petits fleuves côtiers vendéens et par la Loire, mais aussi et principalement pour la fraction à granulométrie fine par les apports fluviaux du Lay et de la Sèvre Niortaise. Ces apports fluviaux sont en partie stockés dans la zone interne du pertuis Breton, appelée l'Anse de l'Aiguillon qui présente une nette tendance au comblement et est seulement incisée par l'estuaire de la Sèvre Niortaise.

1.2.4.6. Le Bassin d'Arcachon

Le bassin d'Arcachon (Figure 2-23) est une lagune semi-fermée le long de la côte aquitaine au sud de l'estuaire de la Gironde. Il s'étend sur une superficie de 155 km² dont 115 km² peuvent être découverts lors des marées basses importantes découvrant alors bancs de sables et vasières (Benoit, 2008).

Dans le bassin aquitain de nombreux lacs jalonnent le littoral. Ce sont d'anciennes baies qui pour la plupart sont alimentées en eau par de tout petits cours d'eau de quelques kilomètres, voire quelques centaines de mètres appelés localement des *berles* et des *crastes*. Leurs faibles débits face aux courants marins n'empêchent pas l'accrétion des sédiments au-devant des baies. La dérive littorale déplaçant les sédiments du nord vers le sud forme des cordons dunaires qui, à terme, ferment les baies. Seul le bassin d'Arcachon n'est pas fermé car, contrairement aux autres baies, il est alimenté par un fleuve côtier, l'Eyre (bassin versant de 2 141 km²), qui a un débit (27 m³/s) suffisant pour maintenir une embouchure vers la mer face à l'accrétion sédimentaire. En ce qui concerne le remplissage sédimentaire du bassin, on ne peut pas réellement parler de comblement car on observe surtout des déplacements de corps sédimentaires (Bouchet et al., 1997). Ces derniers sont dominés par les sables mais la proportion d'éléments fins augmente au fur et à mesure que l'on pénètre plus profondément dans le bassin et que l'on s'éloigne du cours de l'Eyre. Les matériaux fins sont issus du remaniement d'argiles lagunaires ou continentales à forte teneur en matière organique (Bouchet et al., 1997).

Les apports en sédiments de l'Eyre sont cependant négligeables et les sédiments apportés par le flot de marée sont remobilisés par un courant tournant dans le bassin et sont en grande partie évacués lors du jusant (Bouchet et al., 1997). Il s'agit d'un système qui évolue lentement avec une tendance à l'érosion de la zone Sud et une tendance au comblement du fond du bassin dans la zone Nord (Sogreah, 2002).

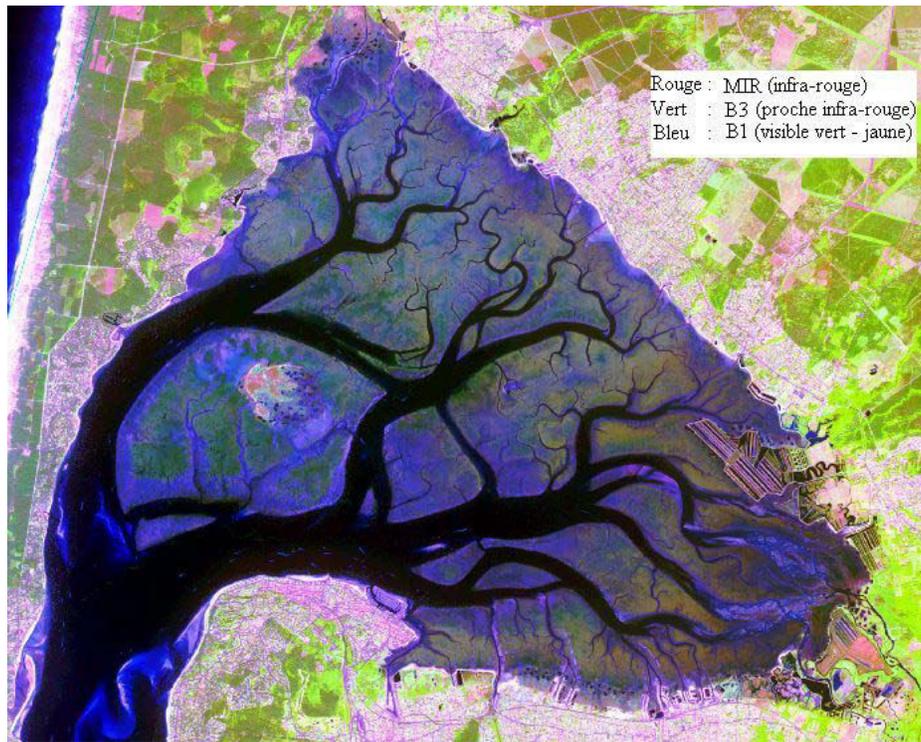


Figure 2-23 Image satellite SPOT du bassin d'Arcachon
(<http://kalideos.cnes.fr/spip.php?article19>)

1.2.4.7. Conclusions sur les dépôts côtiers

La dynamique naturelle des sédiments sur les côtes françaises est liée à l'action conjuguée de la houle, de la marée et des courants associés. Seules les côtes dominées par une sédimentation fine ont tendance à s'envaser. Parmi ces dernières, la dynamique de comblement et notamment l'origine des sédiments fins qui s'accumulent dans les baies sont très variables. On trouve ainsi :

- des apports principalement marins lorsque les contributions de fleuves souvent côtiers sont trop faibles et que le régime tidal est relativement fort et dominé par le flot, comme dans le cas des baies du Mont-Saint-Michel et de la Somme ;
- des apports mixtes, marins et fluviaux lorsque les contributions des fleuves ainsi que les apports marins, particulièrement par la dérive littorale et les marées, sont conséquents, comme dans les pertuis charentais.

1.2.5. Les sources du renouvellement en matériaux argileux

Cette première évaluation de la source naturelle de sédiments fins nous a permis d'identifier plusieurs sources de matériaux renouvelables :

- les colluvions (R1) représentent des accumulations isolées dont l'occurrence et le volume sont difficiles à prédire. Cette source existe mais il est difficile de prévoir les zones d'accumulation ;
- les altérites (R4), accumulations de très faible épaisseur sur de larges surfaces, sont en continuité avec les formations actuellement exploitées et sont soumises à l'érosion hydrique qui en réduit le volume ;
- les dépôts fluviaux (S1) correspondent à de larges volumes qui, avant les aménagements anthropiques, s'accumulaient dans les plaines d'inondation et les estuaires. Aujourd'hui, les zones de dépôts ont été largement déplacées dans les zones aménagées (retenues de barrages, ports) affamant les plaines d'inondation et modifiant la dynamique des embouchures (endiguements, chenaux stabilisés) ;
- les baies côtières (S2) constituent des lieux privilégiés de sédimentation, les sédiments fins s'accumulant préférentiellement en fond de baie ;
- les dépôts côtiers en liaison avec les ouvrages hydrauliques ou les ports de plaisance représentent des atterrissements de matériaux fins disséminés le long des côtes en fonction des aménagements.

A partir de cette évaluation qualitative des zones favorables à l'accumulation de sédiments fins, la partie suivante est consacrée à une approche quantitative du renouvellement de la source en matériaux fins dans les différents milieux identifiés dans cette première évaluation.

2. Les vitesses d'accumulation des sources de matériaux argileux

Nous abordons maintenant une évaluation quantitative à semi-quantitative (lorsque les données sont insuffisantes) des vitesses d'accumulation de matériaux fins associés aux sources qui ont été identifiées dans l'analyse des milieux d'accumulation de ces sédiments fins.

Pour contribuer au renouvellement de la ressource en matériaux argileux, ces sites d'accumulation de matériaux fins doivent posséder des vitesses d'accumulation suffisantes pour compenser les volumes prélevés dans les séries fossiles pour la fabrication de produits de terre cuite.

Le taux d'accumulation ne peut être abordé que sur une échelle de temps en rapport avec la dynamique des processus qui conduisent à l'accumulation des matériaux. En fonction des milieux de dépôts identifiés, nous serons ainsi amenés à considérer des périodes pouvant atteindre plusieurs milliers d'années pour les dépôts de type événementiels afin d'obtenir des valeurs moyennes significatives.

Avant d'aborder les taux d'accumulation des sédiments dans les différents environnements présentés dans la première partie, nous présentons une réflexion sur l'érosion hydrique des sols qui met en perspective les flux de MES dans les spécificités géologiques, morphologiques et d'occupation du territoire français.

2.1. L'érosion hydrique des sols

L'érosion hydrique des sols est un phénomène naturel contrôlé par de nombreux facteurs qu'il est nécessaire de prendre en compte lorsque l'on souhaite la modéliser. Le modèle le plus utilisé dans le monde est le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) prenant en compte l'érosivité de la pluie, l'inclinaison et la longueur de la pente, la nature du couvert végétal, le type d'occupation des sols et l'érodabilité du sol (Stone and Hilborn, 2000).

Le programme européen PESERA (Pan European Soil Erosion Risk Assessment) (Figure 2-24), dans une démarche prospective de l'évolution des sols, fournit une cartographie détaillée de l'érosion des sols par l'eau. A la différence du modèle empirique précédent, le modèle PESERA est fondé sur le ruissellement avec un pas journalier qui prend en compte la variabilité des précipitations, la capacité de stockage du sol et l'interception par la végétation (Van Rompaey et al., 2003). Il a été créé pour répondre à la problématique de la quantification de l'érosion à l'échelle de l'Europe. A l'échelle nationale, le modèle MESALES, dérivé de PESERA, permet une évaluation de l'aléa érosion validée régionalement par des experts pédologues et des conseillers agricoles locaux (Colmar et al., 2010).

Les premiers résultats du modèle appliqué à la France permettent d'obtenir des valeurs quantifiées des flux d'érosion des sols.

- Ce sont les flux sédimentaires des régions alpines qui ressortent avec des taux d'érosion supérieurs à la moyenne mondiale qui est de 225 t/km²/an (Milliman and Syvitski, 1992). La partie amont alpine du Rhône présente des taux d'érosion (320 t/km²/an) proches de ceux observés dans les bassins versants de l'Isère et de la Durance. Ces deux derniers bassins versants présentent des zones avec des valeurs extrêmes respectivement de 576 t/km²/an (Mano et al.,

2006) et de 648 t/km²/an (Alary, 1998) principalement dues à l'érosion de formations géologiques très érodables telles que les marnes jurassiques ;

- le bassin versant de l'Adour dont les formations géologiques sont particulièrement érodables montre des valeurs plutôt moyennes, entre 20 et 70 t/km²/an, ce qui peut être assez élevé pour un bassin versant de cette taille (Maneux et al., 2001) ;
- le bassin versant de la Seine et celui de la Loire dont les cours d'eau drainent en particulier le bassin Parisien et ses faibles aléas érosion, présentent des taux d'érosion faibles de l'ordre de 5 à 20 t/km²/an (Delmas et al., 2012) ;
- et enfin, le bassin versant de la Garonne présente une hétérogénéité dans la distribution des taux d'érosion. La zone amont du bassin versant de la Garonne avec celui de l'Ariège présente des taux d'érosion entre 20 et 30 t/km²/an principalement dus à la résistance des formations géologiques des Pyrénées internes, on retrouve ces valeurs dans le bassin versant de la Dordogne et de l'Aveyron principalement liées aux formations géologiques plus résistantes du Massif Central et aux faibles aléas érosifs. Les taux d'érosion les plus élevés se trouvent dans les bassins versants du Tarn et de la Dourdou (affluent du Lot) (Delmas et al., 2012; Maneux et al., 2001; Mano et al., 2006; Meybeck et al., 2003).

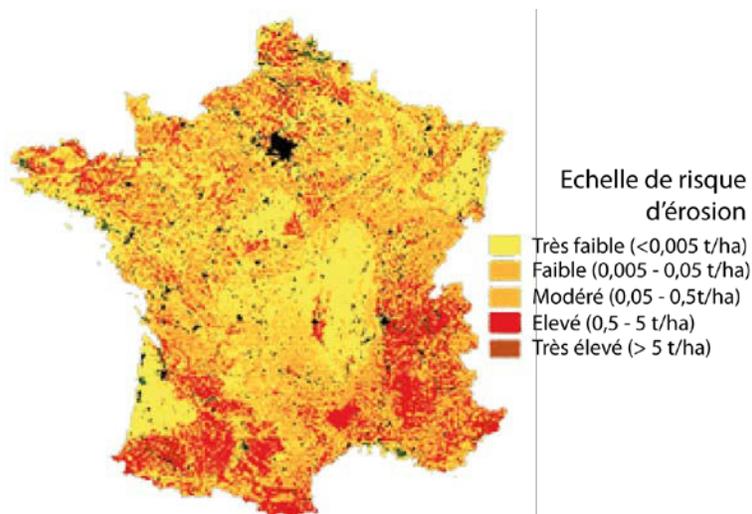


Figure 2-24 : Evaluation de l'érosion des sols en France par le modèle Européen PESERA

Les résultats de cette simulation confirment les situations contrastées connues de longue date :

- de forts taux d'érosion (entre 0,5 et 5 t/ha soit entre 50 et 500 t/km²) dans les Alpes et Préalpes qui combinent les effets de l'altitude avec ceux de la nature des sédiments ;
- des taux élevés également observés dans le piémont pyrénéen et le bassin aquitain en liaison avec des sédiments peu cohésifs ;
- les taux les plus faibles (inférieurs à 0,005 t/ha soit 0,5 t/km²) associés aux zones de très faible relief : les Landes, la plaine de Limagne, la Sologne et la plaine d'Alsace.

Cette cartographie sera utile à la fois dans l'évaluation de la préservation des produits du régolithe et dans l'estimation des flux de MES des cours d'eau.

2.2. Le régolithe,

2.2.1. L'altération de surface

Les processus d'altération formant les altérites dépendent du régime climatique. La synthèse présentée dans la partie 1.2.1.1. de ce chapitre, montre que les altérites occupent une large surface du territoire en particulier dans le bassin parisien, une partie du bassin aquitain et plus localement sous forme de nappes dans le Massif Central et le Massif armoricain.

La quantification du taux d'accumulation des altérites de surface nécessite de connaître les taux d'altération des roches à l'origine des altérites, et les taux d'érosion associés.

Le taux d'altération est lié au climat et à la composition de la roche. Une étude sur les terrasses quaternaires du nord de la France (Ricordel-Prognon et al., 2009) fournit des taux d'altération variant entre 1 et 10 m par million d'années, soit ramené à une année, 10^{-6} à 10^{-5} m/an. Ce taux d'altération est très dépendant de la nature de la roche altérée. Il est plus faible pour les roches du socle.

L'érosion vient en concurrence avec l'altération. Les agents de l'érosion que sont l'eau et le vent varient selon le couvert végétal des sols, la topographie, l'exposition des sols. Leur action est ainsi difficile à quantifier car les facteurs évoqués peuvent faire varier les valeurs obtenues sur une large gamme. Sous les climats tempérés, les taux d'érosion sont estimés entre 5 à 50 t/km²/an (Kirkby, 2004), soit une valeur de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-6}$ et $2,5 \cdot 10^{-5}$ m/an (en considérant une densité de 2), tout à fait comparable à celle de la formation des altérites.

Pour que les altérites s'accumulent, il est nécessaire que le taux d'érosion soit plus faible que les taux de production du régolithe. Les sols (à la surface du régolithe) protègent les altérites de l'érosion notamment mécanique (Dixon and von Blanckenburg, 2012), cependant les changements de pratiques agricoles conduisent à une réduction du couvert végétal qui favorise l'érosion hydrique.

Dans le contexte agricole actuel, on peut considérer que le bilan global de préservation des altérites est nul. De grandes disparités vont exister entre les zones au couvert végétal dense, de faible relief dans lesquelles le bilan sera positif et celles largement cultivées dans des zones aux morphologies plus marquées.

Pour conclure, les estimations ci-dessous des taux de production et des taux d'érosion ne permettent pas d'affirmer qu'il y a une accumulation des altérites sur le territoire. En effet, selon les calculs, il y a bien une production d'altérites mais l'érosion de ces formations est actuellement trop importante par rapport à la production.

2.2.2. Les colluvions

La formation de colluvion est très localisée en fonction de la topographie et se produit de manière "événementielle" suite à une déstabilisation des pentes. Dans ce contexte, il est difficile de quantifier, à l'échelle d'un territoire tel que la France, un taux d'accumulation de colluvions par an.

Nous nous appuyons sur des études locales qui montrent que l'accumulation de colluvions, bien que ponctuelle, peut se maintenir sur plusieurs centaines d'années sur un même site et conduire à des volumes conséquents. Les résultats d'études sur des colluvions de la Valdaine, près de Montélimar (Sud-Est de la France) identifient, au cours de l'Holocène, trois périodes pendant lesquelles la formation de colluvions a été conséquente (8 500 - 2 000 BC, 700 BC - 800 AD et 1 200 – 2 000 AD) (Notebaert et al., 2014). A l'échelle du bassin versant de taille réduite étudié (334 km²), ces données donnent localement les taux annuels moyens pendant les périodes d'accumulation présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Accumulation de colluvions dans la Valdaine (SE France) au cours de l'Holocène (évaluation en t en considérant une densité de 2) selon Macaire et al., (2002)

Périodes	Taux d'accumulation (m ³ /an)	Taux d'accumulation (t/km ² /an)
8 500 – 2 000 BC	4,1.10 ³	0,02.10 ³
700 BC - 800 AD	36,8.10 ³	0,2.10 ³
1 200 – 2 000 AD	113,2.10 ³	0,6.10 ³

Les taux d'accumulation estimés sont probablement sous-estimés pour les dépôts les plus anciens du fait des processus d'érosions mécanique et chimique auxquels les dépôts ont été soumis.

Les conditions climatiques ne sont pas à négliger dans ces estimations. Ainsi, les taux d'accumulation très élevés qui sont observés sur les derniers mille ans sont très probablement à mettre en relation avec les conditions climatiques du Petit âge glaciaire qui ont été marquées par une diminution des températures, une avancée de la calotte glaciaire dans le nord de l'Europe et de fortes précipitations ainsi qu'une occupation humaine conséquente dans les zones rurales.

Si l'on prend les valeurs extrêmes, en considérant pour les sédiments une densité de 2, pour un bassin versant de la taille de celui de la Valdaine nous obtenons des taux d'accumulation variant entre 8.10³ et 2,5 10⁶ t/an. Ces valeurs ne sont absolument pas transposables à l'échelle de la France, mais elles montrent que localement les volumes peuvent être conséquents et atteindre des tailles favorables à leur exploitation.

Une autre étude sur la même période de l'Holocène dans le Sud-Ouest du bassin parisien sur le petit bassin versant du Négron (162 km²) montre qu'environ 2 10³ t/an de colluvions s'y sont accumulés mais ne précise pas les périodes d'accumulation (Macaire et al., 2002). Cependant, ces valeurs sont concordantes avec les résultats précédents.

En conclusion, les colluvions constituent des dépôts isolés, répartis sur le territoire français mais qui peuvent représenter localement des volumes conséquents. Donner une estimation quantifiée à l'échelle de la France est difficile compte tenu de la variabilité au cours du temps au sein d'un même bassin versant. Cette source de sédiments fins n'est pas à négliger, mais sa quantification reste incertaine.

2.3. Les flux sédimentaires associés aux cours d'eau

La quantification des flux sédimentaires associés aux cours d'eau est généralement abordée par l'intermédiaire de modèles plus ou moins complexes en fonction de la qualité des données d'entrée et de la résolution souhaitée. Ces modèles peuvent permettre la quantification des flux hydriques, de l'érosion et/ou du stockage (Merritt et al., 2003).

Dans le cadre de cette étude, nous nous appuyons sur les taux d'érosion hydrique présentés au début de cette partie (2.1.) qui nous donnent une indication des flux sédimentaires qui vont alimenter les cours d'eau en charge solide. Nous nous intéressons à la partie fine de la charge solide, les matières transportées en suspension (MES), qui sont soit exportées vers les mers et océans, soit stockées dans des atterrissements naturels ou anthropiques.



Figure 2-25 : Photographie satellite de la France avec les flux de matières en suspension des grands fleuves

Tableau 3 : Flux de matières en suspension exportés au large des côtes françaises (Delmas et al., 2012)

	Volume (Mt/an)	Aire drainée/France (%)	(%) sédiments exportés
Façade Méditerranéenne	11,1	24	70
Rhone actuel	9,6	19	60
Autres cours d'eau	1,5	5	10
Façade Manche (Nord)	1,37	23,4	8,1
Seine	0,8	15	5
Somme	0,07	1,4	0,4
Autres cours d'eau	0,5	7	2,7
Façade Atlantique	3,9	52	23
Garonne	1,9	16	12
Loire	0,9	25	5
Adour	0,5	3	3
Autres cours d'eau	0,6	8	3
TOTAL	16,37	99,4	101,1

En moyenne en France, 16 Mt de sédiments sont exportés par les fleuves tous les ans (Figure 2-25) dont plus des 2/3 par le Rhône (Cerdan et al., 2012; Radakovitch et al., 2008). 70 % des sédiments du territoire sont exportés en mer Méditerranée alors que l'aire drainée par les cours d'eau qui s'y jettent ne représente que 24 % de la superficie totale du territoire, ce qui reflète les forts taux d'érosion associés à cette zone. 23,2 % des sédiments sont exportés dans l'océan Atlantique pour 53 % du territoire drainé, 6,9 % dans la Manche pour 21 % du territoire drainé et seulement 0,9 % dans la mer du Nord pour 2 % du territoire drainé, ce qui reste anecdotique (Tableau 3).

Comme évoqué précédemment, **la façade Méditerranéenne** est alimentée principalement par le Rhône avec une exportation de sédiments de l'ordre de 9,6 Mt/an.

- Les autres cours d'eau se jetant dans la mer Méditerranée exportent tout de même un peu plus de 1,5 Mt/an ce qui représente presque 10 % des sédiments exportés depuis le territoire pour une surface de drainage de 5 %. Cette proportion importante d'exportation des sédiments est principalement due aux petits bassins versants côtiers du Sud-Est de la France bénéficiant de taux d'érosion proches de ceux observés dans les bassins alpins voisins et du même climat méditerranéen avec presque 1 Mt/an de sédiments exportés. Les autres bassins versants correspondent aux Cévennes bénéficiant de précipitations intensives sur de courtes durées provoquant un apport ponctuellement important de sédiments et aux petits bassins de l'Est des Pyrénées.

La façade Manche est principalement alimentée par l'immense bassin versant de la Seine drainant près de 15 % de la superficie totale du territoire et exportant seulement 0,79 Mt de sédiments par an soit 80 % des sédiments exportés dans la Manche.

- Le reste des sédiments exportés le sont par la Somme (68 000 t/an), par les fleuves côtiers du Nord de la France et de Normandie (respectivement 0,12 et 0,14 Mt/an) et par une partie des fleuves côtiers bretons (0,17 Mt/an répartis entre la Manche et l'océan Atlantique dont la Rance). La faible alimentation en sédiments de la façade Manche reflète les faibles taux d'érosion observés dans le bassin parisien parcouru par ces fleuves.

La façade Atlantique est alimentée pour moitié par le bassin versant de la Garonne qui ne représente que 16 % du territoire, ceci est principalement dû aux apports importants du piémont pyrénéen où les taux d'érosion sont élevés ainsi que dans la partie sud du Massif Central.

- Les apports en sédiments du piémont pyrénéen se ressentent aussi dans les exportations de l'Adour qui pour un bassin versant ne représentant que 3 % du territoire exporte aussi 3 % des sédiments du territoire ;
- le plus grand bassin versant de la France est le bassin versant de la Loire qui représente un quart de la superficie totale de la France. Ce bassin versant ne subit que de faibles taux d'érosion ce qui est reflété par les exports de la Loire vers l'océan qui ne représentent que 5 % des exports nationaux de sédiments.

Les taux d'érosion locaux sont donc bien représentatifs des taux de MES présentes dans les différents cours d'eau qui drainent ces régions. Une partie des sédiments mobilisés par les processus d'érosion est exportée vers les mers et océans comme nous venons de l'évoquer. Cependant, le reste est stocké de manière plus ou moins pérenne dans des atterrissements au sein même de leur bassin versant, c'est ce que l'on appelle les dépôts fluvio-lacustres. Comme présenté précédemment, ces dépôts peuvent être naturels dans les plaines d'inondation ou anthropiques au sein de pièges liés aux aménagements hydrauliques le long des cours d'eau.

2.3.1. La sédimentation dans les plaines alluviales

Depuis le début de l'aménagement important des systèmes fluviaux en France, à partir de la révolution industrielle, les plaines d'inondation ne sont plus ou que peu alimentées en sédiments par les cours d'eau qui les traversent.

Ainsi de nombreuses plaines d'inondation ne sont alimentées en sédiments que lors de crues d'ampleur exceptionnelle qui ne peuvent être complètement absorbées par les dispositifs d'écrêtement des crues comme par exemple dans le bassin versant de la Seine lors des crues de l'Yonne en avril 2013. D'autre part, les aménagements hydrauliques conduisent à une incision des lits des cours d'eau suite à la diminution de la charge et à un piégeage des sédiments. Ces sédiments ne peuvent plus être déposés dans les plaines alluviales que lors des crues centennales ou d'ordre supérieur, ce qui réduit d'au moins un ordre de grandeur les taux d'accumulation.

Les plaines d'inondation qui continuent à être alimentées naturellement le sont généralement avec un taux d'accumulation moyen de 1,5 mm/an (Wolman and Leopold, 1957). Ce taux représente une valeur moyenne utilisée pour de nombreuses plaines d'inondation dans le monde, mais que l'on retrouve dans des études plus ciblées sur la Vilaine avec un taux de 1 à 1,2 mm/an (EPTB-Vilaine, 2011) et sur l'Ardenne avec un taux de 1,5 à 2 mm/an (Gautier et al., 2009).

Avec l'écrêtement des crues dont l'une des conséquences est la limitation de l'alimentation des plaines d'inondation aux seules des crues exceptionnelles, nous pouvons considérer que les plaines ne sont plus alimentées que lors d'évènements dont la fréquence est un ordre de grandeur supérieur à celui des évènements naturels : l'alimentation par des crues centennales au lieu de décennales. Sous cette hypothèse, l'estimation est alors de 0,15 mm/an. A l'échelle du territoire, en considérant une superficie totale de l'ensemble des plaines alluviales égale à 20 000 km², nous obtenons une valeur moyenne d'environ 3 Mm³/an de sédiments (6 Mt avec une densité de 2). A cette valeur, il convient de soustraire environ 0,025 mm/an de perte par érosion comme calculé dans la partie 2.2.1. (environ 0,5 Mm³ de perte par érosion). Cette estimation dépend beaucoup de la fréquence des évènements extrêmes qui est de l'ordre au moins de la centaine d'années.

2.3.2. Le piégeage dans les barrages

Les barrages constituent de véritables pièges à sédiments dont on connaît la géométrie du lac de retenue. La modélisation du taux d'envasement d'une retenue (S) peut se calculer à partir de la formule suivante (Yang and Lu, 2014) :

$$S = SY \times TE$$

avec S (taux d'envasement annuel) en t/an et SY (production annuelle de sédiments) en t/an et TE (capacité de piégeage de la retenue) en %

La capacité de piégeage (TE) d'une retenue est pondérée par la capacité C totale en volume de la retenue et la superficie du bassin versant (A) (Brune, 1953; Yang and Lu, 2014) :

$$TE = 100 \left(1 - \frac{1}{\left(1 + D \frac{C}{A} \right)} \right)$$

avec TE en %, C en m^3 , A en km^2 et D sans unité (entre 0,046 et 1 selon la granulométrie)

La production annuelle de sédiments (SY) est fortement liée au taux d'érosion (SSY) et à la superficie du bassin versant (A) selon la relation suivante (Yang and Lu, 2014) :

$$SY = SSY \times A$$

avec SY en t/an, SSY en t/ km^2 /an et A en km^2

Le taux d'érosion (SSY) peut être estimé d'après la littérature grâce à un modèle relativement simple développé par le département américain d'agriculture dans les années 50, l'USLE (Universal Soil Loss Equation) ou grâce au modèle développé pour l'Europe PESERA (cf. partie 2.1.).

A l'échelle d'une retenue comme celle de Serre-Ponçon sur la Durance où les taux d'envasement sont connus, il est possible de tester l'application de ces formules.

- Le taux d'érosion estimé par Alary (1998) pour la zone amont de la Durance est de 648 t/ km^2 /an à partir d'une formule similaire. En prenant une superficie du bassin versant amont (à Serre-Ponçon) de 3 600 km^2 , la production annuelle de sédiments SY est de $2,3 \cdot 10^6$ t/an ;
- la capacité de piégeage est de l'ordre de 99,9 %, ce qui donne un volume d'envasement annuel de $2,3 \cdot 10^6$ t.an⁻¹ environ. Le barrage de Serre-Ponçon a été mis en service en 1960 soit il y a 55 ans, on peut donc prévoir que $126,5 \cdot 10^6$ t de sédiments sont retenus par le barrage soit 63 Mm^3 (densité de 2). Le volume total de la retenue étant 1 200 Mm^3 , on peut estimer son envasement à 5 % sans action de l'homme ce qui est en accord avec les données d'EDF qui l'estiment à 2 % environ en prenant en compte la perte de volume de sédiment par la gestion de l'envasement notamment par les chasses.

D'après le Comité Français des Barrages et Réservoirs, on recense plus de 500 retenues de barrages en France dont 331 ont un volume d'eau maximum supérieur à 1 million de m^3 . A partir de ces grands barrages, de leurs bassins versant respectifs et des taux d'érosion locaux, nous estimons les taux d'envasement annuels des retenues par région à partir des formules présentées ci-dessus et détaillées en Annexe 2. Les taux d'érosion locaux sont tirés de la bibliographie et extrapolés, en cas d'absence de données, en fonction des taux d'érosion des cours d'eau à proximité.

L'application des formules fournit une estimation d'un taux d'envasement national annuel d'environ 12,5 Mt/an en prenant comme hypothèse qu'aucune gestion des sédiments n'est mise en place

(dragage, chasse,...) soit 6 Mm³ si l'on prend une densité de 2 pour ces matériaux fins (densité choisie comme moyenne pour des matériaux fins plus ou moins indurés selon leur milieu de dépôt) (l'estimation est en t car les taux d'érosion sont en t/km²/an). Cette valeur estimée est nettement inférieure à la valeur moyenne donnée pour la France par la commission des grands barrages (1 % ce qui donnerait 22 Mm³). Une estimation réalisée à partir des taux moyens observés en France par EDF (0,08 % du volume des retenues ((Malavoi, 2015) communication orale congrès ASF) donne une valeur d'envasement annuel d'environ 2 Mt de sédiments. Suivant le mode d'estimation retenu, les valeurs obtenues par le calcul (sans prise en compte de dragage) sont assez proches de celles calculées à partir des pourcentages d'accumulation fournis par EDF entre 2 et 6 Mm³, alors que l'estimation à partir des données de la commission des grands barrages est nettement supérieure.

Les deux estimations, celle d'EDF et la nôtre, sont ainsi du même ordre de grandeur et nous nous appuyons sur la valeur EDF qui prend en compte la gestion par chasses et qui est la plus pessimiste.

La répartition des retenues de grande taille est très inégale sur le territoire et reflète la distribution des massifs montagneux (Figure 2-26) :

- 22 % de ces retenues se situent en région Midi-Pyrénées ;
- 18 % en région Rhône-Alpes ;
- entre 5 et 10 % dans les régions Aquitaine, Auvergne, Languedoc-Roussillon, Limousin et PACA ;
- enfin moins de 5 % se trouvent dans les régions Alsace, Basse Normandie, Bourgogne, Bretagne, Centre, Champagne-Ardennes, Franche-Comté, Lorraine, Pays-de-la-Loire et Poitou-Charente) ;

Il est à noter que les régions Nord-Pas-de-Calais, Picardie, Ile-de-France et Haute-Normandie sont dépourvues de retenues de barrages de grande taille.

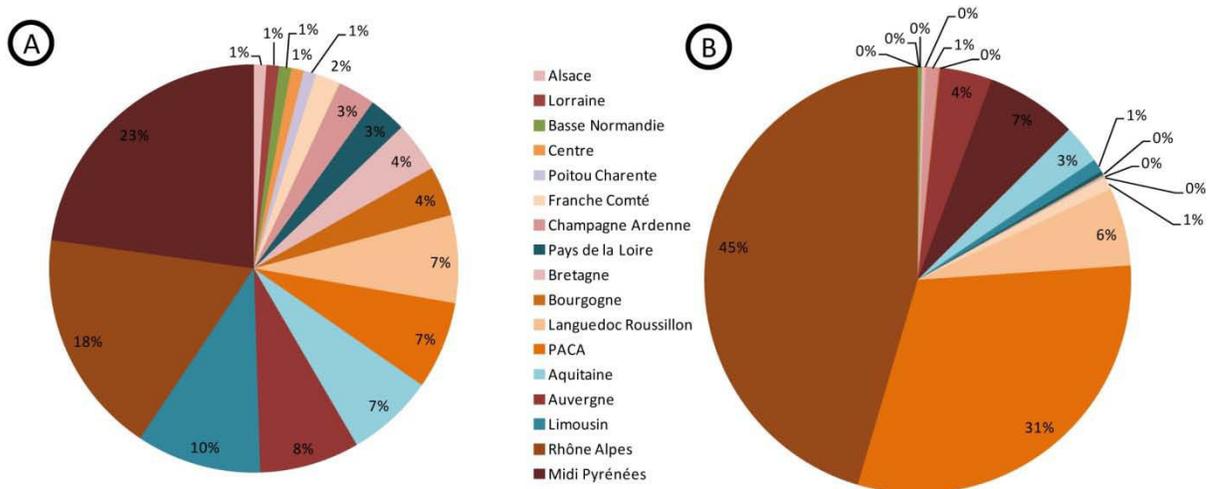


Figure 2-26 : Répartition par région A) des retenues dont le volume d'eau est supérieur à 1 Mm³ (% B) de l'estimation de l'envasement des retenues dont le volume d'eau est supérieur à 1 Mm³

Le piégeage de sédiments dans les retenues est encore plus inégalement réparti sur le territoire car il traduit non seulement les capacités des retenues mais également les taux d'érosion tels qu'ils sont présentés sur la Figure 2-6.

Les résultats des estimations montrent que près des trois quarts des sédiments piégés le sont dans les Alpes et sur leur pourtour, avec plus de la moitié dans la région Rhône Alpes et plus du quart dans la région PACA (Figure 2-26). Ces chiffres reflètent d'une part le nombre élevé de retenues dans ces régions (Figure 2-26) et d'autre part, les taux d'érosion très élevés dans les régions alpines (Figure 2-6-B). Dans le quart restant, environ 18 % des sédiments sont piégés en région Languedoc Roussillon, ce qui reflète les taux d'érosion importants observés dans ces régions en liaison avec le régime climatique qui favorise les évènements orageux et les forts reliefs.

2.3.3. Les flux dans les aménagements liés à la navigation

Le réseau fluvial et les ports représentent des zones aménagées par l'homme dans lesquelles peuvent s'accumuler de grandes quantités de sédiments. Le dragage de ces ouvrages constitue une nécessité afin de maintenir une hauteur d'eau suffisante pour les bateaux de fort tirant d'eau dans les ports ou pour maintenir la circulation des barges/péniches dans les canaux navigables.

En France, les sédiments extraits par dragage selon VNF représentent environ 2,5 Mm³/an pour le réseau fluvial.

- Dans le bassin parisien, l'Ourcq et son canal, le canal de l'Ourcq, sont régulièrement dragués pour la navigation. L'étude de son petit bassin versant évalue le volume annuel de sédiments fins (Φ moyen < 15 μ m) dragués à 34 000 m³ sur 10 ans (Hydratec (2013)). Sur le bassin de la Seine, près de 200 000 m³ de sédiments ont été dragués en 2014 dont la moitié dans les canaux (95 % de sédiments majoritairement fins) ;
- au niveau du canal du Midi dans le Sud de la France, 30 000 m³ de sédiments fins sont dragués par an (VNF-Sud-Ouest, 2011). Cette partie du réseau fluvial est gérée par VNF qui drague nationalement plus de 750 000 m³ de sédiments par an, principalement pour assurer le caractère navigable du réseau. Il s'agit donc d'un dragage régulier et d'une source pérenne de sédiments.

L'envasement des canaux du réseau fluvial est fortement lié aux taux d'érosion locaux et à leur ouverture sur le réseau fluvial naturel qui apporte une grande partie des MES. Le volume de sédiments dragués dans ces canaux est quant à lui dépendant aussi du gabarit des bateaux qui empruntent le réseau navigable.

Le volume des sédiments dragués dans chacun des grands ports est du même ordre que celui dragué dans les canaux (Alzieu, 1999).

- Rouen - volume annuel dragué 5 Mm³ dont 1,5 Mm³ de sédiments fins, la plupart du temps mélangés avec le sable (GIP-Seine-Aval, 2009) ;
- Nantes – St-Nazaire, volume annuel 10 Mm³ majoritairement sableux (Maillet and Clouet, 2012) ;

- Bordeaux, volume annuel dragué 8,5 Mm³ dont 7 Mm³ de sédiments fins.

Finalement au moins 8,5 Mm³ de sédiments fins sont dragués par an dans les grands ports fluviaux (Rouen, Nantes - St-Nazaire, Bordeaux et Dunkerque), soit avec une densité de 2, plus de 17 Mt/an.

2.3.4. Le comblement des estuaires

Les estuaires, à l'exception de celui de la Gironde, s'ensavent progressivement dans les zones latérales au chenal principal qui est lui, le plus souvent, dragué et stabilisé sur un tracé bien défini. On estime cet ensablement à environ 0,5 à 1 m/an (Alzieu, 1999).

Le volume du bouchon vaseux et de la crème de vase représentent 1 à 3 années d'apports de sédiments fluviaux et sont variables selon les estuaires (Etcheber et al., 2007) :

- 0,02 à 0,4 Mt/an pour la Seine ;
- 0,8 à 1 Mt pour la Loire ;
- 4 à 5 Mt pour la Gironde.

Les sédiments stockés dans les bouchons vaseux sont remobilisés en partie lors des événements exceptionnels (crues et grandes marées), ainsi l'estuaire de la Gironde, malgré un bouchon vaseux conséquent, s'ensave très peu du fait de l'export régulier des sédiments vers la mer. Avec un débit moyen de 650 m³/s, la Garonne exporte 1,86 Mt/an de MES. La Loire exporte quant à elle 0,86 Mt/an de MES au large avec son débit moyen de 931 m³/s. Cet export vers le large est beaucoup plus limité pour la Seine. La remobilisation des sédiments du bouchon vaseux, que ce soit dans l'estuaire de la Gironde ou dans celui de la Loire, a une influence à l'échelle régionale car les MES peuvent soit se déposer soit rester en suspension et être transportés par les courants marins vers le Pertuis d'Antioche pour les MES de la Garonne et vers la baie de Bourgneuf notamment pour les MES de la Loire.

Le bouchon vaseux, qui n'est de toute façon pas totalement remobilisé, est en partie dragué pour permettre l'accès aux grands ports de Rouen pour la Seine et de Nantes – Saint-Nazaire pour la Loire. Les volumes dragués en question sont exposés dans la partie précédente. Une grande partie de la crème de vase de l'estuaire de la Loire est remise en suspension pendant les marées de vives eaux. Il ne reste sur le fond que les sédiments ayant atteint une densité d'au moins 300 kg/m³ (Gallenne, 1974). Le marais Vernier, situé dans l'estuaire de la Seine, est alimenté par les sédiments fluviaux comme les plaines d'inondation et par les sédiments marins par la marée. Cette alimentation en sédiments à la fin de l'Holocène est estimée à 2,5 mm/an sur une superficie de 45 km², soit environ 112 000 t/an (Frouin et al., 2007) de sédiments auxquels il conviendrait aujourd'hui de retirer une part des apports fluviaux suite aux aménagements du bassin versant.

2.3.5. Conclusion sur le stockage de sédiments fins dans les systèmes fluviaux

Les aménagements depuis le XIX^{ème} siècle ont eu pour conséquence un "transfert" des dépôts sédimentaires des systèmes fluviaux depuis les plaines d'inondation qui sont maintenant appauvries vers les pièges à sédiments que sont les barrages et les ports.

De nos jours et malgré leur étendue, les plaines d'inondation ne stockent par an qu'environ 2,5 Mm³ de sédiments principalement fins, ce qui est un volume tout à fait comparable à celui de l'envasement annuel moyen des barrages sur le territoire français (2 Mm³ selon EDF).

Près d'1 Mm³ de sédiments fins sont dragués tous les ans sur le réseau fluvial (canaux et rivières navigables) pour permettre la navigation, chiffre qui devrait augmenter avec la construction de nouveaux canaux et l'augmentation des gabarits de bateaux navigants.

Enfin, près des 2/3 des sédiments stockés dans les systèmes fluviaux correspondent aux sédiments qui s'accumulent dans les grands ports fluviaux que sont Rouen, Nantes et Bordeaux (8,5 Mm³/an).

2.4. L'envasement des baies côtières

2.4.1. La dynamique naturelle

La dynamique naturelle des baies côtières conduit à leur comblement par les apports de sédiments fins marins et/ou fluviaux (cf. 1.2.4.7. de ce chapitre).

Sur la façade de la Manche, selon l'étude de Diluca (1975),

- il y a environ 750 000 m³ de sédiments qui s'accumulent par an dans la **baie de Somme**, dont environ le tiers dans les mollières qui sont composées à 70 % de sédiments fins, vaseux. Le volume de sédiments fins qui s'accumule dans le fond de la baie de Somme peut être estimé à environ 175 000 m³/an ;
- dans la **baie du Mont-Saint-Michel**, les sédiments transportés par la marée s'accumulent préférentiellement dans la partie Ouest de la baie sous forme d'un delta de marée (cf. 1.2.4.4.). En moyenne, à chaque marée, 60 000 m³ de MES subissent un transport en va-et-vient dans la baie et 3 % de ces sédiments "en transit" se déposent, représentant le stockage d'environ 2 000 m³ de sédiments, soit sur 1 an 1,42 Mm³ (Ehrhold, 1999). Parmi ces sédiments stockés dans la baie, environ 50 % correspondent à des sédiments fins de granulométrie inférieure à 50 µm (vase marine, tange silteuse ou tange vaseuse) (Figure 2-21), soit environ 700 000 m³/an de sédiments fins.

Sur la façade Atlantique, les différentes baies présentent des dynamiques contrastées :

- la **baie de Bourgneuf** dont la configuration est propice à l'accumulation de sédiments fins (Sanchez, 2008) est le siège d'un transit de MES variant entre 200 à 400 Mt/an. Environ 0,25 Mt de sédiments (principalement de sédiments fins) s'accumulent dans la baie par an soit environ 125 000 m³/an (densité de 2) (Grossel et al., 2001) ;
- le **bassin d'Arcachon** est une baie proche de l'état d'équilibre avec la dynamique actuelle entre la dynamique marine et le flux de MES apporté par le cours de l'Eyre (Bouchet et al., 1997) ;
- dans les **pertuis Breton et d'Antioche**, les estimations montrent un taux d'accumulation annuel de sédiments fins de près de 1,5 M m³/an (Weber, 2004). Ces sédiments se répartissent entre les deux tiers dans le pertuis breton répartis entre 750 000 m³/an dans l'Anse de l'Aiguillon, 170 000 m³/an dans le reste du pertuis Breton et 500 000 m³/an dans le pertuis d'Antioche. Ces

valeurs montrent le fort impact des apports littoraux car les masses de sédiments apportés par les deux cours d'eau qui se jettent dans le pertuis d'Antioche sont de l'ordre de 100 000 t/an (Charente et Seudre) (Weber, 2004). Le comblement du pertuis Breton est d'ailleurs la suite logique du comblement du marais poitevin par sa poldérisation et la canalisation des cours d'eau côtiers comme dans la baie du Mont-Saint-Michel.

Tout comme les systèmes fluviaux, le littoral français est en partie aménagé et la principale conséquence de ces aménagements est une perturbation des flux sédimentaires et un stockage de sédiments dans ces ouvrages ou lié à ces ouvrages, sujet qui est développé dans le sous-chapitre suivant. Les estimations des volumes de sédiments fins piégés dans les baies côtières, en s'appuyant sur les grandes baies présentées ci-dessus représente plus de 2,5 Mm³/an.

2.4.2. Impact des barrages littoraux

Comparés à l'activité portuaire, les barrages littoraux ne représentent qu'une partie infime des aménagements sur le littoral, mais ils modifient également la dynamique sédimentaire. Ces barrages peuvent avoir différentes utilités comme la production d'électricité pour le barrage de la Rance, la réduction des crues et la création d'une réserve en eau potable pour le barrage d'Arzal dans l'estuaire de la Vilaine ou la gestion des sédiments comme pour le barrage du Mont-Saint-Michel sur le Couesnon.

L'écroulement des crues et la gestion des réserves d'eau potable sont des enjeux importants dans de nombreuses régions.

- C'est le cas pour la région Bretagne et ce sont les principaux objectifs de la mise en service dans les années 70 du barrage d'Arzal dans l'estuaire de la Vilaine qui est le plus important fleuve de la Bretagne (bassin versant de 10 500 km² et un débit de 71 m³/s). La construction d'un tel ouvrage a des conséquences sur le transfert de sédiments et en particulier lorsqu'une baie est directement influencée par les apports conséquents d'un fleuve tel que la Loire par les courants de marée. L'Institution de l'Aménagement de la Vilaine (IAV) estime l'envasement de l'estuaire de la Vilaine à 22 Mm³ en tout. Cet envasement par des sédiments majoritairement fins est principalement dû à la diminution de 70 à 80 % du phénomène d'oscillation des sédiments causé par la marée et aux apports non négligeables des sédiments de la Loire. Les volumes de sédiments fins stockés sur la Vilaine (en prenant un taux d'accumulation constant) se situent autour de 0,5 Mm³/an.

Comme évoqué dans la partie 1.2.3.7. de ce chapitre, le barrage de l'usine marémotrice de la Rance amplifie la tendance naturelle de l'estuaire à la sédimentation.

- Sa construction a eu pour conséquence directe un envasement régulier de l'estuaire en particulier dans la partie amont de l'estuaire à Livet (proche de l'Ecluse du Chatelet) et à Morgrève. On estime l'envasement de la seule zone de Livet en amont de l'Ecluse du Chatelet (zone où l'envasement est relativement important) à 20 à 40 000 m³/an (Laguionie and Jigorel, 2008). D'autres parties de l'estuaire sont en érosion. Le bilan sédimentaire dans l'estuaire de la Rance est ainsi estimé entre 3 et 6 000 m³/an d'envasement soit, avec une densité de 2, 6 à 12 000 t/an de sédiments fins (Bonnot-Courtois et al., 2002).

Enfin, le barrage du Mont-Saint-Michel sur le Couesnon a pour principaux objectifs de réguler la cote du Couesnon et d'optimiser l'effet de chasse des sédiments dans son estuaire afin de le nettoyer de 570 000 m³ de sédiments qui l'encombrent et donc diminuer le comblement de la baie du Mont-Saint-Michel.

- La dynamique de l'estuaire du Couesnon n'a donc plus rien de naturelle et est totalement artificielle et contrôlée par ses exploitants. La perturbation de la dynamique sédimentaire est donc bien effective mais n'a pas d'incidence sur les volumes de sédiments stockés dans la baie, il s'agit juste d'un déplacement.

Les barrages littoraux ont ainsi un impact direct sur la dynamique sédimentaire de l'estuaire mais également sur celle de la baie estuarienne ouverte sur le large. Les sédiments en partie stockés par ce type d'ouvrages réduisent le volume des apports de MES d'origine fluviale vers le large. Les volumes stockés annuellement à partir des grands ouvrages présentés ci-dessus se montent à plus de 500 000 m³/an

2.4.3. L'envasement des ports maritimes

Comme évoqué précédemment avec les ports d'estuaires (cf. 2.3.4.), les ports maritimes sont des zones où peuvent s'accumuler de grandes quantités de sédiments. Le dragage de ces zones est une nécessité afin de maintenir une hauteur d'eau suffisante pour les transports maritimes et l'aménagement de nouvelles aires portuaires. En France, les sédiments issus du dragage des grands ports maritimes (Dunkerque, Calais, Boulogne, Le Havre, La Rochelle) représentent environ 6,2 Mm³/an (Alzieu, 1999) dont 80 % de vases, soit près de 5 Mm³ de sédiments fins par an. Les sédiments dragués dans les ports maritimes présentent un intérêt majeur dans l'évaluation du renouvellement de la ressource car les volumes sont très élevés.

Les ports de plaisance ainsi que les petits ports de pêche et abris de mouillage ne sont pas pris en compte dans cette étude car les dragages ne sont pas réguliers. Ils représentent cependant un volume important de dragage annuel autour de 20 Mm³ selon le rapport de la Fédération Française des Ports de Plaisance (FFPP, 2005). Il reste cependant à évaluer la proportion de matériaux fins dans ces sédiments.

2.5. Conclusion

L'évaluation quantitative de la vitesse d'accumulation des sédiments fins dans les différents milieux identifiés précédemment permet de proposer une estimation des contributions relatives des différentes sources. Les estimations sont plus ou moins précises selon les milieux et les résultats sont synthétisés dans la Figure 2-27 et le Tableau 4 :

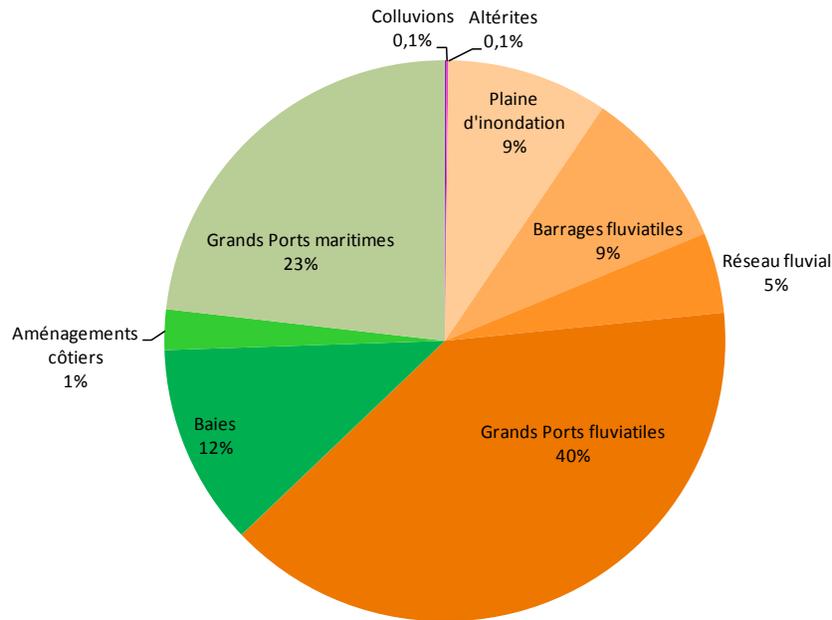


Figure 2-27 : Diagramme synthétique de répartition de la contribution des sources actives de sédiments fins sur le territoire français à partir des estimations faites au cours de cette thèse

(0,1 % signifie une activité de la source mais qui reste anecdotique ou difficile à quantifier - en rose, les atterrissements du régo-lite ; en orangé, ceux des systèmes fluviaux ; en vert, ceux des systèmes côtiers)

- La production d'altérites (R4) résulte d'un équilibre entre accumulation par altération et érosion des sols. Les incertitudes sur l'estimation de leur volume sont très grandes. Dans les conditions climatiques et d'usages des sols actuels, la tendance va plutôt dans le sens d'un équilibre entre la formation et l'érosion des altérites, le bilan est donc quasi nul. Nous avons choisi de le représenter avec une très faible valeur pour indiquer le processus ;
- les colluvions (R1) représentent des accumulations isolées dont l'occurrence et le volume sont difficiles à prédire. Cette source existe mais sa quantification reste très incertaine. Nous avons choisi de l'indiquer sur le diagramme synthétique avec une contribution très faible (<0,1 %) ;
- les zones de dépôts fluviaux (S1) ont été largement déplacées dans les zones aménagées (retenues de barrages, ports, canaux...) affaiblissant les plaines d'inondation et modifiant la dynamique des embouchures (endiguements, chenaux stabilisés). Comme le montre la Figure 2-27, ces dépôts représentent 63 % de la source actuelle dont 9 % pour les plaines d'inondation, 9 % pour les barrages, 40 % pour les ports et 5 % pour le réseau fluvial. Ce sont les sources les plus conséquentes ;

- les sédiments des baies côtières (S2), représentent également des volumes conséquents de sédiments fins qui s'accumulent en fond de baie, environ 12 % ;
- les systèmes littoraux (barrages et ports), assez dispersés le long de côtes sont de véritables pièges à sédiments qui représentent environ 24 % de l'accumulation totale de sédiments fins sur le territoire français.

Tableau 4 : Bilan de l'estimation de l'accumulation de sédiments fins dans les atterrissements en France

	Estimation du volume stocké (en Mm ³ /an)	Estimation en masse avec une densité de 2 pour les sédiments (Mt/an)
Colluvions	Evaluation difficile	
Altérites	Peu ou pas d'accumulation actuellement	
Systèmes fluviaux		
Plaines d'inondation	2,5	5
Barrages fluviaux	2	4
Réseau fluvial (canaux et rivières navigables)	1	2
Grands ports fluviaux	8,5	17
Systèmes côtiers		
Baies	2,5	5
Aménagements côtiers	0,5	1
Grands ports maritimes	5	10
<i>Total</i>	22	44

Les résultats de ces estimations, dont les incertitudes associées peuvent être conséquentes en fonction des milieux, représentent de larges volumes de sédiments fins, entre 20 et 25 Mm³/an (tous milieux confondus) en fonction des estimations d'EDF ou de celles proposées dans le cadre de cette thèse. La source de matériaux fins existe, se renouvelle, il faut maintenant aborder le troisième volet de cette estimation du caractère renouvelable de la ressource, les caractéristiques minéralogiques des dépôts de faible granulométrie.

3. Un Cadre Minéralogique de Référence (CMR) pour l'évaluation du renouvellement de la ressource

Cette partie représente le troisième volet de l'évaluation du caractère renouvelable de la ressource : la caractérisation des propriétés des sources en sédiments fins vis-à-vis des propriétés des mélanges industriels utilisés pour la production de briques et tuiles.

Les mélanges industriels de production sont classiquement caractérisés par des analyses géochimique et granulométrique, complétées par des tests physiques qui ont été présentés dans le premier chapitre (Chapitre 11.4.).

Dans notre démarche d'évaluation des caractéristiques de l'ensemble des atterrissements sur le territoire français, il n'est pas envisageable de conduire l'ensemble de ces tests sur tous les sites potentiels. Une méthode s'appuyant sur la minéralogie des composants principaux des matériaux a donc été développée en établissant un Cadre Minéralogique de Référence (CMR) permettant d'évaluer rapidement les qualités des sédiments à partir des assemblages des minéraux dominants. En effet, la minéralogie donne une vision d'ensemble des compositions chimiques et des propriétés physiques recherchées par l'industrie de la terre cuite.

Nous nous appuyons sur un jeu de 36 mélanges de production qui nous ont été fournis par le CTMNC et plusieurs industriels que nous tenons à remercier. Par souci de confidentialité, la provenance des mélanges n'est pas donnée dans cette étude.

Dans cette partie, après une présentation de l'approche géochimique classique utilisée dans l'industrie de la terre cuite, nous développons la méthodologie mise en place pour construire le Cadre Minéralogique de Référence.

3.1. L'approche classique de l'industrie de la terre cuite

La caractérisation des matériaux naturels et mélanges de production se fait classiquement à partir d'un groupe de trois analyses présentées dans le chapitre 1 et que nous rappelons ici :

des analyses géochimiques élémentaires représentées au CTMNC dans un diagramme d'Augustinik (Augustinik, 1957) ;

des analyses granulométriques représentées dans un diagramme ternaire de Winkler (Winkler, 1954) ;

des tests physiques pour évaluer le comportement céramique du mélange (teneur en eau de façonnage, proportion d'eau colloïdale et d'eau d'interposition, retrait au séchage et à la cuisson, résistance mécanique par flexion 3 points,...).

Dans cette partie, nous ne présentons que les résultats sur les analyses géochimiques qui nous permettront de discuter l'intérêt du CMR. Les résultats des analyses sont présentés dans l'annexe 5.2.

La projection des valeurs obtenues sur le diagramme d'Augustinik montre que les mélanges industriels pour la fabrication des briques se situent dans le domaine initialement défini (Augustinik, 1957), par contre, ceux des tuiles s'étendent sur une plage de valeurs beaucoup plus grande (Figure 2-28).

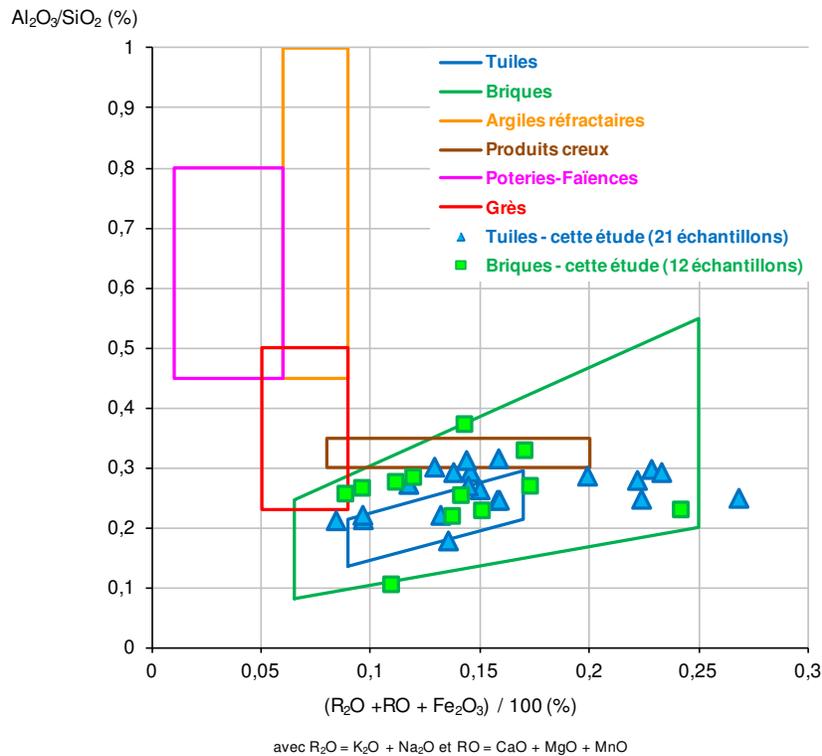


Figure 2-28 : Diagramme Augustinik et de Winkler des mélanges industriels

Les données de l'industrie française se caractérisent par des ratios Al_2O_3/SiO_2 qui ne montrent pas de différences significatives entre les mélanges de production de briques et de tuiles si ce n'est peut être un rapport Al_2O_3/SiO_2 légèrement plus resserré pour les mélanges "tuiles" (0,18 - 0,35) que pour ceux des "briques" (0,10 - 0,40). Par rapport aux domaines initialement définis, la teneur en éléments alcalins, alcalino-terreux et en oxydes de fer des mélanges de production de tuiles, sont beaucoup plus étendues (0,08 - 0,28) que celles initialement proposées par Augustinik (0,08 - 0,15). Les données des mélanges de production de briques ne montrent pas de différences significatives par rapport au diagramme initial.

Les résultats de l'analyse des mélanges de production étudiés ne montrent pas de différence très significative au niveau des analyses géochimiques entre les mélanges de production des briques et des tuiles, seul un ratio Al_2O_3/SiO_2 de plus faible dispersion est observé pour les mélanges de production des tuiles.

Comme indiqué précédemment, la caractérisation d'un matériau ne se limite pas à ce diagramme, c'est la distribution granulométrique et le façonnage qui permettront d'établir un diagnostic complet. Dans le cadre de cette étude, nous avons souhaité développer un outil de première caractérisation qui soit rapide et qui permette de proposer une première évaluation de la source étudiée. Ces mélanges de production serviront de référence.

3.2. Le Cadre minéralogique de Référence (CMR)

Dans une démarche d'évaluation du potentiel d'un atterrissement de matériaux fins comme source de matière première pour l'industrie de la terre cuite, la minéralogie d'un sédiment constitue un outil puissant qui permet de façon indirecte d'accéder à sa composition géochimique et à son comportement aux essais physiques, ouvrant la perspective d'une première caractérisation rapide par un seul type d'analyse.

Le cadre minéralogique de référence (CMR) a été construit à partir des analyses minéralogiques des 36 mélanges industriels de production fournis par le CTMNC ou directement par des industriels.

Les analyses minéralogiques ont été réalisées par la méthode de Diffraction de Rayons X (DRX) au Centre de Géosciences de MINES ParisTech. Les résultats obtenus comprennent d'une part, la composition minéralogique de la roche totale obtenue à partir de poudres orientées ; d'autre part, les assemblages de minéraux argileux obtenus sur la fraction inférieure à 2 µm après décarbonatation. Les incertitudes sur les résultats sont de 5 % pour les données en roche totale ou en minéraux argileux. Le protocole détaillé ainsi que les résultats de toutes les analyses sont présentés en Annexe 4.

3.2.1. La composition de la roche totale

La composition minéralogique des mélanges de production peut être définie en moyenne par 6 minéraux qui sont présents dans plus des deux tiers des échantillons (Tableau 5) : les minéraux argileux (40 %), le quartz (33 %) et quatre minéraux (21 %) répartis de manière relativement homogène entre la muscovite, le microcline, l'albite et la calcite. Les autres minéraux, qui constituent en moyenne 6 % des mélanges, se répartissent entre la chlorite (2 %) et des minéraux présents en moindres proportions (orthose, goethite, dolomite et hématite).

Tableau 5 : Composition minéralogique en Roche Totale de mélanges de production de tuiles et briques
(Fréq. = Fréquence ; Moy. = Moyenne ; Min. = Minimum ; Max. = Maximum ; ε = une fréquence du minéral < 2 %)

	Tous produits confondus					Tuiles			Briques		
	Fréq. (%N éch)	Moy. (%)	σ	Min. (%)	Max. (%)	Fréq. (%N éch)	Moy. (%)	σ	Fréq. (%N éch)	Moy. (%)	σ
<i>Minéraux présents dans au moins 2/3 des échantillons</i>											
Minéraux argileux	100	40	10	13	59	100	41	8	100	38	12
Quartz	100	34	9	17	62	100	33	7	100	35	11
Muscovite	97	7	3	0	16	96	6	3	100	9	4
Microcline	81	4	3	0	11	74	3	3	91	5	3
Albite	75	4	4	0	14	65	4	4	92	5	3
Calcite	67	5	7	0	32				77	5	6
Total		94					87			97	
<i>Minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons</i>											
Calcite						61	6	7			
Chlorite	31	2	3	0	9	30	2	3	31	2	3
Orthose	19	ε	3	0	8	26	2	3	8	ε	2
Goethite	28	ε	1	0	3	22	ε	1	38	ε	1
Dolomite	19	ε	1	0	17	26	ε	2	8	ε	0
Hématite	14	ε	1	0	5	17	ε	2	8	ε	1

Les compositions des mélanges de production de briques et de tuiles ne présentent pas de différences très nettes :

- les teneurs en quartz et minéraux argileux dominant dans les mélanges de production des deux types de produits. La large dispersion des valeurs de teneurs en minéraux argileux dans les mélanges de production et de leur teneur en quartz respectives suggèrent des variations granulométriques, une granulométrie plus fine étant généralement plus utilisée pour des mélanges "tuiles". Les écarts-types les plus petits sont pour les mélanges tuiles de 8 et 7 % respectivement pour les teneurs en minéraux argileux et en quartz alors qu'ils sont plus élevés pour les briques respectivement de 12 et 11 %. Ceci est en accord avec une plus grande flexibilité dans la granulométrie des mélanges de briques par rapport aux mélanges de tuiles ;
- les silicates, muscovites, microclines et albites correspondent à des produits de l'érosion de roches intrusives peu altérées. Leur proportion est en moyenne de 15 % et ne dépasse pas 19 %. Ce sont des éléments qui peuvent servir de dégraissants aux mélanges et que l'on retrouve en plus grande proportion dans les mélanges de briques ;
- la calcite, présente seulement dans 2/3 des mélanges de production, représente le plus souvent une proportion assez faible des minéraux (moyenne : 5 % pour un écart type de 7 %). La valeur maximum observée (23 % \pm 5 %) doit correspondre à un seuil au-dessus duquel elle peut présenter un risque d'apparition de grains de chaux au cours du temps sur les produits exposés aux intempéries (tuiles et briques de parement).

Les résultats de la composition minéralogique dominante des mélanges de production sont projetés dans deux diagrammes ternaires (Figure 2-29) dont les sommets sont définis par :

- diagramme ternaire A : les minéraux argileux (phyllosilicates), les silicates et la calcite ;
- diagramme ternaire B : les minéraux argileux, le quartz et les autres silicates (muscovite, microcline et albite).

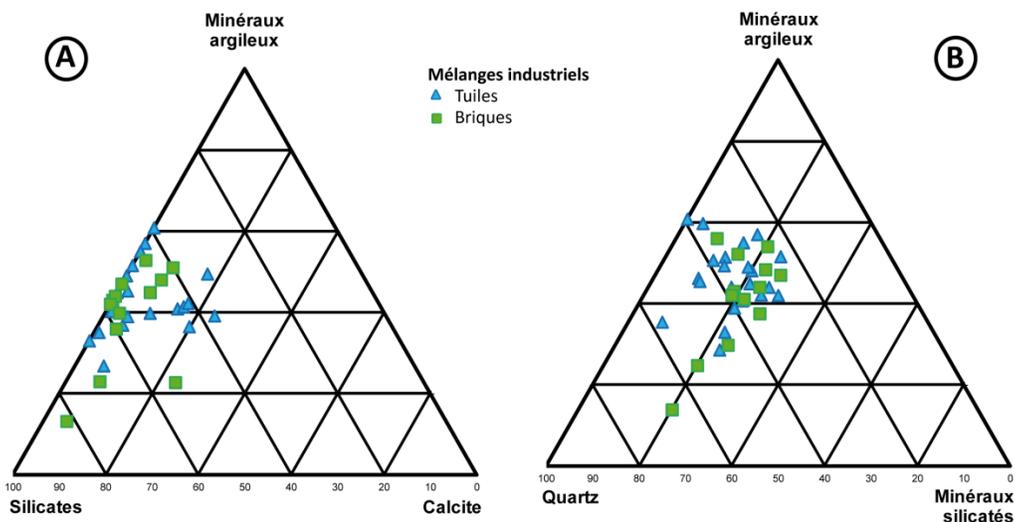


Figure 2-29 : Diagrammes Ternaires illustrant la composition minéralogique des mélanges industriels. A) référentiel : Minéraux argileux, Silicates et Calcite ; B) référentiel : Minéraux argileux, Quartz et Silicates

La projection des compositions minéralogiques en roche totale dans chacun des deux diagrammes montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les mélanges de production "briques" et les mélanges de production "tuiles"; les données se regroupent dans des domaines assez bien définis (Figure 2-29).

- le premier diagramme ternaire (Figure 2-29-A) montre que la proportion en calcite est inférieure à 25 % quand on ne prend en compte que les principaux minéraux constitutifs (argiles, silicates et calcites). Par ailleurs, environ un tiers des échantillons ne contient pas de calcite. En effet, comme évoqué précédemment, au-delà de cette proportion, les risques d'efflorescences et d'apparition de grains de chaux sont trop élevés. On observe un équilibre relatif entre les silicates (40-60 %) et les argiles (35-55 %).
- le second diagramme (Figure 2-29-B) permet de voir que la large proportion de silicates contenue dans les mélanges de production soulignée par le diagramme précédent est principalement portée par la proportion de quartz (20-40 % des minéraux pris en compte dans ce diagramme pour seulement 10-30 % pour les minéraux silicatés). La proportion d'argiles reste conséquente entre 40 et 60 % du mélange.

La faible dispersion des points sur certains diagrammes souligne l'existence d'une composition relativement bien définie alors que pour d'autres, les mélanges peuvent présenter une variabilité plus grande. La teneur en minéraux argileux au-dessus de 15 % semble indispensable. De manière générale, une teneur en minéraux argileux entre 40 et 60 % semble assurer une compatibilité avec la production de tuiles et briques. La proportion équilibrée entre la teneur en minéraux argileux et celle en quartz favorise cette compatibilité. La présence de calcite, non indispensable pour un produit en terre cuite, voire parfois néfaste, ne dépasse pas les 25 %.

3.2.2. Les assemblages de phyllosilicates

Les analyses sur lames orientées après séparation de la fraction fine inférieure à 2 μm permettent une détermination des différents minéraux argileux présents dans le mélange. La composition en minéraux argileux des mélanges de production tuiles et briques est représentée dans le Tableau 6 (les données détaillées sont fournies dans l'annexe 4.3).

Quatre minéraux argileux sont présents dans près de deux tiers des échantillons : la kaolinite (34 % en moyenne), l'illite (22 % en moyenne), la smectite et les interstratifiés illite-smectite (I/S) avec des valeurs moyennes respectives de 16 et 13 %.

Les 15 % restants correspondent à des minéraux argileux dont la teneur moyenne varie autour de 5 % : la chlorite, les interstratifiés chlorite-smectite (C/S) et kaolinite-smectite (K/S).

Tableau 6 : Composition en Minéraux Argileux de mélanges de Production de tuiles et briques
(Fréq. = Fréquence ; Moy. = Moyenne ; Min. = Minimum ; Max. = Maximum)

	Tous produits confondus					Tuiles			Briques		
	Fréq. (%N éch.)	Moy. (%)	σ	Min. (%)	Max. (%)	Fréq. (%N éch.)	Moy. (%)	σ	Fréq. (%N éch.)	Moy. (%)	σ
<i>Minéraux présents dans près de 2/3 des échantillons</i>											
Kaolinite	97	35	22	0	80	96	32	19	100	41	27
Illite	97	23	13	0	60	96	25	11	100	21	15
Smectite	67	13	13	0	40	-	-	-	77	17	11
Interstratifiés I/S	-	-	-	-	-	78	21	15	-	-	-
<i>Minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons</i>											
Interstratifiés I/S	64	17	15	0	45	-	-	-	38	9	13
Chlorite	47	5	8	0	25	52	5	7	38	6	9
Interstratifiés C/S	14	3	6	0	25	9	2	5	23	4	8
Interstratifiés K/S	8	4	17	0	100	4	4	21	8	2	8
Smectite	-	-	-	-	-	61	11	11	-	-	-

L'identification de quatre minéraux dominant les assemblages en minéraux argileux nous permet de les présenter dans deux diagrammes ternaires (Figure 2-30) dont les sommets sont définis par :

- diagramme ternaire A : kaolinite, illite et argiles gonflantes (regroupement des smectites et interstratifiés illite/smectites) ;
- diagramme ternaire B : kaolinite et illite sont regroupés en un pôle kaolinite/illite, argiles gonflantes (smectite et interstratifiés illite/smectite) et chlorite.

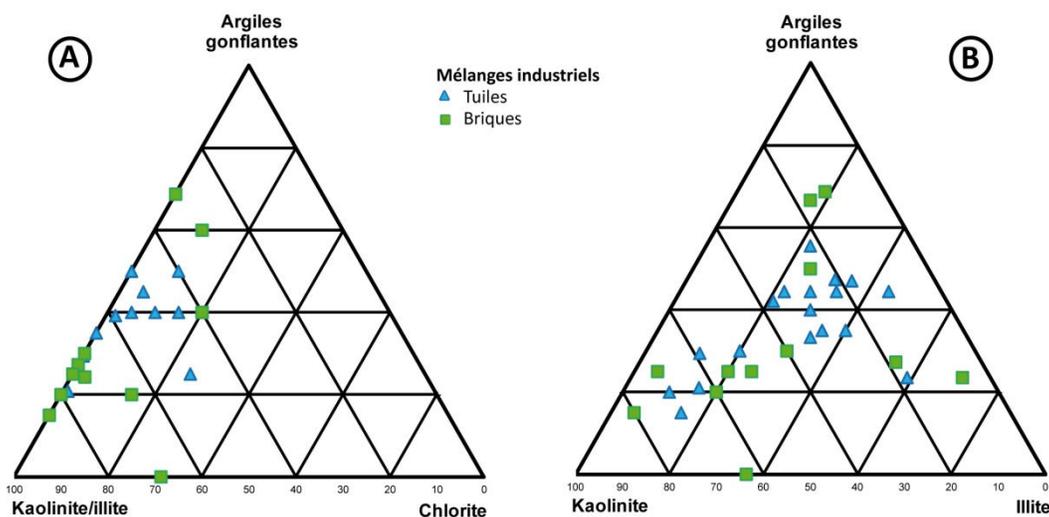


Figure 2-30 : Diagrammes Ternaires des phyllosilicates des mélanges de production A) référentiel : kaolinite, illite, argiles gonflantes ; B) référentiel : kaolinite/illite, argiles gonflantes, chlorite.

La projection des données des assemblages des minéraux argileux montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les mélanges de production "briques" et les mélanges de production "tuiles".

- le premier diagramme (Figure 2-30.A) montre des points dispersés suggérant une hétérogénéité de compositions des principaux minéraux présents dans la fraction <2 µm des mélanges de production. Il montre que des proportions variables de ces minéraux argileux sont compatibles avec la production de tuiles et de briques. La kaolinite, qui apporte des propriétés plastiques au mélange, est présente dans des proportions très variables, avec un écart type de 22 % et des valeurs entre 10 et 80 %. L'illite, qui apporte des propriétés fondantes et plastiques, est observée dans des proportions plus restreintes (entre 15 et 40 %). Enfin, les argiles gonflantes (smectites et interstratifiés illite/smectite), apportant des propriétés gonflantes aux mélanges pouvant être néfastes, varient dans de proportions très grandes. En effet, en trop grande proportion le dégonflement de ces argiles lors du séchage et de la cuisson demande des précautions particulières pour éviter les fêlures des produits qui commencent à indurer.
- Le second diagramme (Figure 2-30.B) montre que la proportion de chlorite dans les mélanges est faible (inférieure à 20 %) avec de nombreux échantillons ne contenant pas de chlorite. La chlorite, aux propriétés glissantes, diminue la cohésion des mélanges ce qui explique qu'elle soit peu présente et souvent en faibles proportions.

L'analyse de ces deux diagrammes montre que ce sont les minéraux argileux pôles du premier diagramme ternaire qui constituent la plus grande partie des mélanges. Les proportions relatives entre les teneurs en kaolinite, illite et argiles gonflantes sont très hétérogènes et dispersées. La caractérisation de la chlorite reste un élément intéressant car sa présence peut altérer la qualité des mélanges avec ses propriétés glissantes qui diminuent leur cohésion du mélange et ne doit donc pas dépasser les 20 %.

3.2.3. Application et perspectives

Le faible nombre de minéraux et phyllosilicates dans les mélanges de production a permis la réalisation d'un Cadre Minéralogique de Référence qui s'appuie sur un ensemble de quatre diagrammes ternaires. Deux d'entre eux (Figure 2-29-B et Figure 2-30-B) décrivent les minéraux principaux des mélanges, les deux autres des minéraux annexes (calcite et chlorite) dont les proportions doivent rester en-dessous de certains seuils afin de ne pas affecter les propriétés des mélanges.

L'introduction de ce CMR dans les études de reconnaissance minéralogique de sources actuelles de matériaux argileux permettra, à partir d'un jeu d'analyses, une première évaluation conjointe de la composition chimique et des propriétés physiques des sédiments fins des atterrissements naturels ou anthropiques.

La caractérisation de la composition minéralogique, roche totale et minéraux argileux, devient ainsi une méthode rapide d'évaluation du potentiel de valorisation d'un atterrissement de matériaux fins dans l'industrie de la terre cuite. Elle est en effet indispensable à la compréhension des propriétés de plasticité, de façonnage, de séchage et de cuisson de la matière.

4. Conclusions

Ce chapitre nous conduit à apporter une réponse partielle à la question du caractère renouvelable de la ressource en matériaux argileux. Nous avons pu

- identifier les zones d'accumulation ;
- évaluer les volumes annuels de la part de sédiments fins dans ces atterrissements ;
- et construire un cadre de référence minéralogique (CMR).

Les milieux dans lesquels des sédiments s'accumulent de façon notable correspondent aux environnements associés aux systèmes fluviaux et aux dépôts côtiers. Ces milieux sont fortement anthropisés et l'on observe un déplacement des zones de dépôt.

Parmi les formations fossiles actuellement exploitées par l'industrie,

- **les loëss et les terrasses alluviales** ne se renouvellent pas car les processus qui contrôlent leur formation s'exercent en période glaciaire. D'après les résultats des modélisations, la prochaine période glaciaire ne se produira pas avant 60 000 ans dans le meilleur des scénarii. Tout renouvellement de ces ressources fossiles est donc à écarter à l'échelle de temps qui nous intéresse ;
- **les colluvions** relèvent de processus très ponctuels dont il est difficile de prédire les zones de formation, le volume de matériel impliqué et la fréquence. Bien que ce processus soit effectif, toute quantification du taux d'accumulation est difficile ;
- **les altérites**, se produisent dans les conditions climatiques actuelles mais leur accumulation est en compétition avec l'érosion hydrique. Le bilan actuel, auquel sont associées de nombreuses incertitudes, paraît nul voire négatif, du fait des pratiques agricoles qui favorisent la disparition du couvert végétal. Bien que des altérites se forment, leur potentiel de préservation est très faible ;
- **les systèmes fluviaux** présentent un large transfert des milieux de dépôts depuis leurs importants aménagements à partir du XIX^{ème} siècle. De nouveaux atterrissements en amont des ouvrages hydrauliques (barrages, écluses...) sont créés au détriment des plaines d'inondation qui sont appauvries en sédiments. Le réseau fluvial (canaux et rivières navigables) constitue une faible part des sédiments qui s'accumulent sur le territoire mais représente une source pérenne et régulière de sédiments puisque leur dragage est systématique pour permettre la navigation. Cependant, ce sont les grands ports fluviaux qui présentent les taux d'accumulation les plus importants non seulement au sein des systèmes fluviaux mais aussi tous systèmes confondus ;
- **les systèmes côtiers** représentent quant à eux plus du tiers des taux d'accumulation de sédiments sur le territoire dont les deux tiers sont assurés par les grands ports maritimes.

Toutes sources de sédiments fins confondues, sur le territoire français, il s'agit de plus de 20 à 25 Mm³ de sédiments qui s'accumulent par an dont plus de 80 % dans des atterrissements créés par l'homme (soit environ 40 à 50 Mt avec une densité de 2) (Figure 2-27).

Afin de pouvoir caractériser efficacement des atterrissements d'argiles pour envisager une valorisation dans l'industrie de la terre cuite, nous avons développé une méthode s'appuyant sur la composition minéralogique des sédiments à partir **d'un cadre minéralogique de référence (CMR)** à la fois sur roche totale et sur l'assemblage des minéraux argileux.

Ce CMR a été mis en place à partir de 36 échantillons de mélanges de production industrielle fournis par les grands groupes industriels français. Il fait ressortir la présence de trois groupes de minéraux : phyllosilicates, quartz et autres silicates (mica et feldspath), avec en proportion moindre de la calcite. Les assemblages argileux montrent plus de variabilité dans les proportions mais restent composés de trois minéraux principaux : kaolinite, illite et argiles gonflantes (Smectite et interstratifiés Illite/Smectite).

La minéralogie apporte des informations sur les propriétés du matériel vis-à-vis d'une utilisation dans l'industrie de la terre cuite. Certaines de ces informations pouvaient être obtenues par plusieurs analyses qu'il fallait croiser pour analyser les mélanges de production. L'outil "Cadre Minéralogique de Référence" constitue un outil puissant de caractérisation des matières premières pour l'industrie de la terre cuite.

Cette caractérisation des zones et volumes de la source en matériaux fins sera utilisée dans le chapitre suivant pour définir les systèmes pilotes qui feront l'objet d'une caractérisation de leurs propriétés minéralogiques à partir du CMR et selon la procédure classique de l'industrie de la terre cuite afin de valider la méthodologie développée au cours de ce travail.

Chapitre 3

Evaluation de la ressource Apports du Cadre Minéralogique de Référence à l'étude des principaux sites d'atterrissements actuels

Dans le chapitre précédent, l'évaluation présentée des zones d'atterrissement actuelles, qu'elles soient naturelles ou anthropiques, ainsi que des volumes de sédiments accumulés dans celles-ci a permis d'estimer le renouvellement de la source en matériaux fins d'un point de vue quantitatif. Cette évaluation en termes de taux de renouvellement et de volume doit être complétée par une analyse de la composition et des propriétés des sédiments pour évaluer s'ils répondent aux exigences des industriels.

Après avoir présenté la stratégie de sélection des sites pilotes étudiés qualitativement, nous présenterons d'une part les résultats des analyses minéralogiques des sédiments de ces atterrissements dans le cadre du CMR (Cadre Minéralogique de Référence présenté dans le chapitre 2), puis d'autre part, leurs résultats d'analyses par l'approche classique de l'industrie de la terre cuite (analyse géochimique et essais matériaux) avant de confronter les deux approches.

1. Choix des sites pilotes et stratégie d'échantillonnage

La caractérisation des sédiments des atterrissements peut être effectuée au sein de systèmes de tailles très différentes, allant d'un large bassin versant à des baies de surface restreinte. Compte tenu de l'hétérogénéité fréquente des formations géologiques qui sont érodées au sein d'un bassin versant, de la variabilité dans la nature des particules alimentant les baies, la nature des sédiments piégés dans les différents atterrissements répartis le long des cours d'eau ou des littoraux peut varier en fonction des apports.

1.1. Les sites pilotes

Dans le cadre de cette thèse, il n'était pas envisageable d'analyser l'ensemble des atterrissements situés sur le territoire français. Nous avons choisi de retenir plusieurs sites pilotes dans des systèmes répondant aux critères suivants :

- un **taux d'érosion suffisamment élevé** pour alimenter les zones d'atterrissement ;
- un **taux d'aménagement notable**, que ce soit en domaine fluvial ou côtier, constituant de véritables pièges à sédiments ;
- des **formations géologiques contrastées** afin d'évaluer l'impact de la minéralogie de la zone source sur celle des matériaux fins qui s'accumulent dans les atterrissements.

Neuf systèmes sédimentaires ont été sélectionnés dans le cadre de cette thèse parmi les systèmes fluviaux, estuariens et côtiers répondant aux critères évoqués ci-dessus :

- des systèmes fluviaux
 - le **bassin versant de la Durance** qui est soumis au plus fort taux d'érosion observé en France et comprend à la fois des roches intrusives et une large couverture sédimentaire. De plus, c'est un cours d'eau fortement aménagé, avec plus de 17 barrages ;
 - le **bassin versant de la Seine** qui présente des caractéristiques géologiques et d'aménagement comparables à celles de la Durance : un bassin versant largement sédimentaire avec une zone de roches intrusives ; des aménagements allant des barrages aux ports avec de nombreuses voies navigables ;

- le **bassin versant en rive droite de la Garonne**, système fluvial de très grande taille, qui est en partie aménagé. Il présente des zones avec des taux d'érosion relativement importants et des formations géologiques variées, notamment des formations volcaniques.
- Des estuaires aménagés
 - L'estuaire de la Seine, qui est fortement aménagé pour les activités portuaires des Grands Ports Maritimes du Havre et de Rouen ;
- Des baies côtières estuariennes
 - les **baies de Somme** et du **Mont-Saint-Michel**, baies naturelles qui ont tendance à se combler par des apports sédimentaires principalement marins ;
 - l'**estuaire de la Rance**, qui a lui aussi tendance à se combler suite à l'installation de l'usine marémotrice, mais pour lequel la pérennité de la production électrique de l'usine marémotrice impose une gestion de cet envasement ;
 - le **bassin d'Arcachon**, seule baie du bassin aquitain qui n'a pas été refermée grâce aux apports fluviaux dont elle bénéficie ;
 - les **pertuis charentais (pertuis Breton et d'Antioche)**, d'importantes zones d'accumulation naturelle de sédiments sur le littoral, dans lesquelles les apports sédimentaires sont variés entre les transferts par dérive littorale (apports fluviaux de la Loire et de la Gironde), les sédiments fluviaux plus locaux avec des particules d'origines contrastées (socle des massifs Armoricaïn et Central ou couverture sédimentaire du bassin aquitain).

Ces trois grands types d'environnement contribuent quantitativement le plus au renouvellement de la source en matériaux fins. Les données des sites analysés sont d'abord comparées au CMR afin d'évaluer qualitativement si l'on peut les qualifier directement pour un renouvellement de la ressource. Ensuite nous présentons les résultats de la démarche classique utilisée dans l'industrie de la terre cuite (analyse géochimique et essais matériaux), pour terminer sur une quantification du renouvellement de la ressource.

1.2. La stratégie d'échantillonnage

Les campagnes d'échantillonnages réalisées au cours de cette thèse sur l'ensemble des sites pilotes choisis ont fait l'objet de stratégies d'échantillonnage différentes, l'objectif principal étant de caractériser l'hétérogénéité des sédiments au sein d'un bassin versant, d'une baie côtière et pour ces dernières de comprendre les interactions entre apports fluviaux et dérive littorale.

Les stratégies retenues sont détaillées pour les trois grands ensembles retenus : les cours d'eau, les baies côtières et les ports maritimes.

1.2.1. Echantillonnage le long d'un cours d'eau

Dans les systèmes fluviaux possédant un large bassin versant, l'hétérogénéité des formations géologiques drainées peut être importante (présence de roches sédimentaires, métamorphiques, intrusives ou volcaniques) et, en fonction des apports des différents affluents, contribuer à des mélanges dont la signature minéralogique et géochimique évolue au fil des confluences.

La contribution relative de chaque affluent dépend des débits relatifs et des concentrations en MES à la confluence de l'affluent et du cours principal.

Le long d'un cours d'eau, un échantillonnage systématique des sédiments fins est réalisé au niveau des confluences afin de caractériser les apports relatifs des différents affluents et ainsi caractériser la contribution relative des sédiments provenant de formations géologiques variées. L'échantillonnage est alors ciblé pour des analyses minéralogiques et géochimiques (prélèvements de l'ordre de 200 à 500 g). Les prélèvements sont effectués dans des dépôts fins laissés par les dernières crues. Deux échantillons sont prélevés sur le cours d'eau principal en amont et en aval de la confluence et un troisième sur l'affluent comme présenté dans la Figure 3-1. Cet échantillonnage a pour objectif d'évaluer le potentiel des sédiments d'un bassin versant pour une utilisation dans l'industrie de la terre cuite.

Cette stratégie a été appliquée au cours de la Durance qui est fortement aménagé tout au long de son tracé qui traverse des formations géologiques de nature contrastée : roches intrusives dans la zone amont, couverture sédimentaire carbonatée, puis riche en argiles et grès. Les résultats sont présentés dans le sous-chapitre 2.2.1.

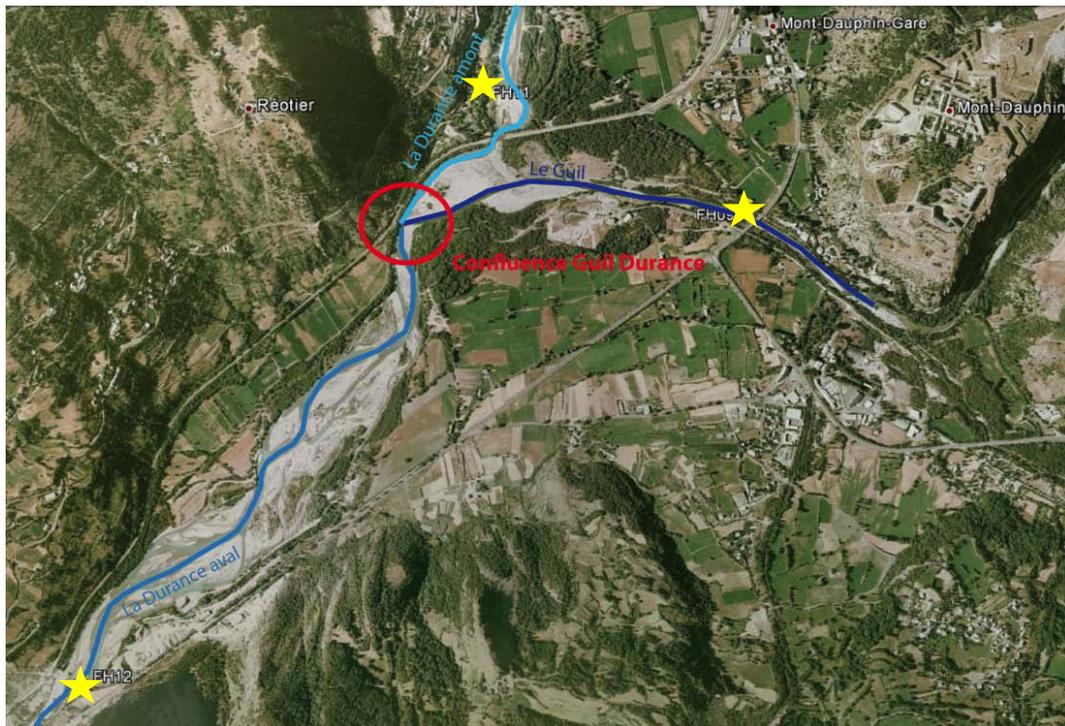


Figure 3-1 : Exemple d'une confluence entre deux cours d'eau (ici, la Durance et le Guil) échantillonnée afin de caractériser leur contribution relative en sédiments.
(étoiles = points de prélèvements)

1.2.2. Echantillonnage dans les atterrissements

Dans les atterrissements fluviaux préalablement identifiés comme favorables du fait de leur volume, le prélèvement d'une vingtaine de kilogrammes de sédiments est réalisé lorsque les conditions techniques sont favorables, c'est-à-dire lors du bas niveau d'eau de la retenue. Le volume prélevé est considéré comme représentatif de l'atterrissement et sera utilisé pour les analyses minéralogiques et géochimiques ainsi que pour les essais matériaux dans le cadre de la validation de la méthode CMR.

Nous avons choisi de réaliser des prélèvements dans les lacs de retenues dans les zones où les sédiments sont les plus fins, soit dans la partie centrale du lac de réservoir lorsque cela a été possible. Lorsque ce n'était pas possible, nous avons prélevé le plus loin possible des sources de matériel grossier.

Nous avons bénéficié d'un prélèvement par bennes dans le bassin de décantation de Cadarache et tenons à remercier EDF (François Théry) d'avoir mis à notre disposition un volume conséquent de sédiments (40 kg). De même EDF (GEH Lot-Truyère et particulièrement Pierre Mousque, Wilfrid Presle et Guilhem Vuarand que nous remercions) nous a accordés un accès privilégié à la retenue de Grandval sur la Truyère lors d'une diminution exceptionnelle du niveau d'eau et à celle de Sarrans sur la Truyère lors d'une mise à sec totale pour des travaux de maintenance.

La gestion de l'écrêtement des crues dans le bassin versant de la Seine impose à l'Etablissement Public Territorial du Bassin (EPTB) Seine Grands Lacs de baisser annuellement les niveaux d'eau des lacs réservoirs du bassin de la Seine. Nous avons donc profité des périodes de plus bas niveau d'eau annoncées par l'EPTB Seine Grands Lacs pour réaliser nos prélèvements.

Vendée-Eau, l'organisme public de gestion de l'eau en Vendée (Elodie Philippe, puis Brigitte Benatier), nous a permis d'échantillonner les sédiments des lacs de retenue de l'Angle Guignard, de Graon, du Marillet, de Rochereau et de la Vouraie et le Conseil Général de la Charente ceux des barrages de Mas Chaban et Lavaud.

1.2.3. Echantillonnage des baies et des réseaux fluviaux qui les alimentent

Les baies côtières et les systèmes fluviaux qui les alimentent sont échantillonnés en différents points. Là encore, le long des systèmes fluviaux les prélèvements comprennent des échantillonnages pour la minéralogie et la géochimie, complétés dans les atterrissements de large volume par des prélèvements de quelques dizaines de kilogrammes pour les essais matériaux. Dans les baies, les prélèvements sont suffisamment conséquents pour permettre l'ensemble des analyses et essais.

L'alimentation en sédiments d'une baie peut être complexe. Comme expliqué dans le chapitre 2, les apports sédimentaires d'une baie peuvent être essentiellement marins, liés aux courants de marée ou de dérive littorale, ou comporter une part fluviale conséquente lorsqu'un ou plusieurs cours d'eau se jettent dans la baie.

Dans les baies, l'échantillonnage à marée basse est privilégié car il permet l'accès à l'estran, aux zones abritées favorisant une sédimentation fine que ce soit dans la baie ou les estuaires des fleuves côtiers lorsqu'ils existent. Dans les zones où des terres ont été gagnées sur le domaine marin par la construction de digues, couramment appelées polders, nous avons également échantillonné celles-ci. Les échantillons

prélevés nous donnent accès à une signature minéralogique plus ancienne des apports sédimentaires, mais datée par la construction des digues. Cette signature peut être utile pour comprendre l'évolution des apports sédimentaires sur les derniers siècles. L'échantillonnage des sédiments des cours d'eau qui se jettent dans une baie a été conduit de façon similaire à celle décrite auparavant pour les systèmes fluviaux et les retenues qui jalonnent leur parcours.

Cet échantillonnage a été conduit dans les grandes baies des façades de la Manche et de l'Atlantique : baie de Somme, baie du Mont-Saint-Michel, pertuis Breton et d'Antioche et bassin d'Arcachon. Les polders ont été échantillonnés en baie du Mont-Saint-Michel et dans le pertuis Breton ; les cours d'eau dans le pertuis Breton (Lay et Sèvre Niortaise), le pertuis d'Antioche (Seudre et Charente) et le bassin d'Arcachon (Eyre). Compte tenu de la nature de son alimentation en sédiments, l'estuaire de la Rance a aussi été échantillonné comme une baie.

1.2.4. Echantillonnage des sédiments issus de dragages portuaires

Les grands ports français sont amenés à effectuer régulièrement des dragages d'entretien de leur chenal d'accès ainsi que des zones de l'avant port et des installations portuaires. Etant donné l'activité portuaire et les profondeurs auxquelles les prélèvements sont effectués, nous ne pouvons assurer ces prélèvements.

Nous remercions le service Chenal et Aides à la Navigation du Grand Port Maritime de Rouen (Patrice Tournier) et le service Accès et Environnement Maritime du Grand Port Maritime du Havre (Sébastien Brasselet) qui nous ont fournis chacun plusieurs échantillons prélevés lors de dragages courant d'entretien. Ces échantillons qui représentent chacun quelques dizaines de kilos permettent d'envisager une gamme complète d'analyses et essais.

1.3. Conclusion

Ces différentes stratégies d'échantillonnage nous permettent d'aborder la phase d'analyse et d'essais avec des matériaux provenant d'atterrissements appartenant à l'ensemble des grands domaines identifiés dans le chapitre 2. Les études minéralogiques pourront être conduites sur l'ensemble des échantillons alors que les essais laboratoire ne pourront l'être que sur les 56 échantillons pour lesquels nous possédons des volumes de matière suffisants (Liste des échantillons en Annexe 3).

2. Evaluation des atterrissements à l'aide du CMR

2.1. Les atterrissements fluviaux et côtiers

Dans un premier temps, nous présentons une projection des données minéralogiques de l'ensemble des échantillons prélevés sur les diagrammes ternaires du CMR. Trois grands ensembles y sont distingués en fonction des milieux de dépôt :

- les systèmes fluviaux ;
- les baies côtières estuariennes ;
- les ports maritimes dans les estuaires.

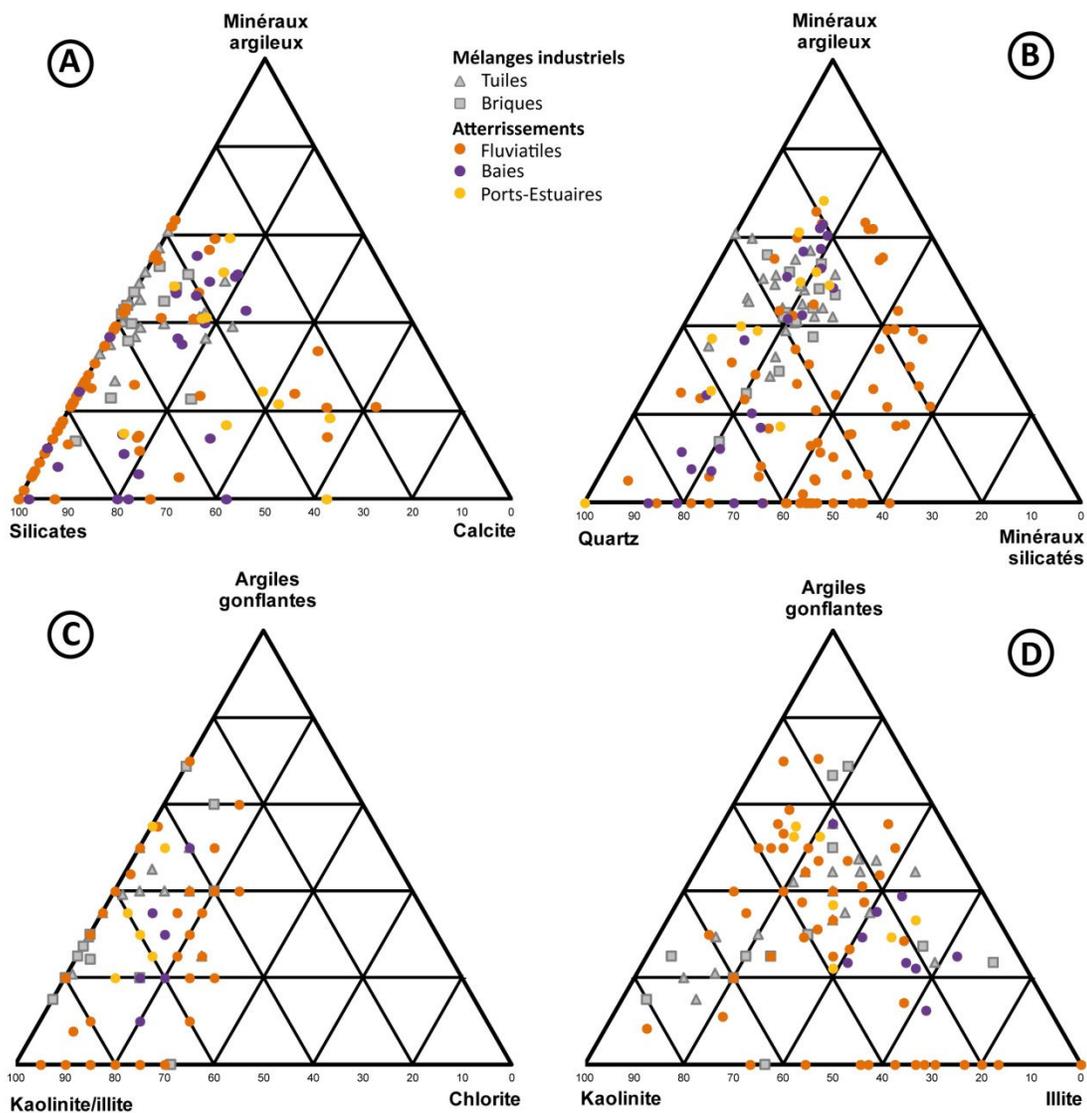


Figure 3-2 : Cadre Minéralogique de Référence (CMR) et données des milieux fluviaux, ports maritimes et estuaires et baies côtières. (détails sur les légendes A et B Fig. 29-A/B et C et D Fig. 30-A/B).

Leurs compositions minéralogiques et les assemblages de minéraux argileux sont représentés dans les diagrammes ternaires du CMR afin de pouvoir les confronter aux données industrielles (Figure 3-2). Les résultats complets sont reportés dans l'Annexe 4.

La projection des données minéralogiques roche totale, montre une forte dispersion essentiellement due aux sédiments des systèmes fluviaux et des ports maritimes et estuaires, les données issues des baies étant plus homogènes.

- La minéralogie des sédiments des **systèmes fluviaux** indique une très grande variabilité dans leur teneur en calcite, allant de l'absence du minéral (+ de 50 % des échantillons) à des valeurs proches de 60 % (Figure 3-2-A). Des tendances similaires mais moins marquées sont observées sur la distribution des données par rapport aux pôles Minéraux argileux et Silicates. Il convient de noter que peu de sites échantillonnés se trouvent projetés dans le domaine défini par les échantillons industriels. Nous retrouvons cette distribution sur le diagramme dans lequel le quartz est sorti du regroupement des silicates (Figure 3-2-B). Sur ce diagramme, les échantillons fluviaux présentent des valeurs en minéraux silicatés (albite, microcline et orthose pour les feldspaths auxquels s'ajoutent les muscovites et chlorites) nettement plus élevées que celles des échantillons industriels. Les assemblages de minéraux argileux indiquent également une très grande variabilité en ce qui concerne les teneurs en argiles gonflantes et en chlorite (Figure 3-2-C) ainsi qu'en illite (Figure 3-2-D) ;
- les sédiments prélevés dans les **baies côtières et estuariennes** présentent les compositions minéralogiques les plus proches de celles des mélanges industriels. On note cependant des teneurs en silicates un peu fortes qui sont liées aux valeurs en quartz. On retrouve des caractéristiques proches pour les assemblages de minéraux argileux avec toutefois des teneurs en illite un peu fortes ;
- les données minéralogiques des sédiments des **ports maritimes** montrent elles aussi une grande diversité de teneur en calcite (Figure 3-2-A) alors que les valeurs en minéraux argileux, quartz et minéraux silicatés (Figure 3-2-B) sont assez proches de celles des mélanges industriels. De même, les assemblages de minéraux argileux sont tout à fait acceptables (Figure 3-2-C et D).

Cette grande variabilité reflète l'influence des sources sur la composition des sédiments et sera discutée en détail dans les paragraphes qui suivent. Les fortes valeurs en calcite des sédiments fluviaux sont à relier à des sédiments provenant de couvertures sédimentaires essentiellement constituées de roches carbonatées ; les faibles à très faibles valeurs à des zones comportant des roches intrusives ou volcaniques. De même, les teneurs élevées en minéraux silicatés traduisent la proximité de zones de socle et des sédiments peu évolués suite à une érosion essentiellement mécanique. Cet effet local est dilué le long du cours d'eau par les apports des différents affluents, ce qui explique les valeurs moins contrastées des sédiments provenant des ports maritimes et des estuaires. Seuls les contrastes en teneur en carbonates subsistent. Les données des baies reflètent des mélanges plus complexes entre sédiments d'origine fluviale et marine, mélanges qui conduisent à des valeurs relativement proches de celles des mélanges industriels.

Les compositions minéralogiques en roche totale et les assemblages de minéraux argileux semblent pour une majorité des échantillons prélevés dans le cadre de cette thèse proches des valeurs industrielles du CMR. Cependant, une partie des sédiments des systèmes fluviaux présente des compositions avec des teneurs très élevées en calcite, en minéraux silicatés, en chlorites et/ou en illites.

Dans les parties suivantes, nous abordons successivement, pour chacun des milieux sédimentaires retenus, l'influence de la dynamique sédimentaire et de l'hétérogénéité des formations géologiques sur la minéralogie des atterrissements.

2.2. Evolution de la composition des sédiments le long de cours d'eau drainant des formations géologiques contrastées

Nous proposons d'illustrer l'influence de la minéralogie des zones sources sur la composition des sédiments piégés dans les atterrissements. Les trois bassins versants retenus, ceux de la Durance, de la Seine et de la Garonne (partie drainant le Massif Central) présentent un large panel de roches sédimentaires (calcaires, argiles, grès) et de roches intrusives (granite), volcaniques ou métamorphiques.

Le cours de la Durance a fait l'objet d'une étude détaillée car il se trouve dans une des zones d'érosion maximale en France. Les études sur le cours de la Seine et une partie du bassin versant de la Garonne illustrent les effets de mélanges en fonction des apports des affluents respectifs.

2.2.1. La Durance, un bassin versant pilote

La **Durance** est le 2^{ème} plus grand affluent du Rhône. Elle parcourt 390 km de Montgenève dans les Alpes internes jusqu'à sa confluence avec le Rhône (au niveau d'Avignon). Elle draine avec ses affluents un bassin versant d'une superficie de 14 200 km² dont environ 5 000 km² de socle dans les Alpes internes (zone à l'amont du barrage de Serre-Ponçon), correspondant aux bassins versants de la Haute Durance, du Guil et de l'Ubaye. A l'aval du barrage de Serre-Ponçon, le bassin versant de la Durance recueille les sédiments en provenance de formations sédimentaires d'âges Secondaire et Tertiaire, principalement constituées de marnes et calcaires, avec cependant une part non négligeable de formations détritiques (argileuses, sableuses et conglomératiques) issues du démantèlement de la couverture sédimentaire lors de la formation des Alpes (Figure 3-3).

Le climat sub-méditerranéen à tendance montagnard qui règne dans la partie amont du bassin versant est marqué par des précipitations nivales importantes en hiver et une sécheresse estivale. Les températures basses en hiver ainsi que la présence de neige ne permettent pas l'existence d'un couvert végétal protégeant les sols de l'érosion. Le long du cours de la Durance, le climat évolue vers un climat méditerranéen typique avec un volume annuel de précipitations plus faible mais plus concentré dans le temps, souvent sous forme d'orages qui provoquent un ravinement intense. Finalement, le climat subméditerranéen à tendance montagnard à méditerranéen, ainsi que les différentes formations géologiques qui le constituent, font du bassin versant de la Durance une zone à très fort taux d'érosion et par conséquent le taux de matières en suspension dans les nombreux cours d'eau est élevé comme nous avons pu le constater dans le chapitre précédent (jusqu'à 648 t/km²/an de taux d'érosion soit un taux d'envasement de 2,4 Mt/an pour une retenue comme celle de Serre-Ponçon - cf. Chap. 2 2.3.2).

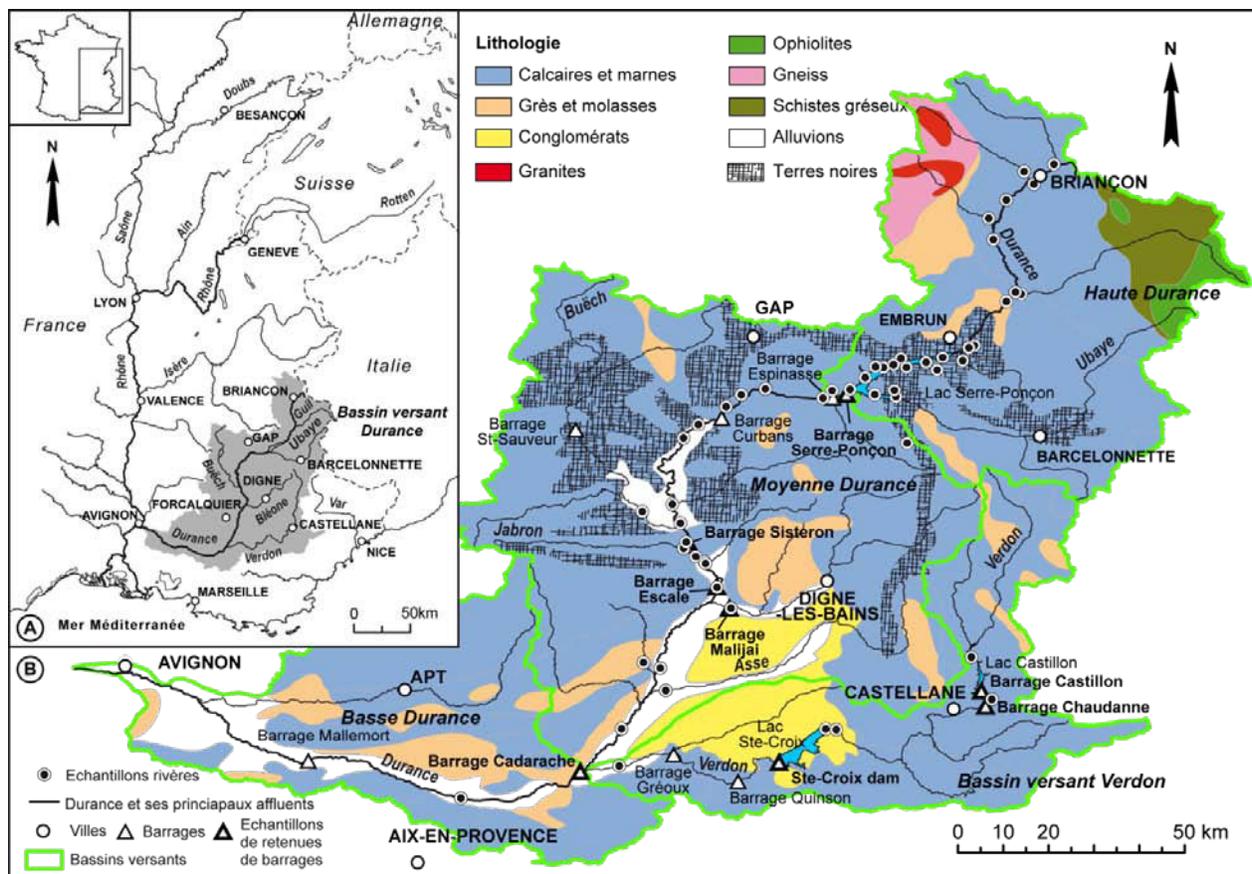


Figure 3-3 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de la Durance avec la localisation des retenues de barrages et des sites d'échantillonnage.

A) Carte régionale de localisation du bassin versant de la Durance ; B) Carte géologique.

Le fort aménagement de la Durance et de certains de ses affluents (Guil, Buëch, Bléone et Verdon) depuis les années 50 jusqu'en 1981 a eu pour conséquence un stockage intermédiaire des sédiments dans les retenues et une diminution des flux de sédiments d'amont vers l'aval du réseau hydrographique.

Le cours de la Durance peut être divisé entre trois grands ensembles hydrauliques :

- la **Haute Durance** qui appartient aux Alpes internes, zone montagneuse principalement composée de roches intrusives et métamorphiques avec dans les zones périphériques une couverture sédimentaire essentiellement carbonatée ;
- la **Moyenne Durance**, elle fait partie des Préalpes aux reliefs moins accusés, constituées de séries sédimentaires comprenant principalement des calcaires et marnes (roche comprenant au plus 40 % de calcite, 50-70 % de minéraux argileux et 5-10 % de quartz). Parmi les marnes, les Terres noires de l'Oxfordien sont très érodables et bien qu'elles n'affleurent que sur environ un quart de la surface, elles représentent la quasi-totalité des contributions dans les atterrissements à l'aval du fait de leur faible couvert végétal (Alary, 1998; Miramont, 2000) ;
- le **bassin versant du Verdon** qui appartient également aux Préalpes dont le relief est caractéristique des formations essentiellement calcaires qui le constituent.

Nous disposons pour le système Durance d'un échantillonnage systématique à la fois le long du cours de la Durance et au niveau des différentes confluences. Les résultats des analyses minéralogiques sont présentés par grand ensemble géographique : la Haute Durance, la Moyenne Durance et le Verdon. Les données détaillées sont fournies dans l'annexe 4 et une synthèse est présentée dans le Tableau 7.

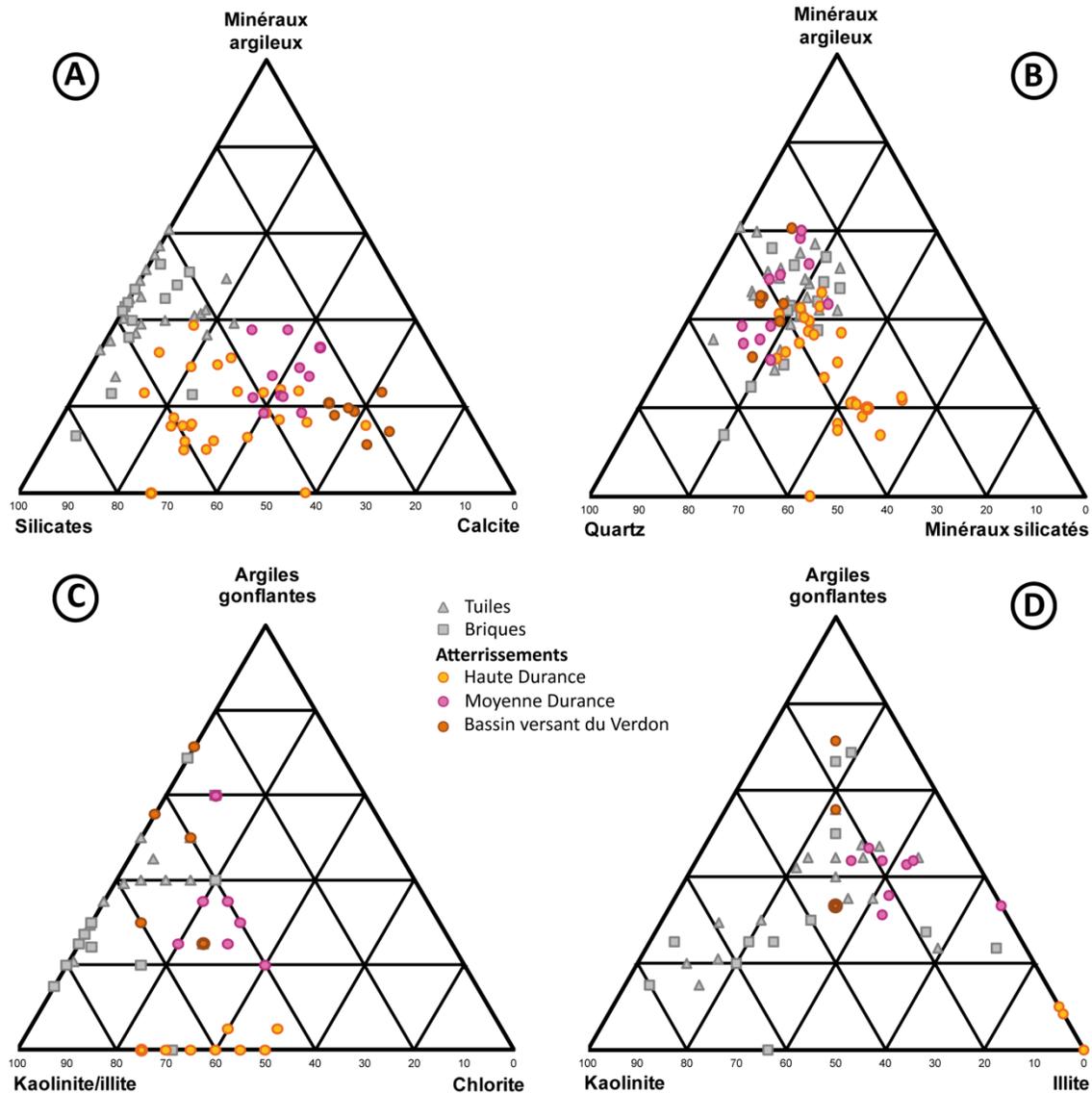


Figure 3-4 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale (A et B) et de l'assemblage en minéraux argileux (C et D) des échantillons du bassin versant de la Durance comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).

Le diagramme ternaire de la Figure 3-4-A montre que l'ensemble des échantillons du bassin versant de la Durance possèdent des teneurs en calcite trop élevées comparées à celles du CMR (moyenne autour de 10 %) : valeurs en moyenne de 20 % pour les échantillons de la Haute Durance, autour de 40 % pour ceux de la Moyenne Durance et de 50 % pour ceux du Verdon.

Les formations géologiques de chaque sous-bassin corroborent ces teneurs en calcite. Les valeurs décroissent depuis le bassin du Verdon principalement composé de calcaires à celui de la moyenne Durance dans lequel les calcaires sont largement présents et enfin celui de la Haute Durance où la contribution des formations intrusives aux faibles teneurs en calcaire réduit fortement celle des formations carbonatées (Barféty et al., 1995).

Les teneurs élevées en minéraux silicatés associées aux faibles teneurs en minéraux argileux dans la Haute Durance traduisent une source de sédiments depuis les zones de socle (roches intrusives et métamorphiques) et les séries détritiques du Paléozoïque ainsi que la part prépondérante de l'érosion mécanique sur l'érosion chimique dans ce contexte montagneux. Les teneurs en ces éléments chutent dans le bassin de la moyenne Durance et du Verdon alimentés par des séries sédimentaires sous un climat méditerranéen qui favorise l'érosion mécanique lors des orages et l'érosion chimique avec les alternances de périodes humides et sèches.

Ces observations sur les sédiments de la Haute Durance sont étayées par leurs compositions en minéraux argileux (Figure 3-4-C et D). Les assemblages de minéraux argileux des échantillons de la Moyenne Durance et du bassin versant du Verdon sont proches de celles du CMR, par contre les échantillons de la Haute Durance montrent une absence d'argiles gonflantes et des teneurs importantes en illite issues de l'altération de minéraux primaires tels que les feldspaths et les micas du massif cristallin des Alpes internes.

Les résultats des analyses minéralogiques montrent des assemblages contrastés le long du cours de la Durance. Assemblages d'autant plus contrastés que la chaîne des barrages rompt en grande partie la continuité sédimentaire et exacerbe les caractéristiques de chacun des sous-bassins délimités sur le cours de la Durance par le barrage de Serre-Ponçon et sur celui du Verdon par plusieurs barrages.

Ces résultats suggèrent donc le choix des atterrissements au sein du bassin versant de la Durance. En effet, les sédiments de la Haute Durance ont des teneurs en minéraux silicatés, en illites et en chlorites élevées par rapport à celles du CMR. Etant donné l'importance du taux d'envasement annuel de la retenue de Serre Ponçon séparant la Haute de la Moyenne Durance, il pourra être intéressant de mener des tests plus spécifiques sur des échantillons de Serre Ponçon malgré leur faible potentiel d'un point de vue composition minéralogique. Les échantillons du bassin versant du Verdon ont une composition en minéraux argileux plutôt compatible avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite malgré la teneur élevée en calcite qui pourrait s'avérer handicapante à la cuisson. Les tests matériaux investigueront cette problématique. Enfin, les échantillons de la Moyenne Durance montrent des compositions en minéraux argileux compatibles avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite et des compositions en roche totale plus intermédiaires entre ceux de la Haute Durance et ceux du Verdon. La retenue de Cadarache au niveau de la confluence entre la Durance et le Verdon paraît donc être le lieu de mélange des apports adéquate pour obtenir un atterrissement compatible avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite malgré une teneur en calcite encore un peu élevée mais toutefois bien moins élevée que celles du Verdon.

Tableau 7 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des échantillons du bassin versant de la Durance. (éch. = échantillons ; Moy. = moyenne)

Minéraux	Haute Durance (N = 23 éch.)			Moyenne Durance (N = 11 éch.)			Verdon (N = 6 éch.)			
	Présence %N éch.	Moy.	σ	Présence %N éch.	Moy.	σ	Présence %N éch.	Moy.	σ	
<i>Minéraux présents dans plus des 2/3 des échantillons</i>										
Minéraux argileux	100	16	6	100	22	6	100	17	4	
Quartz	100	19	2	100	22	4	100	16	3	
Calcite	100	25	12	100	36	6	100	59	6	
Chlorite	100	17	7	100	9	5	83	2	2	
Muscovite	100	8	3	100	4	2	67	2	1	
Microcline	100	4	2	92	2	1	100	2	0	
Albite	83	6	5	100	3	1	83	2	1	
Dolomite	70	5	7	75	ϵ	1	-	-	-	
	Total 100				98			100		
<i>Minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons</i>										
Ankerite	-	-	-	25	ϵ	0	50	ϵ	1	
Pyrite	13	ϵ	0	25	ϵ	1	-	-	-	
Hematite	4	ϵ	0	8	ϵ	0	-	-	-	
Gypse	13	ϵ	0	-	-	-	-	-	-	
Magnetite	9	ϵ	0	-	-	-	-	-	-	
Halite	9	ϵ	0	-	-	-	-	-	-	
Ephesite	9	ϵ	1	-	-	-	-	-	-	
Tremolite	4	ϵ	0	-	-	-	-	-	-	

Minéraux	Haute Durance			Moyenne Durance			Verdon			
	Présence %N éch.	Moy.	σ	Présence %N éch.	Moy.	σ	Présence %N éch.	Moy.	σ	
<i>Minéraux présents dans plus de 2/3 des échantillons</i>										
Kaolinite				82	13	7	100	19	8	
Illite	100	60	8	100	33	10	100	19	8	
Chlorite	100	40	8	100	26	8	-	-	-	
Smectite	-	-	-	-	-	-	100	23	15	
Interstratifiés I/S	-	-	-	91	26	10	100	20	9	
	Total 100				99			100		
<i>Minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons</i>										
Interstratifiés I/S	9	ϵ	1	45	2	3	-	-	-	
Smectite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Interstratifiés C/S	-	-	-	-	-	-	50	5	5	
Chlorite	-	-	-	-	-	-	50	8	10	

2.2.2. Le bassin versant amont de la Seine

L'approche développée sur le bassin versant de la Durance a été transposée au bassin versant de la Seine avec une approche simplifiée. Les prélèvements ont été limités aux retenues situées dans le bassin amont de la Seine qui draine d'une part des formations sédimentaires (amont de la confluence avec l'Yonne) et d'autre part des roches intrusives (bassin versant de l'Yonne). A l'aval de la confluence de l'Yonne, les autres affluents de la Seine traversent les mêmes formations sédimentaires que les affluents du cours amont.

La Seine appartient à un domaine aux faibles reliefs soumis à un régime pluvial océanique. Les pluies sont également réparties sur l'année et les aménagements de la Seine ont été effectués, dans sa partie amont, pour soutenir les étiages et réduire l'impact des crues.

Le bassin versant amont de la Seine est également aménagé pour les réserves en eau et la production hydroélectrique (bassin versant de l'Yonne). Les retenues dans le bassin versant de l'Yonne coupent la dynamique sédimentaire des cours d'eau alors que celles de la Seine ont peu d'influence car ce sont des réservoirs en dérivation des cours d'eau.

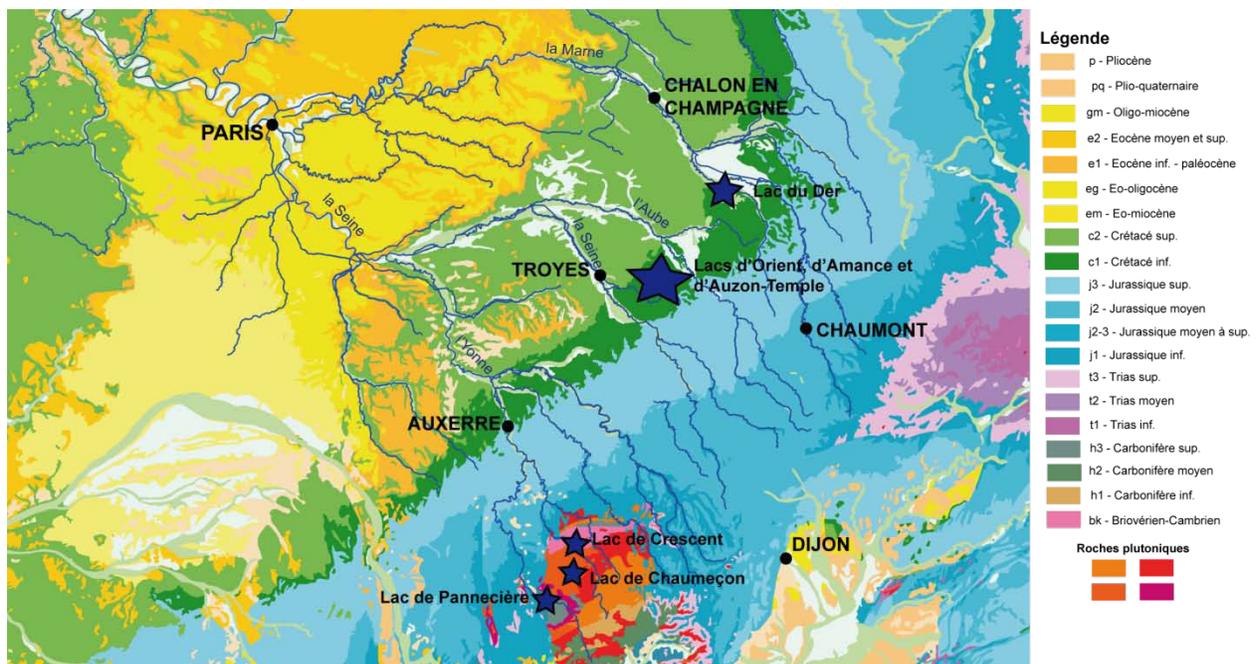


Figure 3-5 : Carte géologique de la zone amont du bassin versant de la Seine avec la localisation des retenues de Crescent, de Chaumeçon et de Pannecièrre et des Lacs d'Orient, d'Amance, d'Auzon-Temple et du Der

Les prélèvements ont été effectués dans les retenues qui jalonnent le bassin versant amont de la Seine dans les deux grands sous-bassins qui correspondent à des formations géologiques différentes (Figure 3-5)

- le bassin de la Seine à l'amont de la confluence avec l'Yonne traversant les formations sédimentaires avec les lacs d'Orient (en dérivation de la Seine) ; d'Auzon Temple (en dérivation de l'Aube) ; d'Amance (en dérivation de l'Aube et sur l'Amance) ; auxquels on peut ajouter le lac

du Der, qui est en dérivation de la Marne drainant le même type de formations sédimentaires. Ces formations géologiques correspondent à des formations calcaires à marno-calcaires surmontées par les formations argilo-sableuses du Crétacé inférieur ;

- Le bassin de l'Yonne avec les retenues de Crescent, de Chaumeçon et de Pannecièrre. Celles-ci captent les écoulements de bassins versants essentiellement composés de granites.

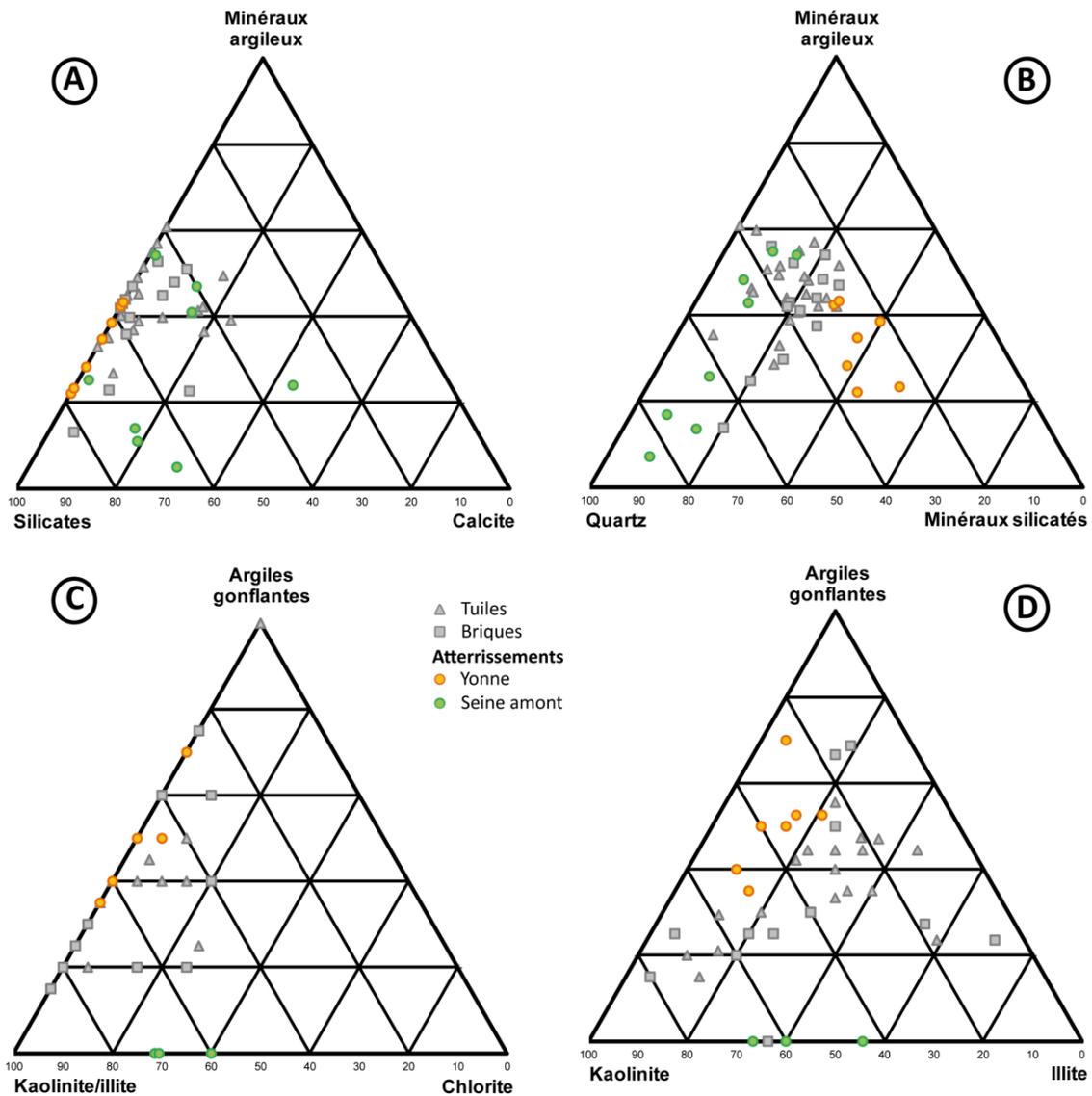


Figure 3-6 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale (A et B) et de l'assemblage en minéraux argileux (C et D) des échantillons du bassin versant de la Seine comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).

La projection des données minéralogiques sur les diagrammes ternaires souligne le contraste dans les zones sources (Figure 3-6) :

- les sédiments en provenance **du bassin versant de la Seine amont** présentent des teneurs en calcite relativement élevées (20 %) et des teneurs en minéraux argileux et silicatés assez faibles par rapports aux valeurs du CMR. Les assemblages de minéraux argileux sont similaires à ceux du CMR ;
- les sédiments **du bassin versant de l'Yonne** possèdent des compositions en minéraux assez proches de celles des mélanges industriels avec toutefois des teneurs en minéraux silicatés relativement élevées (35-40 %). Les assemblages en minéraux argileux sont par la présence de chlorite (30-40 %) et par l'absence d'argiles gonflantes.

Tableau 8 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des échantillons du bassin versant amont de la Seine.

	Yonne (N = 7 éch.)			Seine amont (N = 8 éch.)		
	Présence (%N échantillons)	Moyenne (%)	σ	Présence (%N échantillons)	Moyenne (%)	σ
<i>Minéraux présents dans au moins 2/3 des échantillons</i>						
Quartz	100	27	4	100	46	16
Minéraux argileux	100	31	9	100	27	17
Albite	100	16	4	-	-	-
Orthose	100	15	4	-	-	-
Microcline	-	-	-	100	5	2
Chlorite	100	6	4	-	-	-
Muscovite	86	3	4	88	2	2
Calcite	-	-	-	100	18	14
	<i>Total</i>	<i>98</i>			<i>98</i>	
<i>Minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons</i>						
Microcline	14	ε	3	-	-	-
Albite	-	-	-	63	2	2
Chlorite	-	-	-	13	ε	2
	Yonne			Seine amont		
	Présence (%N échantillons)	Moyenne (%)	σ	Présence (%N échantillons)	Moyenne (%)	σ
<i>Minéraux présents dans au moins 2/3 des échantillons</i>						
Kaolinite	100	36	8	100	41	9
Illite	100	21	2	100	11	3
Chlorite	100	25	3	-	-	-
Smectite	-	-	-	88	8	4
Interstratifiés I/S	-	-	-	100	24	9
Interstratifiés C/S	-	-	-	100	16	4
Interstratifiés I/V	86	13	6	-	-	-
	<i>Total</i>	<i>95</i>			<i>100</i>	
<i>Minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons</i>						
Vermiculite	14	2	6	-	-	-

Ces différences de compositions minéralogiques entre les sédiments issus de l'érosion de ces formations géologiques aux origines bien distinctes ressortent nettement dans le Tableau 8. En effet, la présence de quartz et de minéraux argileux est relativement similaire entre les groupes de données, tout comme la présence de muscovite. Par contre, les minéraux silicatés varient fortement. Les sédiments issus de l'érosion du massif du Morvan sont composés principalement d'albite, d'orthose et de chlorite alors que ceux issus de l'érosion des terrains sédimentaires comprennent essentiellement du microcline. Le contraste entre les deux sources de sédiments est plus marqué dans les assemblages de minéraux argileux avec notamment l'absence d'argiles gonflantes et la présence de chlorite dans les sédiments du bassin de l'Yonne.

2.2.3. Le bassin versant en rive droite du cours moyen de la Garonne

Le bassin versant de la Garonne est un des plus grands du territoire français. Dans la partie du bassin versant situé en rive gauche, les aménagements susceptibles de piéger des sédiments sont situés dans les zones très à l'amont où les taux d'érosion sont assez faibles compte tenu de la faible érodabilité des roches. Au contraire, le bassin versant situé en rive droite est fortement aménagé dans les zones où l'érosion est active, en particulier dans le Massif Central et les terrains sédimentaires au sud du Massif Central. C'est cette zone que nous avons retenue pour l'échantillonnage sur les cours d'eau suivants (Figure 3-7) :

- le bassin versant de la **Dordogne**, avec son plus grand affluent la Cère. Ce bassin versant draine dans sa partie amont les formations volcaniques de la Chaîne des Puys, des formations de roches intrusives de la chaîne hercynienne et des terrains sédimentaires essentiellement calcaires du Jurassique.
 - Les prélèvements ont été effectués dans les retenues de Bort les Orgues (la Dordogne), Triouzoune (le Triouzoune), d'Enchanet (la Maronne) et Saint Etienne Cantalès (la Cère) ;
- le bassin versant du **Lot** et notamment son plus grand affluent la **Truyère** dont le cours draine d'abord des formations intrusives, puis au sud, des formations volcaniques de la Chaîne des Puys et des terrains sédimentaires calcaires (Jurassique).
 - Dans le cadre de la maintenance du barrage de Sarrans en Juillet 2014, nous avons pu bénéficier d'un accès privilégié à la retenue à sec pour le barrage de Sarrans et à bas niveau d'eau pour la retenue de Grandval qui est à l'amont de la retenue de Sarrans et dont le niveau d'eau avait été abaissé en prévision de la maintenance du barrage de Sarrans. Ceci explique le grand nombre d'échantillons prélevés dans le bassin versant de la Truyère.
 - D'autres prélèvements ont été effectués dans les retenues de Montézic (la Plane), de Maury (la Selve), de Selve (la Selve), de Castelnau Lassouts (Lot), du Moulinet (la Crueize) et de Ganivet (la Colagne) ;
- le bassin versant de l'**Aveyron** dans lequel les roches intrusives dominent.
 - Les prélèvements ont été effectués dans les retenues de Pont de Salars (le Viaur) et de de Pareloup (le Vioulou) ;

- le bassin versant du **Tarn** et en particulier celui de son plus grand affluent l'**Agout** dont les bassins versants recoupent des terrains principalement sédimentaires pour le premier et intrusifs pour l'Agout. Les taux d'érosion sont élevés dans cette zone.
 - Les prélèvements ont été effectués dans les retenues de Villefranche de Panat (l'Alrance), de Bancalié (la Dadou), de Razisse (la Dadou), de Laouzas (le Vèbre), de Ravièges (l'Agout) et des Saints Peyres (l'Arn).

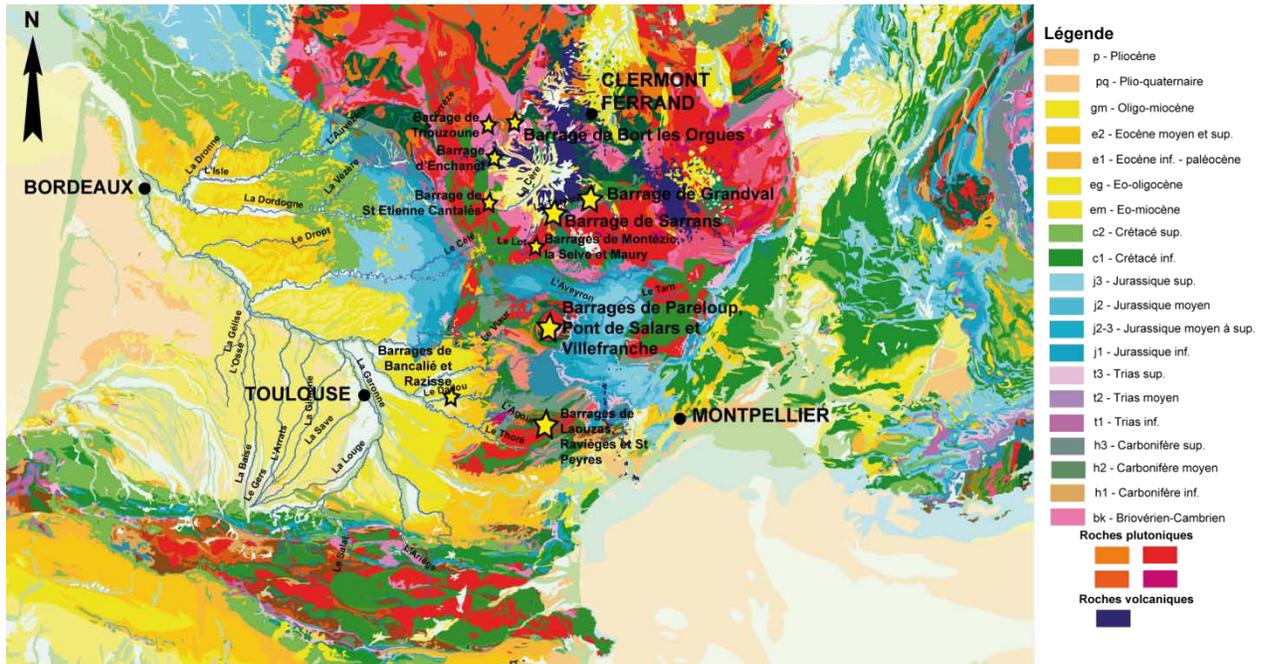


Figure 3-7 Carte géologique du bassin versant de la Garonne

La projection des données minéralogiques sur les diagrammes ternaires montre l'absence totale de calcite pour l'ensemble des échantillons prélevés dans ce bassin versant (Figure 3-8).

- Les échantillons du réseau de la **Dordogne** se caractérisent par de très faibles teneurs en minéraux argileux et des proportions de minéraux silicatés assez élevées. Les assemblages de minéraux argileux sont assez voisins de ceux des mélanges industriels avec des proportions d'argiles gonflantes un peu faibles ;
- les sédiments du **Lot** présentent des proportions assez variables en minéraux argileux et silicates avec des proportions en quartz tout à fait acceptables alors que celles en minéraux silicatés sont nettement supérieures à celles des échantillons industriels. Les assemblages de minéraux argileux sont tout à fait comparables à ceux des mélanges industriels.
- Les données de l'**Aveyron** indiquent des proportions de minéraux silicatés en accord avec celles des mélanges industriels, toutefois celles des minéraux argileux sont un peu faibles. Les assemblages de minéraux argileux sont très variables, certains échantillons ne comportent pas d'argiles gonflantes alors que d'autres présentent des proportions proches de celles des mélanges industriels ;

- sur le **Tarn**, les teneurs en minéraux argileux sont très faibles, voire inexistantes. Les proportions de minéraux silicatés sont assez variables. Bien qu'en proportions très faibles, les analyses des assemblages de minéraux argileux indiquent des assemblages proches de ceux des mélanges industriels.

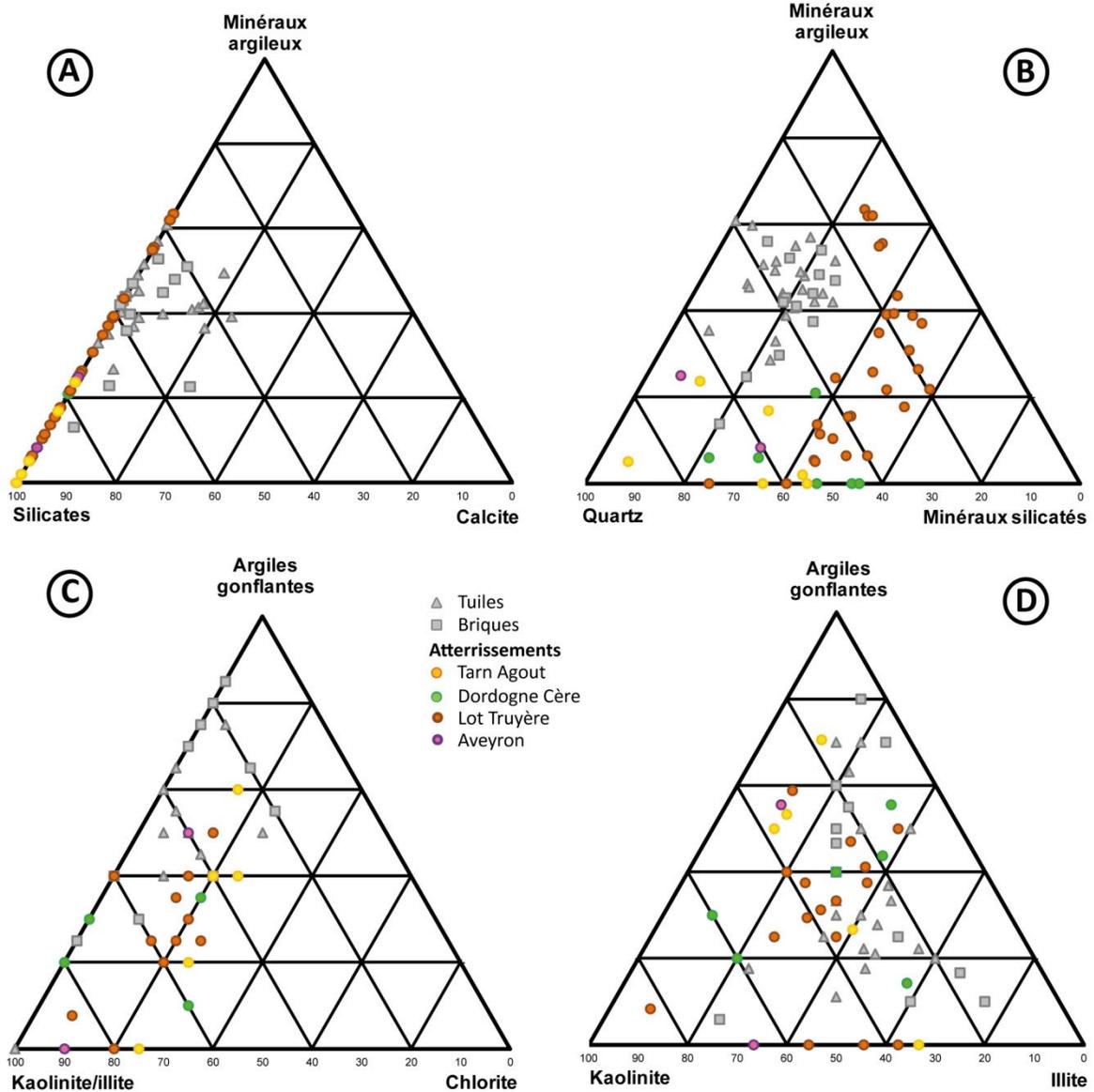


Figure 3-8 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale des échantillons du bassin versant rive droite de la Garonne comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).

Tableau 9 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des échantillons du bassin versant rive droite de la Garonne.

	Dordogne (N = 6 éch.)		Lot (N = 22 éch.)		Aveyron (N = 2 éch.)		Tarn (N = 6 éch.)	
	Présence (%N Ech)	Moyenne (%)	Présence (%N Ech)	Moyenne (%)	Présence (%N Ech)	Moyenne (%)	Présence (%N Ech)	Moyenne (%)
<i>Minéraux présents dans au moins 2/3 des échantillons</i>								
Quartz	100	50	100	27	100	59	100	60
Minéraux argileux	-	-	93	25	100	15	67	7
Muscovite	100	12	97	14	100	12	100	6
Chlorite	-	-	93	7	-	-	100	3
Albite	100	13	97	14	-	-	100	9
Microcline	83	7	79	6	100	3	100	5
Orthose	100	6	72	5	-	-	-	-
<i>Total</i>		<i>88</i>		<i>98</i>		<i>89</i>		<i>90</i>
<i>Minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons</i>								
Minéraux argileux	50	6	-	-	-	-	-	-
Chlorite	50	5	-	-	50	2	-	-
Orthose	-	-	-	-	50	2	50	6
Albite	-	-	-	-	50	2	-	-
Lazurite	-	-	-	-	-	-	33	ε
Maghemite	33	ε	10	ε	-	-	-	-
Ankerite	17	ε	-	-	-	-	-	-
Hornblende	17	3	-	-	-	-	-	-
Polythionite	-	-	3	ε	-	-	-	-
Diopside	-	-	3	ε	-	-	-	-
Augite	-	-	3	ε	-	-	-	-
Anorthite	-	-	3	ε	-	-	-	-

	Dordogne		Lot		Aveyron		Tarn	
	Présence (%N Ech)	Moyenne (%)						
<i>Minéraux présents dans au moins 2/3 des échantillons</i>								
Kaolinite	100	33	100	29	100	45	100	25
Illite	100	27	100	27	100	20	100	20
Chlorite	-	-	97	18	100	10	100	22
Interstratifiés I/S	100	31	90	26	-	-	83	33
<i>Total</i>		<i>91</i>		<i>100</i>		<i>75</i>		<i>100</i>
<i>Minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons</i>								
Chlorite	50	10	-	-	-	-	-	-
Smectite	-	-	7	ε	-	-	-	-
Interstratifiés I/S	-	-	-	-	50	25	-	-

Ces résultats contrastés reflètent l'influence des zones sources du Massif Central car la plupart des retenues sont situées en limite ou au sein du Massif Central.

L'absence de calcite caractérise bien les formations de socle ou volcaniques alors que les faibles teneurs en minéraux argileux reflètent une zone où l'érosion mécanique prévaut sur celle chimique.

L'influence des formations volcaniques dans le bassin versant de la Truyère, en particulier dans la retenue de Sarrans, est mise en évidence par la présence dans les échantillons de la retenue de Sarrans de minéraux de type diopside, augite et anorthite qui sont typiques de roches éruptives qui étaient regroupés dans les minéraux silicatés sur les diagrammes ternaires.

2.2.4. Conclusions

La comparaison avec le CMR des compositions minéralogiques des sédiments des trois bassins versants pilotes souligne le signal propre des différents ensembles géologiques :

- la contribution exclusive de roches intrusives est à l'origine de sédiments présentant des teneurs en minéraux silicatés élevées et des teneurs en minéraux argileux trop faibles. De plus, l'assemblage des minéraux argileux est peu mature, dominé par les chlorites et les illites issues de l'altération des micas et feldspaths des massifs cristallins. Ces minéraux s'accumulent dans les retenues situées dans les zones amont aux reliefs plus marqués dans lesquelles les transformations chimiques liées à l'altération sont assez limitées.

En effet,

- une contribution exclusivement sédimentaire est généralement à l'origine de sédiments présentant des teneurs en calcite élevées et des assemblages de minéraux argileux assez proches de ceux des mélanges industriels. Ces assemblages reflètent des minéraux argileux plus évolués qui traduisent des cycles sédimentaires plus complets ;
- la contribution de roches volcaniques est peu mise en évidence par les diagrammes car elle se superpose à celle des roches intrusives avec beaucoup de minéraux silicatés et un faible pourcentage de minéraux argileux. Il est toutefois possible de les discriminer en observant les minéraux présents dans moins d'1/3 des échantillons qui font alors ressortir des minéraux caractéristiques de roches volcaniques (comme dans le massif central avec les diopsides, augites et anorthites,...).

D'après les résultats de ces sites pilotes, ce sont les zones dans lesquelles s'accumulent des sédiments résultant de mélanges naturels entre des sources provenant de formations sédimentaires et de roches intrusives qui présentent les compositions minéralogiques et les assemblages de minéraux argileux les plus proches de ceux des mélanges industriels. En effet, les terrains sédimentaires fournissent des sédiments aux teneurs élevées en calcite et les terrains intrusifs des teneurs trop fortes en minéraux silicatés. Leur mélange permet de lisser ces valeurs extrêmes.

2.3. Les façades maritimes, baies côtières estuariennes et ports

L'ensemble des milieux liés au domaine maritime sont traités dans ce sous-chapitre. Nous avons traité ensemble les milieux dominés par les apports maritimes et ceux où les contributions maritimes et fluviales sont plus mélangées. Les ports maritimes sont traités séparément afin de bien rendre compte des zones de dragage spécifiques à l'activité portuaire qui peuvent être distinctes des zones naturelles d'accumulation de sédiments.

2.3.1. Les baies côtières estuariennes de la côte de la Manche

Les deux grandes baies de la façade maritime sont au nord la baie de Somme et plus au sud celle du Mont-Saint-Michel. Nous avons inclus l'estuaire de la Rance dans cette étude (Figure 3-9). Les baies du Mont-Saint-Michel et de Somme représentent de vastes zones intertidales dans lesquelles les sédiments sont remis en suspension sous l'action des marées et des tempêtes. A l'opposé, suite à la construction de l'usine marémotrice, la dynamique tidale de l'estuaire de la Rance a été largement modifiée avec des étales plus longues.

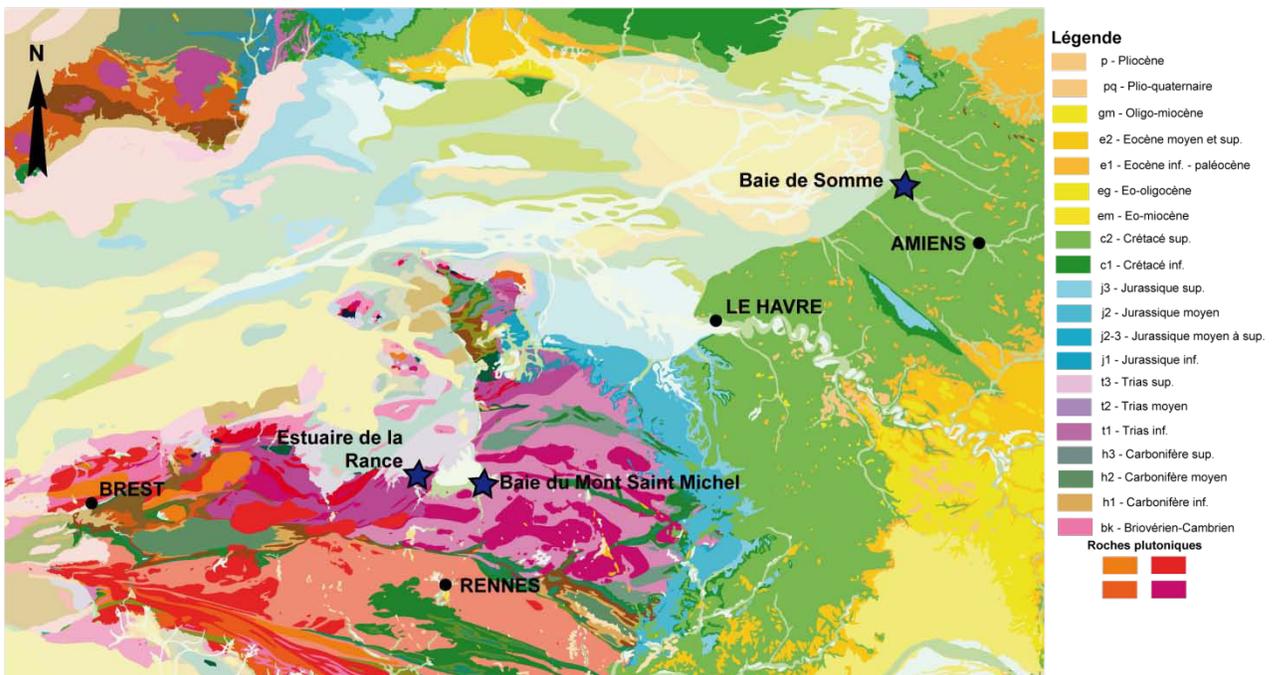


Figure 3-9 : Extrait du Nord Ouest de la carte géologique de la France au 1:1 000 000 permettant la localisation des baies de Somme et du Mont St Michel et de l'estuaire de la Rance ainsi que leurs environnements géologiques respectifs.

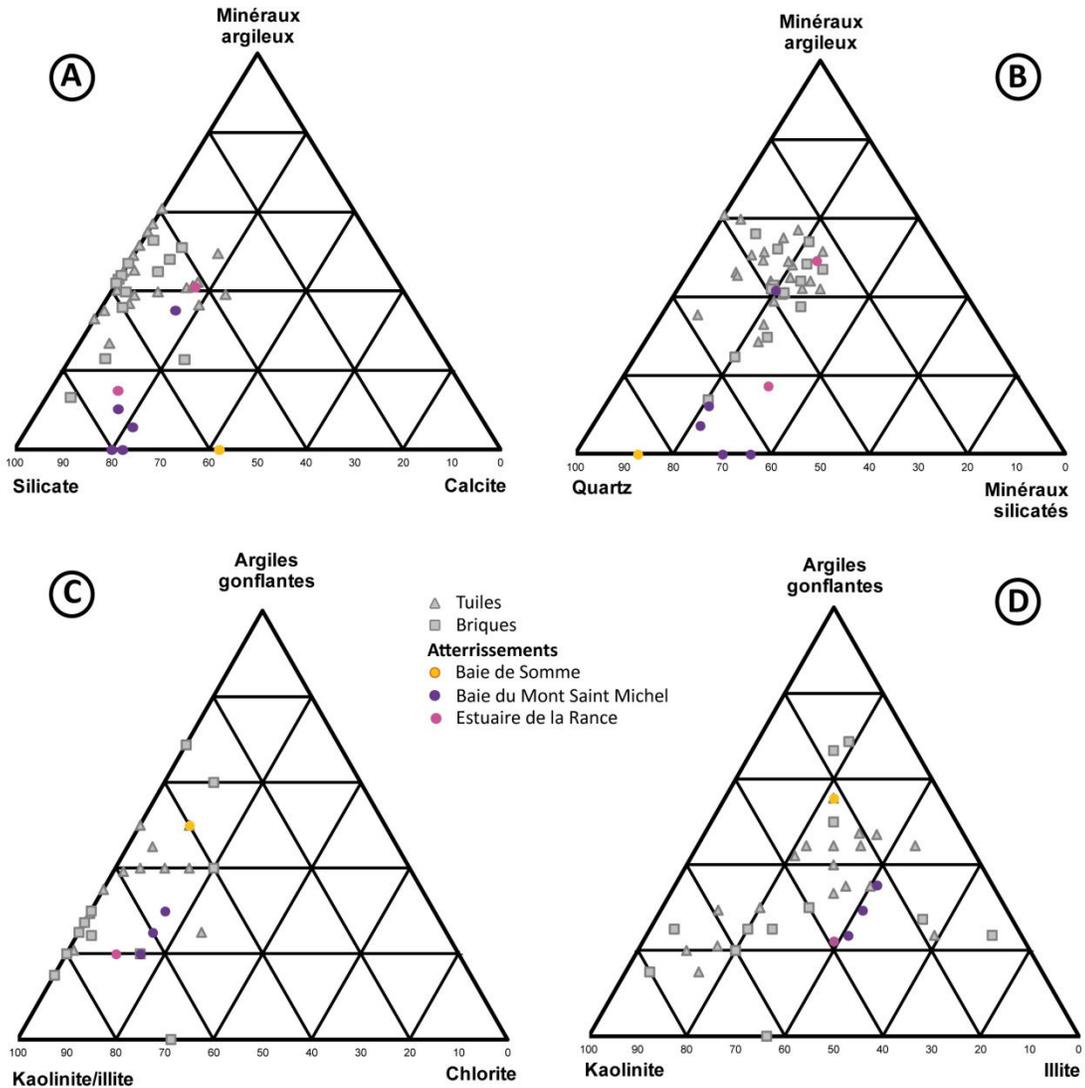


Figure 3-10 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale des échantillons des baies du Mont-Saint-Michel et de Somme et de l'estuaire de la Rance comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).

Les sédiments provenant de ces deux baies, de Somme et du Mont-Saint-Michel, montrent de faibles proportions en minéraux argileux et un pourcentage élevé en quartz. Les assemblages de minéraux argileux se projettent sur les diagrammes ternaires dans les domaines des échantillons industriels, avec des proportions d'argiles gonflantes assez faibles. L'halite est présente dans l'ensemble des sédiments prélevés comme l'on pouvait s'y attendre avec la proximité du milieu marin (Tableau 10). Les échantillons du Mont-Saint-Michel et de la Rance montrent la présence de silicates variés (quartz, muscovite, chlorite, albite, microcline et orthose) reflétant une source cristalline alors que celui de la baie de Somme est assez pauvre en silicates autres que le quartz.

L'analyse minéralogique des sédiments de l'estuaire de la Rance montre des teneurs en minéraux argileux nettement plus importantes que celles du Mont-Saint-Michel (20-40 %). Les assemblages de

minéraux argileux sont très voisins de ceux de la Baie du Mont-Saint-Michel. La plus forte proportion en minéraux argileux traduit l'aménagement de l'estuaire, qui allonge les périodes d'étales permettant ainsi aux particules fines de sédimenter.

Tableau 10 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des échantillons des baies du Mont-Saint-Michel et de Somme et de l'estuaire de la Rance.

	Rance	Somme	Mont-Saint-Michel (N = 5 éch.)		
	(2 éch.) (%)	(1 éch.) (%)	Présence (%N échantillons)	Moyenne (%)	σ
Quartz	28	48	100	36	7
Minéraux argileux	23	-	60	7	10
Calcite	14	40	100	24	3
Aragonite	10	4	100	15	2
Albite	8	2	100	7	2
Microcline	2	-	40	2	3
Orthose	-	3	60	2	2
Mica	7	2	100	3	1
Chlorite	5	-	100	3	1
Halite	2	1	20	ε	1

	Rance	Somme	Mont-Saint-Michel		
	(%) (2 éch.)	(%) (1 éch.)	Présence (%N échantillons)	Moyenne (%)	σ
Kaolinite	35	20	100	25	5
Illite	35	20	100	35	0
Interstratifié I/S	20	50	100	25	5
Chlorite	10	10	100	15	0

Dans la composition minéralogique, la forte proportion de quartz peut correspondre à un biais d'échantillonnage, avec le prélèvement de sédiments trop silteux. Les analyses pour la détermination des assemblages de minéraux argileux ne sont pas impactées par la présence de cette fraction silteuse car elles sont conduites sur la fraction fine < 2 μm .

Les sédiments de la baie du Mont-Saint-Michel et ceux de l'estuaire de la Rance présentent des teneurs assez élevées en illite qui suggèrent un apport en sédiments provenant de roches intrusives, qui composent une partie du Massif Armoricaïn.

Nous retrouvons dans les sédiments des baies une signature minéralogique régionale qui montre que les forts courants de marée vannent les sédiments mais n'oblitérent pas les signatures des MES apportées par les cours d'eau côtiers.

Les assemblages de minéraux argileux des sédiments des baies de Somme, du Mont-Saint-Michel et de l'estuaire de la Rance sont proches de ceux du CMR. Toutefois, la faible proportion de minéraux argileux dans la composition en roche totale, montre pour les baies un fort effet de tri avec une exportation des particules fines vers le large alors que celles-ci sont piégées dans l'estuaire de la Rance dont la dynamique permet le dépôt de ces particules pendant les étales prolongées, limite les remaniements au cours de tempêtes.

2.3.2. Les baies côtières estuariennes de la façade atlantique

Trois baies ont été échantillonnées, soit du nord au sud, le pertuis Breton, le pertuis d'Antioche et le bassin d'Arcachon.

2.3.2.1. Le bassin d'Arcachon

Le bassin d'Arcachon est une zone lagunaire qui présente l'originalité sur la côte aquitaine d'être la seule baie qui n'a pas été refermée par les apports de la dérive littorale, ceci grâce au débit suffisamment élevé du fleuve côtier qui alimente la baie, l'Eyre. Comme présenté dans le chapitre 2, on ne peut pas parler de comblement de baie pour le bassin d'Arcachon mais plutôt de déplacement de masse sédimentaire par les courants avec une prédominance des sédiments fins dans le fond du bassin au nord-est.

La composition minéralogique en roche totale de ces sédiments est largement dominée par les teneurs élevées en quartz. On remarque une absence totale de calcite et une faible teneur en minéraux argileux, dont l'assemblage est dominé par l'illite. Ces compositions suggèrent l'importance des apports maritimes par rapport aux apports fluviaux de l'Eyre. La dynamique sédimentaire du bassin d'Arcachon est dominée par le régime tidal et les courants engendrés par la morphologie de la baie.

2.3.2.2. Les pertuis Breton et d'Antioche

Les pertuis Breton et d'Antioche reçoivent, comme évoqué dans le chapitre 2, des apports sédimentaires très similaires. Ils sont tous deux alimentés par la dérive littorale avec des influences de la Loire pour le pertuis Breton, et des influences combinées du pertuis Breton et de la Gironde pour le pertuis d'Antioche. Des systèmes fluviaux de taille moyenne contribuent également aux apports sédimentaires avec le Lay et la Sèvre-Niortaise pour le pertuis Breton et la Charente et la Sèvre pour le pertuis d'Antioche. Ces cours d'eau de dimensions modestes drainent des bassins versants comprenant à la fois des roches intrusives (partie méridionale du massif armoricain pour le Lay et la Sèvre-Niortaise et partie occidentale du massif central pour la Charente) et une couverture sédimentaire composée en grande partie de calcaires (Figure 3-11).

Ainsi, le pertuis Breton est principalement alimenté en sédiments fluviaux par la Sèvre Niortaise et par le Lay. Le bassin versant de la Sèvre Niortaise comprend essentiellement des formations sédimentaires du Mésozoïque et celles très récentes (Holocène) du Marais Poitevin. Le Lay draine des formations géologiques plus variées, les mêmes formations sédimentaires que la Sèvre Niortaise et des roches intrusives du Massif Armoricaïn datant du Paléozoïque.

A la différence du pertuis Breton, le pertuis d'Antioche est alimenté par des cours d'eau qui drainent quasi exclusivement des formations sédimentaires, mis à part une zone très restreinte située très à l'amont du bassin versant de la Charente où affluent les formations intrusives de l'Ouest du Massif Central.

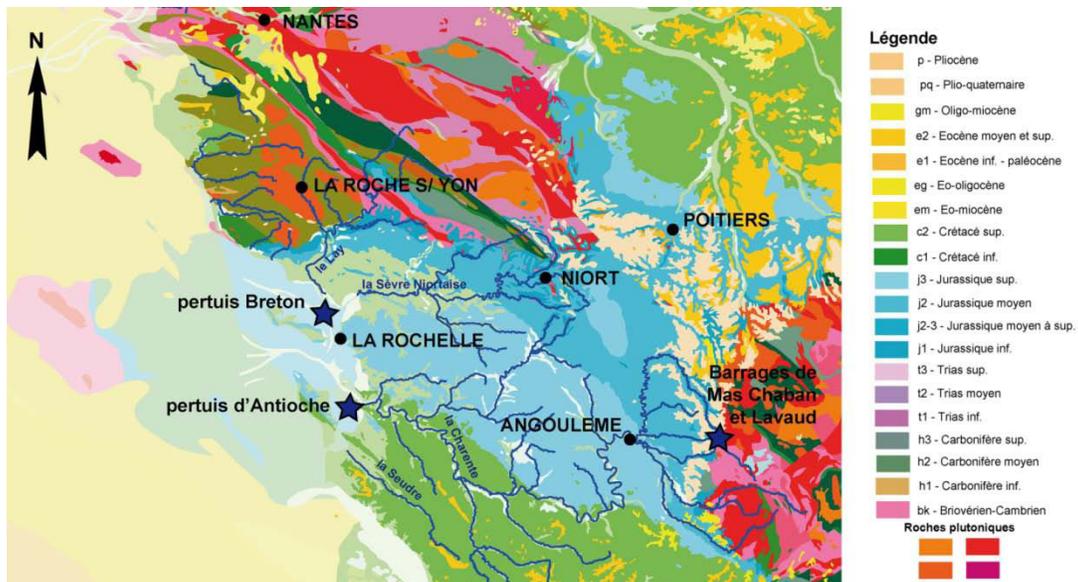


Figure 3-11 : Extrait de la carte géologique de la France au 1:1 000 000 / Côtes vendéennes et charentaises et bassins versants du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Charente et de la Seudre

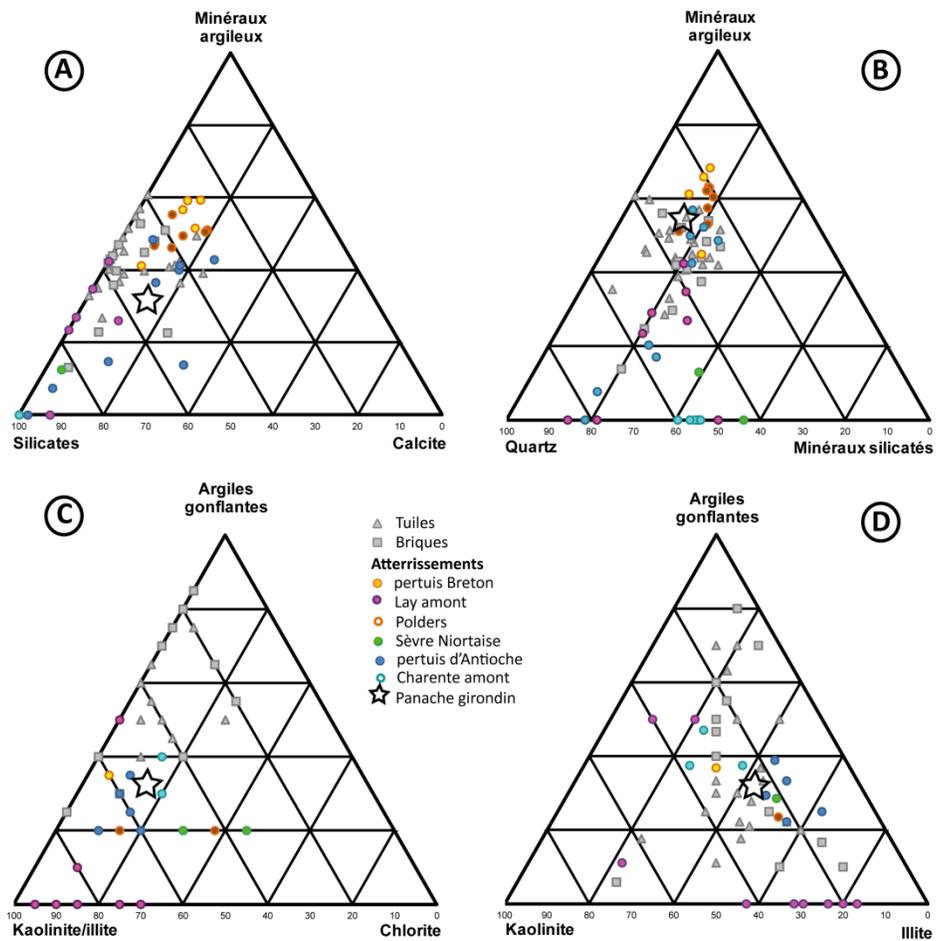


Figure 3-12 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en roche totale des échantillons des pertuis charentais et de leurs bassins versants associés comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).

Les compositions des pertuis Bretons et d'Antioche (Figure 3-12) sont très semblables sur le plan minéralogique avec en moyenne 50 % de minéraux argileux, 40 % de minéraux silicatés (dont 20 % pour le quartz) et 10 % de calcite. Les assemblages de minéraux argileux sont également très proches avec 30 % d'argiles gonflantes, 30 % de kaolinite, 30 % d'illite et 5 % de chlorite. La composition minéralogique en roche totale et les assemblages de minéraux argileux des sédiments des pertuis charentais sont relativement proches de ceux du CMR.

Ces compositions des sédiments des pertuis diffèrent de celles des sédiments du Lay amont qui comportent peu de minéraux argileux et pas d'argiles gonflantes. L'aménagement hydraulique pour les besoins en eau constitue des pièges qui limitent les apports en MES de cette zone dans les baies côtières. De même, les sédiments de la Sèvre Niortaise possèdent une teneur en chlorite assez élevée (23 % en roche totale et 30 % de l'assemblage en minéraux argileux) dont la source est attribuée aux roches intrusives du Massif Armoricaïn, mais qui se trouve diluée dans les pertuis.

Les compositions en roche totale des sédiments des polders du marais poitevin (Figure 3-12-A), proches de celles des sédiments du pertuis Breton, permettent d'affirmer que le processus de comblement actuel du pertuis est bien le même que celui du marais poitevin lors de la construction des digues successives pour gagner des terres sur la mer depuis le XIX^{ème} siècle.

Les plus fortes teneurs en quartz (Figure 3-12-B) et en silicates (Figure 3-12-A) pour une partie des sédiments du pertuis d'Antioche peuvent être expliquées par une contribution plus importante des apports marins silto-sableux. Les sédiments du pertuis d'Antioche paraissent être plus carbonatés que les sédiments du pertuis Breton, ce qui peut être expliqué par une contribution en sédiments majoritairement en provenance de formations carbonatées alors que dans le pertuis Breton, la part attribuable aux formations de socle est conséquente (autour de 50 %).

La contribution du panache de la Gironde (marquée d'une étoile dans la Figure 3-12) est proche de celles de la Charente avec un contenu en chlorite légèrement supérieur et des teneurs en smectite légèrement plus faibles. Les teneurs moyennes en argiles gonflantes des sédiments du pertuis d'Antioche reflètent un mélange entre les apports de la Charente, ceux du pertuis Breton et de la Gironde. Selon la position dans la baie, les mélanges peuvent être dominés par les apports de la Charente et du pertuis Breton (faibles teneurs en illite) et d'autres par les apports du panache de la Gironde (plus fortes teneurs en illite). Le faible nombre d'échantillons montre les interactions complexes entre ces trois termes sources en relation avec la dynamique des courants.

Tableau 11 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) du pertuis Breton et de ses bassins versants associés.

	pertuis	Sèvre	Bassin versant Lay			Polder Marais Poitevin		
	Breton	Niortaise	Présence	Moyenne	σ	Présence	Moyenne	σ
	(%) (2 éch.)	(%) (2 éch.)	(%N échantillons)	(%)		(%N échantillons)	(%)	
Quartz	18	35	100	43	19	100	20	5
Minéraux argileux	52	5	67	25	21	100	46	3
Calcite	14	2	42	5	5	100	13	4
Albite	4	28	92	8	7	100	5	1
Orthose	-	-	42	3	4	100	4	0
Microcline	-	3	50	3	4	-	-	-
Mica	7	6	92	9	9	100	6	2
Chlorite	-	23	67	5	5	100	5	1
Dolomite	3	-	25	ε	1	100	2	1
Aragonite	-	-	8	ε	1	67	ε	1
Hematite	-	-	8	ε	1	17	ε	0
Goethite	-	-	8	ε	1	-	-	-
Halite	4	-	8	ε	0	-	-	-

	pertuis	Sèvre	Bassin versant Lay			Polder Marais Poitevin		
	Breton	Niortaise	Présence	Moyenne	σ	Présence	Moyenne	σ
	(%) (2 éch.)	(%) (2 éch.)	(%N échantillons)	(%)		(%N échantillons)	(%)	
Kaolinite	30	15	100	30	12	100	20	0
Illite	30	35	100	42	22	100	45	0
Smectite	35	-	25	9	16	-	-	-
Chlorite	5	30	91	11	9	100	15	0
Interst. I/S	-	-	17	5	14	100	20	0
Interst. C/S	-	20	8	4	14	-	-	-

Tableau 12 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) du pertuis d'Antioche, de ses bassins versants associés et du bassin d'Arcachon.

	pertuis d'Antioche			Bassin versant Charente			Bassin d'Arcachon		
	Présence (%N éch)	Moyenne (%)	σ	Présence (%N éch)	Moyenne (%)	σ	Présence (%N éch)	Moyenne (%)	σ
Quartz	100	38	22	100	50	3	100	58	12
Minéraux argileux	89	25	16	-	-	-	100	23	12
Calcite	100	13	9	-	-	-	-	-	-
Albite	89	5	2	100	16	8	100	3	1
Orthose	22	ϵ	3	75	12	14	50	2	2
Microcline	78	4	3	75	10	10	67	4	4
Mica	100	7	3	100	4	2	100	4	1
Chlorite	89	3	2	100	6	3	100	2	1
Halite	78	2	4	-	-	-	67	ϵ	1
Dolomite	11	ϵ	1	-	-	-	-	-	-
Ankerite	22	ϵ	1	-	-	-	-	-	-
Aragonite	22	ϵ	1	-	-	-	-	-	-
Hematite	33	ϵ	1	-	-	-	-	-	-
Pyrite	22	ϵ	0	-	-	-	67	3	4

	pertuis d'Antioche			Bassin versant Charente			Bassin d'Arcachon		
	Présence (%N éch)	Moyenne (%)	σ	Présence (%N éch)	Moyenne (%)	σ	Présence (%N éch)	Moyenne (%)	σ
Kaolinite	100	17	4	100	24	5	100	20	0
Illite	100	43	4	100	25	6	100	50	0
Smectite	33	3	5	-	-	-	-	-	-
Chlorite	100	13	4	100	19	3	100	20	0
Interst. I/S	100	23	3	-	-	-	100	10	0
Interst. C/S	-	-	-	100	33	5	-	-	-

En conclusion sur les sédiments des pertuis charentais, les atterrissements se situant dans les zones en amont dans les bassins versants avec une influence forte des roches intrusives, que ce soit du massif Armoricaïn ou du massif Central, montrent des compositions plus éloignées de celles du CMR, avec des teneurs en silicates, en chlorites et en illites élevées. Une influence trop importante des apports sédimentaires marins amène à des teneurs en minéraux argileux plus faibles, il conviendra de vérifier l'effet de la distribution granulométrique pour cette interprétation. L'apport sédimentaire des fleuves dont les bassins versants drainent quasi exclusivement des formations sédimentaires paraît fournir des sédiments un peu plus carbonatés sans non plus montrer des teneurs en calcite trop élevées par rapport au CMR, ce qui est plutôt favorable.

Les pertuis sont alimentés par des apports complexes qui contribuent à l'accumulation de sédiments dont les compositions minéralogiques et les assemblages de minéraux argileux sont très proches de ceux du CMR. Cependant, la présence de halite dans les sédiments côtiers actuels des pertuis pourrait s'avérer handicapant pour une valorisation dans l'industrie de la terre cuite. Toutefois, les analyses des sédiments des polders du marais poitevin montrent des compositions similaires à celles du pertuis Breton sans halite, ce qui indique que le lessivage naturel dans les polders arrive à éliminer le sel présent.

2.3.3. Les estuaires, marais et ports

Nous disposons d'échantillons provenant des ports maritimes du Havre et Rouen sur la Seine. Comme ces ports se situent dans l'estuaire de la Seine, nous présentons ces résultats avec ceux de l'échantillon de l'estuaire, prélevé dans le marais Vernier et ceux du cours amont de la Seine, dont la composition minéralogique a été discutée dans le sous-chapitre 2.2.2.

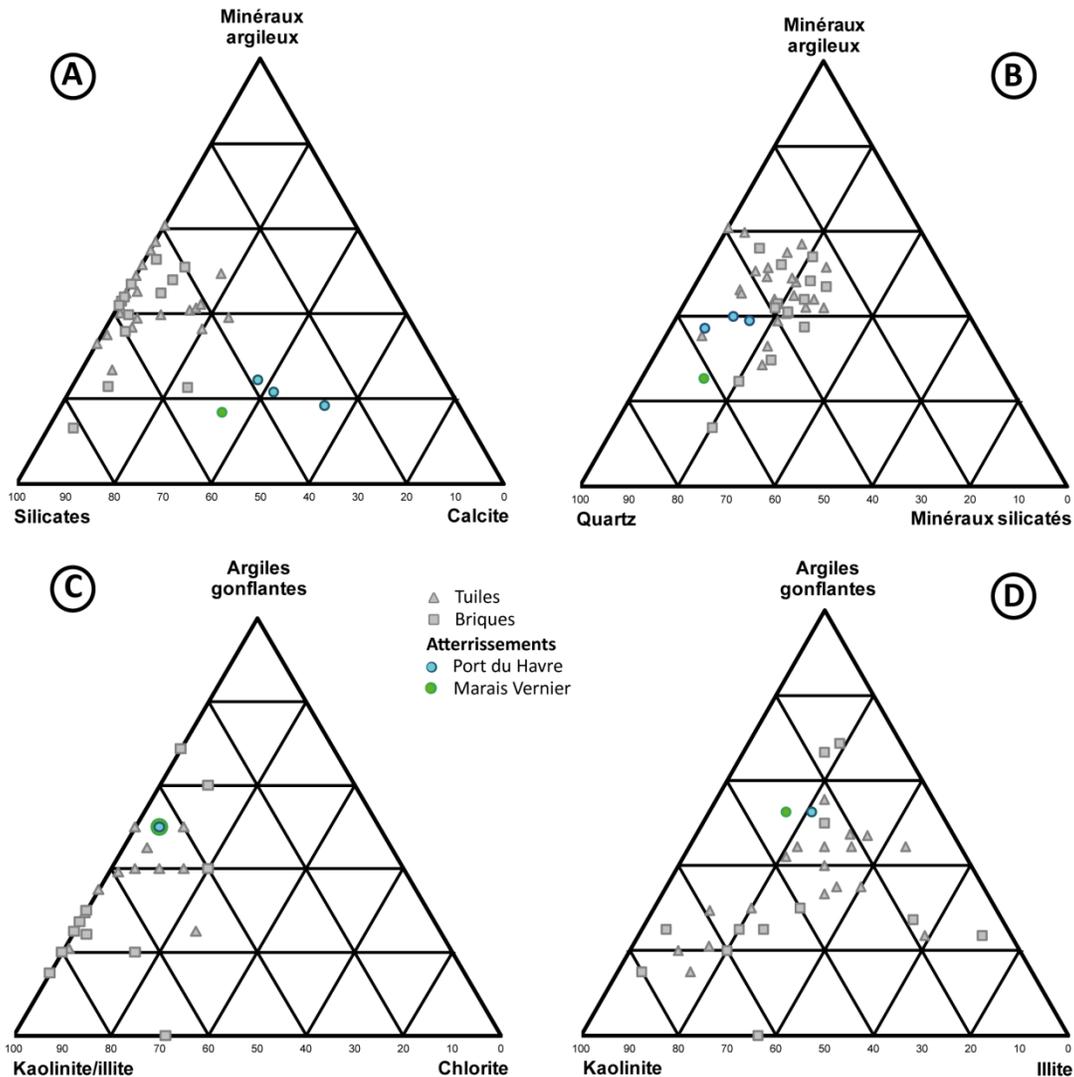


Figure 3-13 : Diagrammes ternaires de composition minéralogique en Roche Totale des échantillons des grands ports maritimes du Havre et marais Vernier comparés au Cadre Minéralogique de Référence (CMR). (détails sur les légendes A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).

La composition minéralogique des sédiments du port de Rouen est dominée par la présence d'oxydes de fer et de nickel (Tableau 13) qui représentent 60 % des minéraux analysés. Une telle composition suggère une fraction granulométrique assez élevée et une large contribution liée à l'activité anthropique. Ce point sera discuté dans le chapitre 4. Les autres minéraux présents correspondent à la calcite (25 %) et au quartz (15 %).

Les sédiments du port du Havre et du marais Vernier présentent des compositions minéralogiques proches de celles des sédiments du bassin versant amont de la Seine (Figure 3-13). Les différences portent sur la présence d'halite liée à l'eau de mer dans laquelle les prélèvements ont été réalisés, et une forte teneur en calcite attribuée aux microorganismes qui vivent dans ces milieux (Figure 3-13-A, Tableau 13). La forte ressemblance entre les assemblages de minéraux argileux des sédiments du port du Havre, du marais Vernier et de ceux du bassin amont de la Seine suggère une faible contribution des apports marins.

L'assemblage en minéraux argileux des sédiments des ports du Havre sont proches de ceux des échantillons industriels du CMR (Figure 3-13-C/D).

Tableau 13 : Composition minéralogique en Roche Totale (tableau du haut) et en minéraux argileux (tableau du bas) des Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre

	Grand Port de Rouen		Grand port du Havre		σ
	(%) 1 éch.)	Présence (%N échantillons)	Moyenne (%)		
Quartz	15	100	23	5	
Minéraux argileux	-	100	18	5	
Calcite	25	100	37	5	
Albite	-	100	3	1	
Aragonite	-	100	7	5	
Muscovite	-	67	ε	1	
Chlorite	-	67	ε	1	
Halite	-	67	9	9	
Dolomite	-	33	ε	1	
Microcline	-	33	ε	2	
Oxyde fer et nickel	60	-	-	-	

	Grand Port de Rouen		Grand port du Havre		σ
	(%) 1 éch.)	Présence (%N échantillons)	Moyenne (%)		
Kaolinite	30	100	25	0	
Illite	15	100	20	0	
Smectite	-	100	10	0	
Chlorite	-	100	5	0	
Interst. I/S	55	100	40	0	

Les analyses sur les échantillons qui nous ont été fournis ne permettent pas de tirer de conclusions sur les sédiments du port de Rouen car nous n'avons pu analyser qu'un seul échantillon dont il est difficile de dire s'il est représentatif ou non des sédiments qui s'accumulent dans le port. D'après les données de dragage, ceux-ci sont essentiellement sableux ce qui expliquerait le très faible taux de minéraux argileux.

La minéralogie des échantillons du port du Havre et du marais Vernier reflète celle des sédiments du bassin amont de la Seine et est proche de celle des échantillons industriels du CMR.

2.3.4. Conclusions sur les apports sédimentaires dans les zones côtières

Les échantillons des baies côtières qui correspondent à de vastes zones intertidales présentent souvent des teneurs élevées en quartz et très faibles en minéraux argileux. Cette distribution minéralogique est attribuée aux effets de tri des courants tidaux qui évacuent vers le large les particules fines. Les sédiments riches en minéraux argileux se retrouvent dans les zones les plus abritées (fond de baie, estuaire barré par un ouvrage). L'analyse de la composition des assemblages argileux est moins sensible à ces effets de tri et les assemblages sont comparables entre sites d'une même baie.

Les données des différentes baies indiquent une signature largement dominée par les apports fluviaux des bassins versants à l'aval des derniers ouvrages à laquelle s'ajoute celle des apports de la dérive littorale.

L'ensemble des sédiments des baies qui contiennent des proportions de minéraux argileux suffisantes (Estuaire de la Rance, pertuis Breton et d'Antioche) présentent des compositions minéralogiques et des assemblages argileux proches de ceux des échantillons industriels du CMR.

3. Comparaison des évaluations par le CMR et l'approche classique

Nous présentons dans ce chapitre une comparaison des résultats obtenus par le CMR avec ceux de l'approche classique de l'industrie de la terre cuite plus complète afin d'évaluer la fiabilité de l'évaluation à partir du CMR et les tests complémentaires à conduire.

3.1. Evaluation des sites à partir de l'approche classique

L'approche classique, présentée dans le chapitre 1, s'appuie sur des analyses géochimiques et granulométriques et sur des essais matériaux, comportement au façonnage, au séchage et à la cuisson et résistance mécanique.

Sur l'ensemble des systèmes fluviaux et côtiers retenus dans le cadre de cette thèse, nous avons conduit ces analyses sur les 56 échantillons pour lesquels nous disposons d'un volume suffisant de matériel (20 kg).

3.1.1. Les données géochimiques, le diagramme d'Augustinik

Les analyses chimiques ont été réalisées sur l'ensemble des échantillons prélevés car elles nécessitent un faible volume de matériaux. Nous avons utilisé une sonde portable XRF qui permet une mesure directe, rapide et non destructive sur les sédiments. La méthode d'acquisition des données a été développée au Centre de Géosciences de MINES ParisTech au cours de la thèse de Gillot (2014) et de ce travail. La mise en place du protocole et la validation par comparaison avec les résultats d'analyses par ICP-AES est présentée en annexe 5.

Les analyses par XRF offrent une qualité d'analyse tout à fait acceptable pour la démarche de caractérisation (précision de l'ordre de $< 0,04\%$ pour la plupart des éléments chimiques et un peu moins précise pour le Si et l'Al respectivement de $0,6\%$ et 1%). Certains éléments légers (Na, Mg,...) ne sont pas analysés par la sonde XRF. Cependant, la comparaison avec les données ICP-AES montre qu'ils ne représentent qu'un très faible pourcentage de la composition totale pour le Mg ($< 2\%$ pour la majorité) des sédiments lorsqu'ils sont présents et est évaluable par la présence de halite dans la composition minéralogique pour le Na.

Parmi l'ensemble des sites étudiés, plusieurs fournissent des valeurs dont la projection dans le diagramme d'Augustinik **se situe dans les domaines des briques, tuiles et produits creux** (Figure 3-14) :

- dans les systèmes fluviaux, les différents échantillons de sédiments du bassin versant de la rive droite de la Garonne appartiennent au domaine des briques de construction et pour ceux de la Truyère (retenue de Grandval) au domaine des tuiles. Dans le bassin versant de la Seine, les données des échantillons en provenance de l'Yonne amont et ceux de la Seine amont (Lac d'Orient, d'Auzon-Temple et du Der) sont projetés dans le domaine des briques de construction ;
- dans les baies côtières et estuaires, les valeurs des échantillons du bassin d'Arcachon et des pertuis d'Antioche et Breton (à l'exception des échantillons de l'estuaire du Lay) appartiennent au domaine des briques creuses.

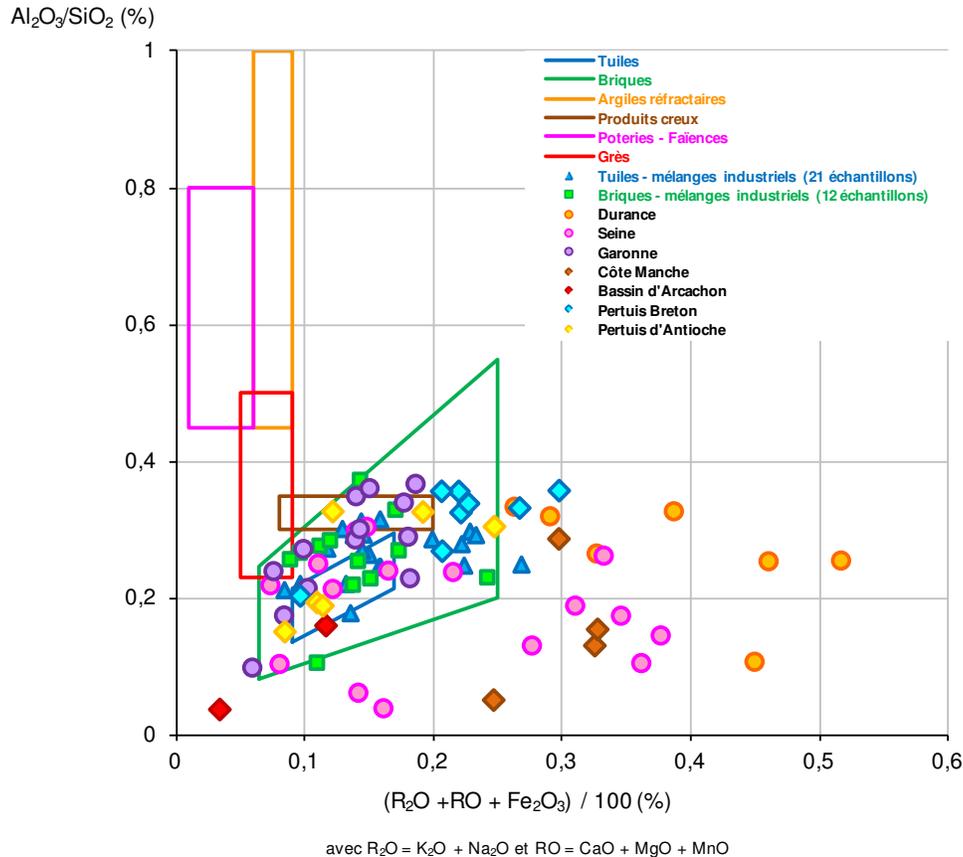


Figure 3-14 : Diagramme Augustinik des sédiments prélevés dans le cadre de cette thèse pour des essais matériaux. Les données par site sont fournies dans l'annexe 8.

Plusieurs sites au sein d'un système où souvent d'autres sites se projettent dans les domaines de l'industrie possèdent des valeurs qui les **excluent des domaines du diagramme d'Augustinik** que ce soit par :

- de fortes valeurs du rapport Al_2O_3/SiO_2 sur quelques sites du bassin versant du Tarn et de l'Aveyron (retenue de Pareloup et ceux de la retenue de Ravières sur l'Agout) et de faibles valeurs dans l'estuaire de la Sélune (baie du Mont-Saint-Michel), la Seine amont (lac du Der) et son estuaire, le Lay amont ;
- de fortes valeurs du rapport des éléments majeurs $(R_2O+RO+Fe_2O_3)$ s'observent le long de la Durance, dans les baies du Mont-Saint-Michel et de Somme, dans l'estuaire du Lay, sur la Charente amont, la Seine amont (lac du Der) et son estuaire.

Les valeurs élevées des rapports Al_2O_3/SiO_2 peuvent s'expliquer soit par des sédiments de très faible granulométrie, donc contenant peu de quartz, ou des teneurs en minéraux argileux un peu forte. Au contraire, les valeurs faibles reflètent souvent une granulométrie plus grossière, riche en quartz.

Les fortes valeurs du rapport en éléments majeurs traduisent très souvent une teneur élevée en calcite.

3.1.2. La distribution granulométrique, le diagramme de Winkler

La distribution granulométrique est importante dans la réalisation du mélange de production de l'industrie de la terre cuite comme évoqué dans le chapitre 1 de cette thèse.

Cependant, dans le cadre de cette étude, même si nous avons essayé de prélever des échantillons représentatifs des atterrissements, une étude granulométrique beaucoup plus détaillée est indispensable à la caractérisation précise de la variabilité sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs km². La connaissance de la distribution granulométrique permet néanmoins une comparaison avec celles présentées dans le diagramme de Winkler (Winkler, 1954) qui fournit une première évaluation des caractéristiques des sédiments prélevés.

Les analyses granulométriques ont été réalisées sur les échantillons dont nous possédions de larges volumes, en choisissant un échantillon par site (56 échantillons). La projection des analyses sur le diagramme ternaire de Winkler, montre :

- des systèmes avec des granulométries assez homogènes. Par exemple les échantillons des retenues de la Durance montrent tous des granulométries très fines, même trop fines pour la fabrication de tuiles. Celles du pertuis Breton se situent dans le domaine des tuiles, celles du bassin versant de la Garonne dans le domaine des briques creuses, et du bassin d'Arcachon dans celui des briques pleines ;
- des systèmes au sein desquels les variations de distribution granulométriques sont importantes. On trouve la Seine, les baies de la Manche et le pertuis d'Antioche.

Ces répartitions granulométriques peuvent en fait cacher des biais d'échantillonnage. C'est notamment le cas pour les sédiments prélevés dans les retenues de Bort les Orgues (Dordogne) et de Saint Etienne Cantalès (Cère) dont les niveaux d'eau lors de l'échantillonnage ne permettaient pas un prélèvement suffisamment central dans les retenues et qui présentent des granulométries très fortes.

De même les sédiments de certaines baies présentent une grande variabilité alors que les données d'autres baies sont relativement homogènes. Le faible nombre d'échantillons ne permet pas de trancher entre un biais d'échantillonnage ou une dynamique spécifique.

Les données du diagramme de Winkler (Figure 3-15) doivent être prises avec précaution, plus comme des indicateurs que des valeurs de référence.

La distribution granulométrique peut aussi être un indice des sources des sédiments transportés et stockés dans les retenues. En effet, les sédiments provenant de l'érosion du socle (Serre-Ponçon pour la Durance, le sous-bassin de l'Yonne pour la Seine...) présentent de manière générale une distribution granulométrique plus forte que ceux provenant de l'érosion de formation sédimentaire (Cadarache et Castillon pour la Durance, Seine amont).

La distribution granulométrique peut également refléter la dynamique des milieux. Les atterrissements côtiers soumis à l'action répétée des marées sont très bien triés et présentent des distributions granulométriques fortes comme observés dans les baies de Somme et du Mont-Saint-Michel, dans le

bassin d'Arcachon et dans une partie du pertuis d'Antioche, en particulier à proximité de la passe entre la pointe sud de l'île d'Oléron et La Tremblade, où l'hydrodynamisme locale est fort. Dans ces milieux, une distribution granulométrique fine est synonyme d'un milieu de dépôts calmes et protégés comme l'Anse de l'Aiguillon dans le pertuis Breton.

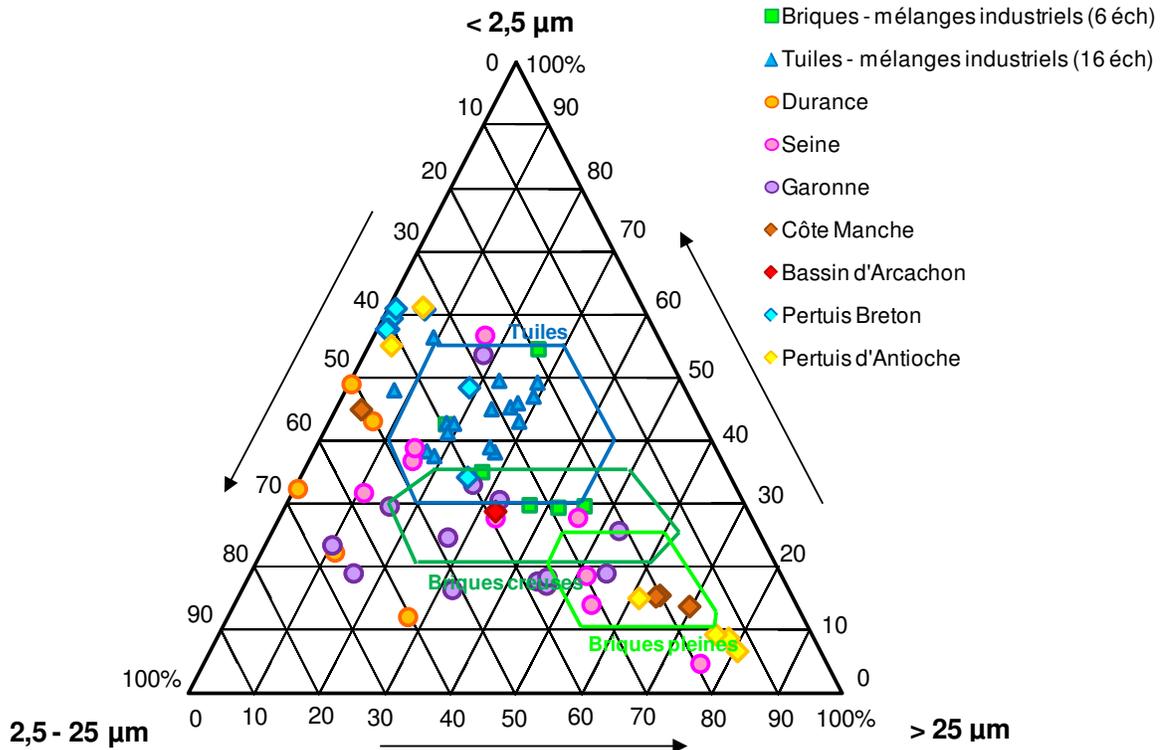


Figure 3-15 : Diagramme de Winkler des sédiments prélevés dans le cadre de cette thèse pour des essais matériaux. Les données par site sont fournies dans l'annexe 8.

Les analyses préliminaires, granulométriques et chimiques, permettent de faire des choix sur les sédiments pouvant être inclus dans un mélange de production mais les essais de façonnage reste une étape indispensable à la validation d'une matière première. Pour certains échantillons testés, il était prévisible par la composition chimique et/ou par la distribution granulométrique qu'ils ne pourraient pas être extrudés dans l'état ou avec de grandes difficultés. Cependant, ce n'est pas toujours le cas.

3.1.3. Le façonnage

Les extrusions ont été réalisées à partir de sédiments secs afin de maîtriser la teneur en eau de la pâte argileuse que l'on souhaite obtenir. Le sédiment sec est passé au concasseur et au broyeur dans le but d'éliminer les éléments trop grossiers. Ensuite, une pâte est obtenue par malaxage avec ajout d'eau (appelée eau de façonnage) jusqu'à l'obtention un mélange plastique.

Certains des échantillons prélevés étant très proches les uns des autres en compositions chimique, minéralogique et granulométrique, les tests d'extrusion ont été effectués sur 48 des 56 échantillons.

L'extrusion n'a pas été possible sur les échantillons en provenance des :

- systèmes fluviaux (N=14)
 - des retenues de Serre-Ponçon (Durance) ;
 - de celles du bassin versant de l'Yonne (sédiments provenant du massif du Morvan) ;
 - des grands ports maritimes de Rouen et du Havre (sédiments considérés comme contaminés (Port-de-Rouen, 2007) - polluants organiques et métaux) ;
 - des retenues des bassins versants de la Dordogne et du Tarn ;
 - un échantillon de la retenue de Grandval et celle de Montézic (Garonne, sous-bassin Truyère).
- baies côtières estuariennes (N=7)
 - du bassin d'Arcachon ;
 - de la baie du Mont-Saint-Michel ;
 - les retenues de la Charente (fleuve se jetant dans le pertuis d'Antioche).

Des éprouvettes de qualité acceptable, mais présentant un écaillage ont été réalisées à partir de :

- l'échantillon de la retenue de Castillon (Verdon) ;
- l'échantillon de la baie de Somme.

Des **éprouvettes de qualité moyenne**, nécessitant beaucoup d'eau de façonnage ont été réalisées à partir de la retenue de Sarrans (Garonne, sous-bassin Truyère).

L'extrusion a fourni des **éprouvettes de bonne qualité** à partir des échantillons

- Systèmes fluviaux (N=12)
 - de la retenue de Cadarache (Durance) ;
 - de ceux des retenues du bassin versant de la Seine amont, (lac d'Orient et un mélange de deux échantillons du lac du Der) ;
 - de l'estuaire de la Seine (marais Vernier) ;
 - du Grand Port Maritime du Havre (sédiments clapables et ceux des chambres de dépôts) ;
 - de la retenue de Grandval (Garonne, sous-bassin Truyère) ;
 - de la retenue de Pareloup (Garonne, sous-bassin Aveyron).
- Baies côtières estuariennes (N=11)
 - Estuaire de la Rance ;
 - pertuis Breton, y compris les zones estuariennes et les polders ;
 - pertuis d'Antioche, extrusion facile et bonne plasticité lors du façonnage.

Parmi les échantillons prélevés, seulement la moitié ont pu être extrudés, bien que les données du diagramme d'Augustinik ou de Winkler montraient des compositions élémentaires et des granulométries favorables (bassin d'Arcachon, Tarn, un échantillon de la retenue de Grandval sur la Truyère et sous-bassin de l'Yonne). Ce point sera discuté avec les données minéralogiques.

3.1.4. Le comportement au séchage

Dans le processus de fabrication de produits en terre cuite, le séchage constitue une étape importante qui a pour but d'évacuer la majeure partie de l'eau présente dans le mélange afin de pouvoir permettre leur cuisson. Il est donc primordial de connaître le comportement au séchage de la matière première que l'on utilise afin de maîtriser cette étape de la fabrication.

La courbe de Bigot (Kornmann, 2006) permet de quantifier le retrait des éprouvettes et le départ des eaux colloïdale et d'interposition au cours du séchage grâce à un barrélatographe. Celui-ci mesure la perte d'humidité (en pourcentage du poids) en fonction du retrait (en pourcentage de la longueur sèche) :

- au début du séchage, la courbe décroît linéairement. Les molécules d'eau migrent à la surface et s'évaporent mais l'eau est toujours présente dans les pores. L'eau éliminée lors de cette phase est l'eau colloïdale c'est-à-dire celle qui permet d'ajuster la plasticité de l'argile ;
- puis, les grains se rapprochent progressivement jusqu'à se toucher tout en éliminant l'eau présente dans les pores appelée eau d'interposition. Les pores se remplissent ensuite progressivement de bulles d'air. Le volume reste constant, une fois que les particules se touchent.

Nous avons conduit ce test sur les sédiments qui ont pu être extrudés et pour lesquels nous disposons de barrettes témoin. Les tests sont illustrés à partir d'un exemple sur les sédiments du système Durance, avant de présenter l'ensemble des résultats.

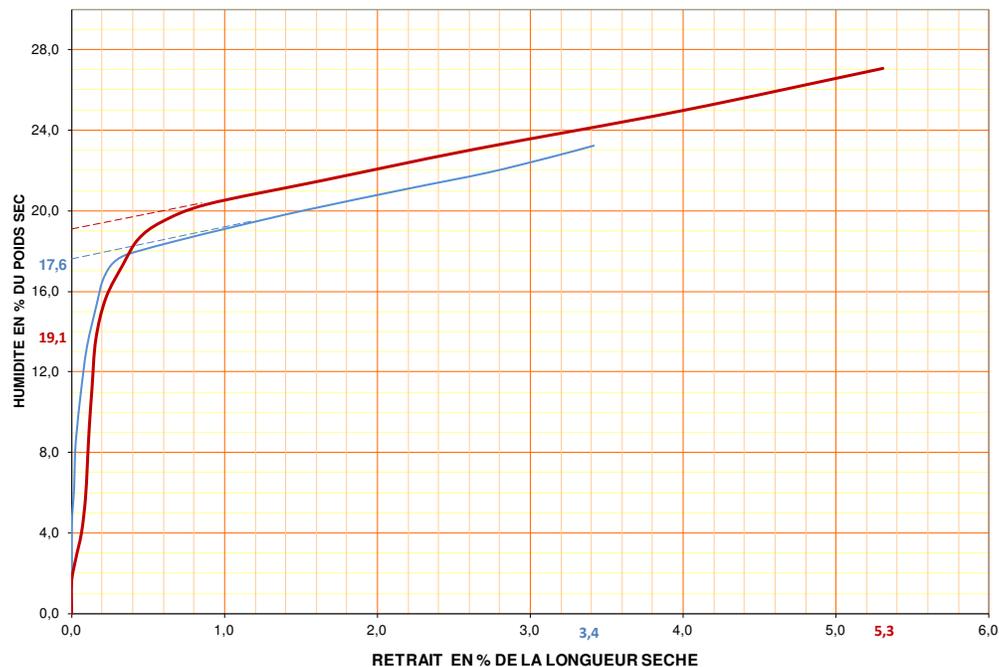


Figure 3-16 : Courbe de Bigot des sédiments de Cadarache (courbe rouge) et de Castillon-Verdon (courbe bleue)

Les courbes de Bigot (Figure 3-16) montrent des retraits moyens (5,3 %) voire faibles (3,4 %) malgré une teneur en eau de façonnage élevée. La pente est relativement faible. Toutefois, la zone intermédiaire de la courbe est courte et l'eau d'interposition part majoritairement sans retrait. L'allure générale des courbes ne laisse pas présager de difficulté au séchage.

Une synthèse des résultats du comportement au séchage de l'ensemble des échantillons est présentée dans le tableau ci-dessous, les courbes de Bigot sont fournies par système sédimentaire en Annexe 8.

Généralement, le retrait moyen au séchage des mélanges industriels de production est d'environ 5 %. L'industrie favorise aussi les mélanges de production avec une pente de départ de l'eau colloïdale la plus forte possible, signifiant que cette eau part très facilement et avec un retrait faible. Les retraits de l'eau colloïdale autour de 6-7 % observés sur les échantillons de la Seine amont, dans l'estuaire de la Rance, et au sein des pertuis Breton et d'Antioche sont donc considérés comme forts. Les retraits plus faibles observés sur les sédiments sont trouvés sur les systèmes durancien et de l'Aveyron. Les retraits associés au départ de l'eau colloïdale et d'interposition varient entre 1 et 13 %. Il est parfois difficile, lorsque la zone intermédiaire de la courbe n'est pas bien définie, de déterminer le retrait d'eau d'interposition.

Le retrait de séchage doit être le plus faible possible pour maîtriser la forme du produit. Le départ d'eau doit se faire au maximum sans retrait. Inversement, plus il y a de l'eau d'interposition, plus il faudra fournir de l'énergie pour l'enlever.

Le Tableau 14 présente les moyennes de retraits et d'eau interposition par systèmes ce qui permet une interprétation sur le comportement au séchage en fonction de la composition minéralogique de ces systèmes.

Tableau 14 : Comportement au séchage des sédiments par systèmes sédimentaires comparé aux teneurs en minéraux argileux, en smectites et en interstratifiés Illite-Smectites qui peuvent absorber de grandes quantités d'eau au façonnage.

Système	Durance	Seine amont	Truyère	Aveyron	pertuis Breton	Bassin versant Lay	Polder	pertuis Antioche	Somme	Rance
Retrait de séchage (en % de la longueur sèche)	4	6	5	3	12	7	7	7	3	7
Eau en fin de retrait (en % de la masse sèche)	1	3	7	2	6	4	6	4	5	15
Teneur en minéraux argileux	20	27	25	22	52	25	46	25	0	23
Teneur en smectite	13	10	0	0	35	9	0	3	0	0
Teneur en I/S	23	24	26	0	0	5	20	23	20	20

Les plus faibles retraits sont observés pour les sédiments présentant les teneurs en smectite les plus faibles et vice versa. La teneur en interstratifiés illite/smectite paraît avoir une influence sur le séchage certainement liée à la présence de smectite.

3.1.5. Le comportement à la cuisson

Suite à l'étape du séchage, les produits sont cuits à haute température pour céramiser la pâte argileuse. Lors de cette cuisson, le sédiment mis en forme subit au cours de la montée en température différentes transformations minéralogiques qui peuvent aller jusqu'à la fusion. Afin d'évaluer les transformations du mélange, plusieurs mesures sont effectuées à différentes températures de cuisson : le retrait à la cuisson, la perte au feu, la densité et l'absorption d'eau (essais "cuisson-mesure").

La cuisson des éprouvettes est réalisée à différentes températures de paliers : cuisson à une température donnée au sein d'un four à moufle qui permet d'obtenir une température homogène et de gérer la cuisson avec une montée en température de 100 °C/h. L'échantillon est maintenu à la température choisie pendant 2 h puis le refroidissement se fait lentement par inertie du four.

La première température de cuisson se situe à 850 °C, correspondant à une température de cuisson basse pour des produits de terre cuite (plutôt proche de celle des briques). Les tests de cuisson s'étendent ensuite jusqu'à 1 150 °C (plus proche de celle des tuiles), si le sédiment ne fond pas à une température inférieure. Seul l'échantillon de Cadarache a été testé à 1 200 °C.

Nous illustrons les résultats du comportement à la cuisson des sédiments à partir des échantillons de Cadarache et de Castillon-Verdon. Les résultats complets des cuissons mesures sont présentés par systèmes sédimentaires en Annexe 8.

L'absorption d'eau, tout comme la densité permet d'estimer la porosité du produit à différentes températures et ainsi d'évaluer sa qualité en fonction du type de produit souhaité, plus poreux pour les briques destinées à être enduites et moins pour les tuiles.

Le retrait à la cuisson est tout comme le retrait au séchage une caractéristique à maîtriser, d'autant plus importante de nos jours où les produits doivent être les plus homogènes possibles en terme de dimensions notamment pour la pose de brique à joint mince et l'emboîtement des tuiles les unes sur les autres. En effet, les fours industriels étant de très grandes tailles et les wagons étant constitués d'un empilement de produits, il peut y avoir des variations de températures de cuisson et en fonction de la position des produits lors de ce processus de cuisson qui peuvent être de l'ordre de plusieurs dizaines de degrés Celsius. Par conséquent, il n'est pas nécessaire que le retrait soit nul à la température de cuisson choisie mais plutôt que ce retrait soit homogène sur un large palier de températures de cuisson permettant ainsi de s'affranchir des variations de températures internes au four et d'avoir des produits de tailles homogènes.

Dans la Figure 3-17, les sédiments de Cadarache et du Verdon présentent un **retrait à la cuisson** qui est relativement stable entre 850 à 1 100 °C, respectivement autour de 4 et -1 %. On observe un léger gonflement pour les sédiments du Verdon, qui très certainement lié à la présence élevée de calcite. Au delà de 1 100 °C, le retrait augmente rapidement et à 1 200 °C, il y a fusion de l'éprouvette pour les sédiments de Cadarache, les autres sédiments n'ayant pas été testés à cette température.

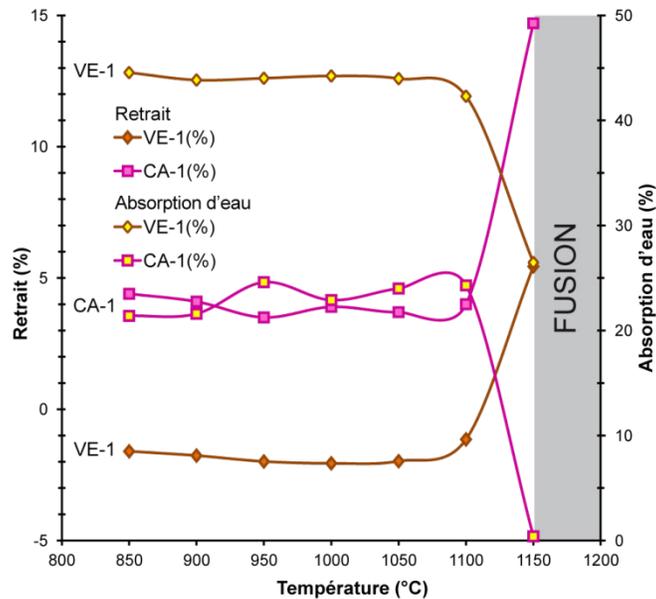


Figure 3-17 : Comportement à la cuisson des sédiments de Cadarache (CA-1) et de Castillon-Verdon (VE-1)

Tout comme pour le retrait au séchage, le retrait à la cuisson est un peu plus important pour les sédiments de Cadarache que ceux du Verdon. Ces sédiments montrent des comportements à la cuisson plutôt compatibles avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite. Les pourcentages assez élevés d'absorption d'eau (>20 %) indiquent une porosité relativement élevée et suggèrent plutôt une utilisation pour la fabrication de briques à enduire.

Sur l'ensemble des éprouvettes analysées :

- les sédiments du bassin versant de la Seine amont montrent une stabilité du retrait à la cuisson jusqu'à 1 050 °C. Cependant les éprouvettes s'écaillent après la cuisson, ce qui peut être dû notamment aux fortes teneurs en calcite qui provoque des efflorescences et l'apparition de grains de chaux fragilisant le tesson. L'absorption d'eau n'a d'ailleurs pas pu être testée ;
- les sédiments extrudés du port du Havre montrent aussi une stabilité du retrait à la cuisson jusqu'à 1 050 °C que ce soit les sédiments clapables ou ceux de la chambre de dépôts. Les retraits sont faibles de l'ordre de 0 à 1 %. Par contre, les taux d'absorption d'eau ne présentent pas de réels paliers et sont plus variables autour de 28 et 35 % ;
- les sédiments de la baie de Somme montrent un gonflement des éprouvettes qui peut être dû à la teneur en calcite élevée et à la faible cohésion principalement assurée par l'eau de façonnage entre des particules relativement grossières ;
- les sédiments de l'estuaire de la Rance montrent une stabilité du retrait et de l'absorption d'eau jusqu'à 1 000 °C ;
- enfin les sédiments du pertuis Breton, du pertuis d'Antioche, du bassin versant du Lay et des polders du Marais Poitevin montrent aussi une certaine stabilité des retraits à la cuisson jusqu'à 1 000 °C et un peu plus pour les échantillons fluviaux. Au-delà, on observe un retrait plus important lié à un début de fusion de certains minéraux (illite) ;

- les sédiments du bassin versant de la Garonne montrent les retraits à la cuisson et les absorptions d'eau les plus instables mis à part les sédiments prélevés dans la retenue de Pareloup (d'origine de formations sédimentaires) stables jusqu'à 1 100 °C.

3.1.6. La résistance mécanique

Après refroidissement, le produit a atteint ses caractéristiques finales. La résistance mécanique est une de ces caractéristiques finales importantes, surtout pour les briques. Un test relativement simple de résistance mécanique est mis en œuvre afin de l'évaluer : la résistance à la flexion 3 points, réalisé sur une presse LFPlus - Lloyd Instruments LTD au CTMNC.

Seuls les sédiments ne montrant pas de faiblesse à l'œil nu ont été soumis aux tests de résistance. Les éprouvettes présentant des défauts, écaillages, fissures lors du façonnage, du séchage ou de la cuisson ont une résistance affaiblie qui n'est pas acceptable pour un produit industriel.

Ces tests sont réalisés sur les éprouvettes non cuites dites "sèches" et sur au moins une éprouvette soumise à une température de cuisson égale à 950 °C et parfois à 1 000 °C ou à 1 100 °C. L'ensemble des résultats sont présentés par systèmes sédimentaires dans l'annexe 8.

Les éprouvettes de Castillon-Verdon ont montré un écaillage important lors du façonnage et du séchage et n'ont donc pas été testées. Les tests réalisés sur les éprouvettes de Cadarache présentent des résultats tout à fait satisfaisants avec une résistance moyenne en cru de l'ordre de 5 MPa égale à la valeur moyenne des mélanges de production, et élevée de l'ordre de 30 MPa entre 950 et 1 100 °C, nettement supérieure à la valeur minimum prise comme référence pour le test tel qu'effectué au laboratoire sur des mélanges de production de 10 MPa en cuit.

Les éprouvettes des autres atterrissements montrent des résultats comparables :

- pour l'estuaire de la Rance, résistance élevée à 1 100 °C ce qui est principalement dû au début de fusion des éprouvettes ;
- observations similaires pour les sédiments du pertuis Breton, la résistance à 950 °C est tout à fait acceptable pour la plupart des échantillons du pertuis Breton (entre 10 et 25 MPa) sauf pour les sédiments de la sortie de l'estuaire du Lay qui présentent des teneurs en halite assez élevées qui provoquent des efflorescences de sel importantes fragilisant le tesson dans son ensemble et qui n'ont pas permis le test ;
- pour le pertuis d'Antioche, résistances mécaniques tout à fait acceptables à 950 °C (14 et 27 MPa) et élevées à 1 100 °C (40 et 57 MPa) ce qui suggère un début de fusion ;
- les sédiments du port du Havre montrent des résistances mécaniques faibles pour les sédiments clapables et limites pour ceux de la chambre de dépôts ;
- enfin, les sédiments du bassin versant de la Garonne montrent des résistances quasi nulles dans l'ensemble après une cuisson à 950 °C et qui augmentent ensuite rapidement à une cuisson à 1 100 °C pour les sédiments de la Truyère (retenue de Grandval et de Sarrans) mais reste nulles pour les sédiments de Pareloup.

3.2. Comparaison entre les deux approches

La comparaison qui est menée l'est dans le contexte de l'évaluation du potentiel d'un atterrissement de sédiments fins en vue d'une utilisation par l'industrie de la terre cuite. Nous essayons d'évaluer si les conclusions tirées du CMR constituent un guide fiable pour entreprendre ou non des analyses et essais complets dans l'objectif d'une valorisation par l'industrie.

- La **comparaison des données géochimiques** et minéralogiques n'est pas directe car des combinaisons minéralogiques différentes peuvent donner des résultats similaires : Ex Serre-Ponçon riche en silicates et pauvre en minéraux argileux et en calcite est projeté sur le diagramme d'Augustinik dans une position proche, voire plus favorable, que celle de l'échantillon de Cadarache très riche en calcite avec des teneurs en silicates acceptables et pauvre en minéraux. Cependant, les données minéralogiques peuvent dans certains cas expliquer facilement qu'un sédiment soit plus ou moins éloigné des domaines définis par Augustinik et des compositions des mélanges de production. En effet, la présence de minéraux comme l'halite, la calcite et bien d'autres fait augmenter les concentrations respectivement en Na et en Ca. C'est ce qui ressort par exemple pour l'échantillon à la sortie de l'estuaire du Lay qui est chargé en halite ou pour les sédiments de la Seine amont qui présentent des teneurs élevées en calcite. De même, une teneur en quartz élevée et/ou une teneur en minéraux argileux très faible donnera un rapport Al_2O_3/SiO_2 très faible comme on peut le voir pour les sédiments prélevés dans le bassin d'Arcachon.
- **Les données granulométriques** sont absentes des déterminations minéralogiques. Cependant elles peuvent être appréhendées à partir de la teneur en quartz des sédiments. Le quartz se présente généralement sous forme de grains (limons, sables) et l'on peut proposer d'associer les fortes valeurs à des granulométries plus élevées. Cette proposition doit être tempérée par la présence de silicates qui peut également contribuer à la teneur en SiO_2 . Ainsi les échantillons du sous-bassin versant de l'Yonne ont une granulométrie un peu élevée qui est liée notamment à la teneur en quartz mais aussi en minéraux silicatés élevée. Par contre, les échantillons prélevés dans la baie de Somme ou la zone sud du pertuis d'Antioche présentent aussi une granulométrie élevée mais liée seulement aux teneurs en quartz qui dominent leur composition.
- **La plasticité** qui permet l'extrusion est reliée à la granulométrie de l'échantillon et à sa composition minéralogique. De faibles teneurs en minéraux argileux et des proportions élevées en chlorite et illite rendent difficile l'extrusion d'autant plus si elles sont associées à des distributions granulométriques élevées. Une faible teneur en minéraux argileux peut toutefois être compensée par une excellente composition en minéraux argileux (absence de chlorite, mélange de kaolinite, illite et argiles gonflantes). La kaolinite apporte la plasticité à la pâte argileuse et semble augmenter la cohésion entre les particules. De même, les argiles gonflantes (smectites et interstratifiés illites/smectites) apportent de la plasticité à la pâte argileuse mais rendent l'étape du séchage plus difficile comme nous le verrons par la suite. Par exemple, malgré une composition chimique et une distribution granulométrique proche de celles des mélanges industriels, les sédiments de Serre-Ponçon n'ont pas pu être extrudés à cause de leur faible teneur en minéraux argileux qui est en plus dominée par la chlorite et l'illite dans son assemblage. *A contrario*, la teneur un peu faible en minéraux argileux de l'échantillon de la

retenue de Pareloup (Aveyron) est compensée par la qualité de son assemblage en minéraux argileux et qui permet une bonne plasticité.

- **Le retrait au séchage** est influencé par la teneur et la nature des minéraux argileux présents dans les sédiments mais aussi par la distribution granulométrique. Une teneur élevée en smectite et interstratifiés illite-smectite est à l'origine d'un besoin relativement important en eau de façonnage (retenue de Sarrans sur la Truyère). Une faible teneur en minéraux argileux associée à la grande finesse de l'échantillon sont très certainement à l'origine des difficultés de départ de l'eau colloïdale au début du séchage (Cadarache sur la Durance). Cependant l'assemblage minéralogique avec une forte proportion d'illite et de kaolinite permet d'atténuer l'influence des smectites en permettant un départ rapide de l'eau d'interposition (Cadarache). Enfin, la présence de chlorite en plus grande quantité doit avoir un effet sur le retrait (Cadarache vs Verdon).
 - Ces résultats montrent qu'il existe une corrélation entre les teneurs en minéraux argileux et le retrait de séchage. La smectite présente notamment l'avantage d'augmenter la plasticité du mélange mais aussi, comme évoqué précédemment, l'inconvénient d'absorber l'eau entre ses feuillets et de la restituer lors du chauffage et de la cuisson ce qui provoque le retrait. Ainsi, il n'est pas étonnant que les sédiments ayant le plus grand retrait de séchage soient ceux du pertuis Breton, puisqu'il s'agit aussi des sédiments qui ont la plus forte teneur en minéraux argileux (environ 50 %) ainsi que la plus forte teneur en smectite dans l'assemblage des minéraux argileux (environ 35 % de l'assemblage) soit presque 20 % de la roche totale. Des teneurs élevées en smectites et interstratifiés illite-smectite se retrouvent dans d'autres atterrissements comme dans ceux du bassin versant de la Durance mais la teneur plus faible en minéraux argileux permet au retrait d'être plus limité. Pour des teneurs en interstratifiés illite-smectite et en smectites égales, le retrait sera plus important pour le sédiment composé seulement de smectites, ce qui montre que le retrait est fortement lié à la teneur en smectite même au sein d'un interstratifié.
- **Le retrait à la cuisson** est influencé notamment par la présence d'illite au fort caractère fondant. Lorsqu'elle représente au moins un quart de l'assemblage en minéraux argileux, elle produit un retrait progressif lors de la cuisson en accentuant le caractère fondant du mélange (retenue de Grandval sur la Truyère).
- La présence d'illite, de par son caractère fondant, diminuera aussi l'absorption d'eau comme nous pouvons le voir avec les sédiments de Cadarache. Cette absorption d'eau peut être très variable (sédiments du port du Havre) si la pâte argileuse a des teneurs en smectites et d'interstratifiés illite-smectite élevées car ces dernières absorbent l'eau de façonnage et la redistribuent pendant le séchage et la cuisson ce qui amplifie de manière non homogène le caractère fondant et gonflant de la pâte. La finesse des particules du mélange permet aussi une bonne agglomération et une réduction des zones de porosité et de faiblesse.
- **La résistance mécanique** est altérée par la présence de calcite en trop fortes proportions qui provoque des écaillages lors du façonnage et des efflorescences lors de la cuisson (Castillon-Verdon). De même, la présence trop importante de halite crée aussi des efflorescences qui désagrègent le tesson au cours du temps (sortie d'estuaire du Lay). Une résistance mécanique

élevée peut être due au caractère fondant de l'illite qui si elle est présente en bonnes proportions dans le mélange permet une bonne cohésion de celui-ci et de refermer les pores entre eux qui pourraient être des zones de faibles. On parle d'une meilleure liaison entre les particules "inertes". La finesse des particules du mélange permet aussi une bonne agglomération et une réduction des zones de porosité et de faiblesse (Rance). Certaines faiblesses peuvent être attribuées à la présence d'une trop grande quantité de quartz dans la pâte argileuse et au refroidissement trop rapide du produit. En effet, le passage du point quartz (changement de phase cristalline réversible du quartz à 573 °C) peut être très délicat lors du refroidissement (la pâte n'étant pas encore indurée lors de la montée en température absorbe les variations dimensionnelles). S'il y a trop de quartz, des fêles se créent et ne sont pas toujours visibles mais réduisent fortement la résistance mécanique du produit comme pour les sédiments de Pareloup (Aveyron). En effet, l'analyse thermo-dilatométrique de cet échantillon (Figure 3-18) montre une amplitude du point quartz importante en particulier lors du refroidissement qui étaye notre hypothèse.

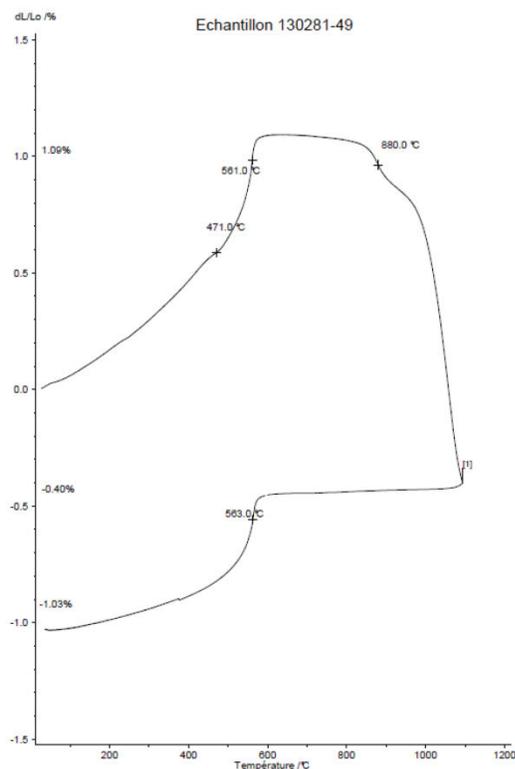


Figure 3-18 : Analyse thermo-dilatométrique de l'échantillon 130281-49 de la retenue de Pareloup

Bien que la minéralogie ne puisse pas répondre directement à l'ensemble des caractérisations nécessaires pour obtenir un produit de qualité, l'ensemble des résultats obtenus par les caractérisations via l'approche classique de l'industrie de la terre cuite sont suggérés par les résultats obtenus par la caractérisation minéralogique de sédiments en comparaison avec notre CMR, ce qui en fait sa force (Tableau 15).

Tableau 15 : Bilan de la comparaison entre l'approche classique de l'industrie de la Terre Cuite pour la caractérisation de la matière première et notre approche par la minéralogie à l'aide du CMR

CMR							Approche classique							
M.A.	Calc	Qz.	Min. Argileux				Systèmes	Augustinik		Winkler	Retrait		Rés. méca	
			Sm ⁺	I	C	K		Y	X		Ext.	Sec		Cuis.
<i>Durance</i>														
=	≈	=	--	++	+	-	Amont	=	≈	< Bc	N			
=	+	=	=	=	≈	=	Moyenne	=	+	< T	O	=	=	++
≈	++	=	=	=	=	=	Verdon	≈	++	< T	P	+	=	Imp.
<i>Seine</i>														
≈	≈	≈	=	=	=	=	Amont	≈	=	T	O	-	=	Ecaïl.
=	=	=	--	=	+	=	Yonne	=	=	Bp	N			
=	+	=	=	-	=	=	Estuaire Port	≈	+	T - Bp	O	-	=	+/-
<i>Garonne</i>														
≈	=	≈	≈	=	=	=	Lot Truyère	=	=	T - Bc	M/O	=	--	-- 950°C
-	=	++	=	=	=	=	Dordogne Cère	=	=	> Bp	N			
-	=	+	≈	-	=	≈	Aveyron	+	=	Bc	O	+	=	--
-	=	++	=	≈	=	=	Tarn Agout	=	=	Bp	N			
--	+	++	=	=	=	=	Baie de Somme	--	≈	Bp	P	+	-	Imp.
-	=	(++)	-	+	=	=	Mont-Saint-Michel	-	+	Bp	N			
=	=	=	≈	=	=	=	Rance	=	=	< T	O	-	=	++
<i>Pertuis Breton</i>														
=	=	≈	=	=	=	=	Baie	=	≈	< T	O	--	=	= (-)
=	=	=	-- (=)	+-	=	=	Lay (BV)	≈	=	T	O	-	=	+
=	=	≈	=	=	+	=	Polder	=	=	T	O	-	=	=
<i>Pertuis d'Antioche</i>														
=	=	=	=	=	=	=	Baie	=	=	< T	O	-	=	++
--	=	+	=	=	=	=	Charente amont	=	≈	Bp	N			
--	=	-	--	++	=	--	Bassin d'Arcachon	=	=	Bc	N			

(Légende des entrées : M.A. = Minéraux argileux ; Calc = Calcite ; Qz = Quartz ; Sm⁺ = Argiles gonflantes ; I = Illite ; C = Chlorite ; K = Kaolinite ; Y = Al₂O₃/SiO₂ ; X = R₂O + RO + Fe₂O₃ ; Ext. = Extrusion ; Sec = séchage ; Cuis = cuisson ; Res méca = Résistance mécanique)

(Légende générale : "=" = correspond aux attentes de l'industrie ; "≈" = correspond quasiment à ces attentes ; "+" est au-dessus des attentes ; "-" est en-dessous des attentes)

(Légende Winkler : T = domaine tuiles ; Bc = domaine briques creuses ; Bp = domaine briques pleines)

(Légende Extrusion : O = oui (vert) ; N = non (beige) ; P = passable (mauve) ; M = moyenne (mauve))

(Légende Résistance mécanique : Imp. = impossible ; Ecaïl. = écaillage)

4. Estimation du renouvellement de la ressource

La composition minéralogique des sédiments des sites pilotes comparée à celle du CMR permet de discriminer les formations géologiques ayant une influence compatible avec cette utilisation dans l'industrie de la terre cuite :

- les sédiments qui proviennent exclusivement de l'érosion de formations intrusives de type socle (Massif Armoricaïn, Central, du Morvan...) ne paraissent pas compatibles avec une valorisation ;
- les sédiments ayant pour origine l'érosion de formations exclusivement sédimentaires présentent souvent des teneurs en Ca élevées ce qui peut être handicapant à la cuisson puisque le Ca va créer des efflorescences et éventuellement des grains de chaux qui facilitent les fêlures ;
- les sédiments présentant un mélange d'apports sont finalement les plus compatibles.

La composition minéralogique, en plus de suggérer la composition chimique et granulométrique des sédiments, permet d'alerter sur des risques ou des tendances liés à la présence de certains éléments comme :

- les smectites sur le comportement au séchage et à la cuisson ;
- les kaolinites sur la plasticité ;
- les illites sur la cuisson ;
- le quartz sur la résistance mécanique en particulier avec le passage du point quartz au refroidissement,
- ...

Certains des sédiments testés lors de cette étude présentent des caractéristiques à l'état brut très encourageantes pour envisager la valorisation d'atterrissements d'argiles dans l'industrie des tuiles et briques mais peuvent présenter des défauts, notamment une distribution granulométrique un peu fine, des teneurs en Na ou en Ca un peu élevées... Afin de palier ces problématiques de compositions, nous avons envisagé la formulation de mélange de sédiments avec des dégraissants, d'autres sédiments ou des mélanges argileux actuellement utilisées dans l'industrie de la terre cuite. Ces mélanges font l'objet du quatrième et dernier chapitre de cette thèse.

4.1. Relations entre contexte géologique, dynamique sédimentaire et potentiel des atterrissements

Les évaluations à partir du CMR sont confortées par les méthodes classiques d'analyses et essais pratiquées dans l'industrie de la terre cuite. Pour une première évaluation, le CMR constitue une approche qui nécessite la mise en œuvre d'une seule technique d'analyse, la diffraction RX. Tous les paramètres ne sont pas analysés, mais les fortes relations qui existent entre minéralogie et propriétés physiques expliquent la bonne adéquation entre les conclusions de deux méthodes.

A l'échelle des bassins versants des cours d'eau, les sédiments issus de l'altération des socles ne présentent pas de compositions minéralogiques compatibles avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite du fait de leurs faibles teneurs en minéraux argiles et leurs fortes teneurs en silicates ou chlorite.

Lorsque les cours d'eau traversent des couvertures sédimentaires, la présence d'une teneur élevée en calcite et/ou une faible teneur en minéraux argileux peuvent poser des problèmes à l'extrusion, notamment en ce qui concerne la cohésion entre les particules. Une forte teneur en calcite pose également des problèmes lors de la cuisson avec l'apparition d'efflorescences. Une faible teneur en minéraux argileux peut toutefois être compensée par une composition en minéraux argileux favorable (absence de chlorite, mélange équilibré de kaolinite, illite et argiles gonflantes). La kaolinite apporte la plasticité à la pâte argileuse et semble augmenter la cohésion entre les particules.

Les sédiments des baies côtières estuariennes qui présentent souvent une distribution granulométrique trop élevée ne possèdent pas une bonne cohésion, ce qui rend difficile voire impossible l'extrusion. Dans le cas des sédiments des baies côtières, les principales efflorescences sont dues à la présence de sel qui peut être un handicap. Cependant, ce sel n'altère pas sur le long terme la qualité des sédiments comme le montrent les extrusions sur des sédiments autrefois chargés en sels des polders du pertuis Breton.

4.2. Evaluation du renouvellement de la ressource

Le choix des sites pilotes a permis d'évaluer plus précisément le caractère renouvelable des principaux atterrissements fluviaux ou côtiers du territoire français.

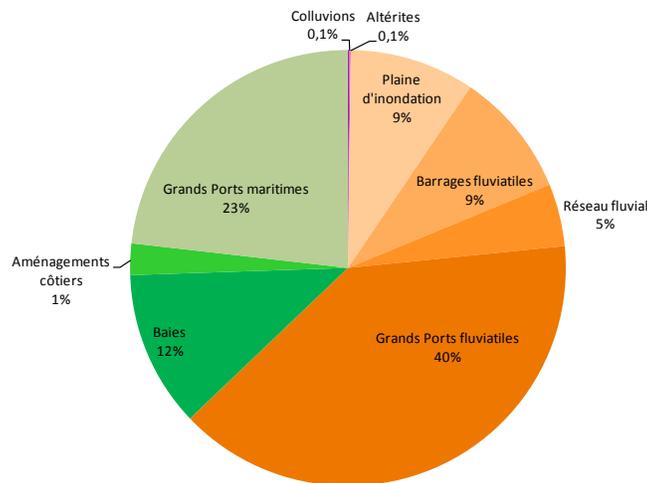


Figure 3-19 : Diagramme synthétique de répartition de la contribution des sources actives de sédiments fins sur le territoire français à partir des estimations faites au cours de cette thèse

Parmi les sources actuelles de sédiments que nous avons mises en évidence dans le chapitre 2, certaines sont compatibles avec une utilisation par l'industrie de la terre cuite comme nous l'avons présenté dans ce chapitre, d'autres non.

Dans les systèmes fluviaux, il faut éliminer les zones amont dont les sédiments ont pour origine le socle, ainsi que les zones avec une forte teneur en Ca qui peuvent susciter des problèmes à l'extrusion notamment. Par exemple, sur la Durance, sur les 3,5 Mt/an de sédiments qui s'accumulent, seuls ceux de Cadarache sont proches sans pour autant satisfaire à tous les critères. Sur la Seine, ce sont les valeurs sur Seine amont qui présentent le meilleur potentiel malgré un flux très faible car les bassins sont en dérivation. Sur la Garonne, les valeurs sont tout à fait acceptables sur l'Aveyron et la Truyère ce qui

suggère un fort potentiel régional qu'il faudrait caractériser plus précisément car peu de retenues de barrages ont pu être échantillonnées dans de bonnes conditions par rapport au nombre qui existent. Cependant, les taux d'accumulation sur la Truyère sont limités alors que les taux d'accumulation pour l'Aveyron, le Tarn et l'Agout sont relativement élevés.

Dans les systèmes côtiers, il est intéressant de noter que le problème lié à la présence d'halite n'est que temporaire et disparaît lorsque la mer comble les baies. Les sédiments fins des baies présentent ainsi un très fort potentiel d'utilisation dans l'industrie de la terre cuite notamment ceux de la Rance et des pertuis Breton et d'Antioche qui représentent un flux de plus de 1,5 Mm³/an.

Les ports, quant à eux, représentent un très fort potentiel en volume de sédiments, de manière pérenne, puisqu'ils sont dragués régulièrement. Il s'agit de volumes déplacés qui ne se renouvellent pas pour les temps à venir mais qui constituent une source de matériaux.

En conclusion, un volume important de sédiments participant au renouvellement de la ressource correspond à une source comparable à la matière première actuellement utilisée par l'industrie de la terre cuite. Ce volume annuel est probablement supérieur à celui mis en évidence dans ce chapitre car tous les sites n'ont pas été évalués sur le territoire. Cependant, nous obtenons ici le bon ordre de grandeur car il s'agit d'études de zones présentant de forts taux d'érosion. Il reste bien sûr les autres cours d'eau des Alpes présentant eux aussi de forts taux d'érosion comme le bassin versant de l'Isère notamment et enfin le système Loire, qui est conséquent en superficie, qui dispose dans une partie de son bassin versant d'un taux d'aménagement correct et donc d'un potentiel de valorisation intéressant.

Les résultats de l'analyse directe montrent un renouvellement estimé à environ 5 Mm³/an dont une partie avec des compositions sont proches de celles attendues par l'industrie qui mais présentent des proportions de certains minéraux en valeur trop élevée ou trop faible qui ne les rendent pas utilisables. Nous abordons leur valorisation à partir de mélanges, pratique courante dans l'industrie de la terre cuite, mélanges qui pourraient permettre de s'approcher de compositions optimales.

Chapitre 4

Vers une valorisation étendue
des atterrissements dans
l'industrie de la terre cuite

Dans les chapitres précédents, nous avons évalué tout d'abord le renouvellement de la source de matériaux fins à l'échelle du territoire, puis le renouvellement de la ressource qui est susceptible de substituer tout ou partie de la matière première actuellement consommée par l'industrie de la terre cuite. Cette dernière évaluation a été réalisée à l'aide du Cadre Minéralogique de Référence (CMR) que nous avons mis en place et dont le principal avantage est de fournir, à partir d'analyses minéralogiques, une estimation de premier ordre de leur aptitude à être transformés suivant les procédés céramiques. Cette évaluation a permis de déterminer quelles sources de matériaux fins peuvent être considérées comme des ressources potentielles et donc contribuer au renouvellement de la ressource.

Un certain nombre de sites pilote montrent des compositions minéralogiques assez proches de celles attendues mais avec toutefois des proportions en certains minéraux qui peuvent être néfastes pour le produit fini, notamment une distribution granulométrique trop fine, des teneurs en chlorure de sodium et/ou en calcite trop élevées, etc.

Ces caractéristiques ont des conséquences sur le comportement de la pâte argileuse au façonnage, pendant le séchage et la cuisson, sur la résistance mécanique des éprouvettes avant et après cuisson ainsi que sur les caractéristiques thermiques des produits sans oublier l'impact environnemental avec notamment les risques d'émissions atmosphériques de soufre, fluor et/ou du chlore, ainsi que les émissions de CO₂ pour les fortes teneurs en CaCO₃.

D'autres sites sont plus éloignés des caractéristiques des mélanges industriels du fait de proportions trop élevées en silicates (par exemple la chlorite ou l'illite), de teneurs en minéraux argileux trop faibles ou des proportions d'argiles gonflantes insuffisantes.

Dans ce chapitre, nous abordons la préservation de la ressource à partir d'une démarche visant à diminuer la consommation de matière première en carrière par une valorisation d'aterrissements qui ne peuvent être utilisés directement, mais peuvent constituer une matière de substitution à une partie des matériaux extraits en carrière.

La démarche qui consiste à réaliser des mélanges conduisant à des caractéristiques optima des produits finis est classique dans l'industrie de la terre cuite. En effet, la matière première de l'industrie de la terre cuite étant d'origine naturelle, il est rare de trouver la composition parfaite au sein d'une carrière ou d'un gisement. Les industriels réalisent souvent des mélanges entre différentes matières premières de caractéristiques bien définies de manière à obtenir un "bon" mélange de production (cf Chapitre 1). Notre démarche s'inscrit dans une pratique courante où la substitution ne doit pas se faire au dépend de la qualité des produits actuellement fournis par l'industrie. Les qualités finales des produits réalisés doivent au minimum être équivalentes à celles de produits actuels.

Dans un premier temps, nous aborderons les différentes voies envisagées par de nombreux laboratoires scientifiques et industriels pour diminuer la consommation de matière première dans l'industrie de la terre cuite avec la valorisation de déchets industriels, puis par l'incorporation de sédiments dans les mélanges.

La seconde partie de ce chapitre présente la démarche que nous proposons : une valorisation d'aterrissements qui ne répondent pas parfaitement aux critères industriels. La valorisation est envisagée sous deux angles, le premier concerne l'ajout de dégraissants qui permettent de faire évoluer

la composition granulométrique et chimique ; le second, la réalisation de mélanges entre atterrissements présentant des compositions complémentaires ou entre des atterrissements et des mélanges industriels.

1. La préservation de la ressource, une problématique mondiale pour l'industrie de la terre cuite

La volonté des industriels de la terre cuite dans le monde de diminuer la consommation de matière première en carrière et de diminuer la consommation d'énergie fossile pour aller vers des énergies biomasse donne lieu depuis le début des années 2000 à de nombreuses études d'incorporation de déchets (ou sous-produits) de diverses industries. La recherche de matériaux de substitution constitue une seconde piste qui a mené certains groupes de recherche à aborder l'incorporation et/ou la substitution de cette matière première par des sédiments dont les propriétés sont bien souvent proches de celles des matières premières à substituer.

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse bibliographique des essais menés sur les sous-produits industriels et sur l'incorporation de sédiments.

1.1. La valorisation de sous-produits industriels

Ces déchets, selon leur caractéristiques, peuvent être classés en trois grandes familles (Bruneaux, 2011) :

- les déchets "combustibles", contenant des composés carbonés qui participent à la combustion lors de la cuisson ;
- les déchets "fondants" contenant des composés alcalino-terreux qui permettent d'abaisser la température de cuisson ;
- et les autres déchets qui peuvent influencer les propriétés des produits d'autres manières ;

L'intérêt d'incorporer des déchets dans le process de fabrication des tuiles et briques est d'économiser la matière première, de diminuer la consommation d'énergie en abaissant la température de cuisson notamment, et d'améliorer les propriétés, notamment thermiques des produits. De plus les autres secteurs industriels ont besoin de trouver des voies de valorisation pour diminuer leur volume de déchets.

Ces derniers peuvent cependant présenter un certain nombre d'inconvénients :

- la disponibilité de la matière première n'est pas toujours évidente et peut s'avérer seulement ponctuelle en fonction du type de déchets et de la production ;
- la matière première peut montrer une grande variabilité de compositions ;
- son transport qui peut être un coût conséquent par rapport à l'apport qu'elle fournit ;
- les risques liés à la nature du déchet (pollution, corrosion,...) ;
- les modifications non maîtrisées de la granulométrie, de l'absorption d'eau, de la résistance mécanique, de la porosité et de l'aspect du produit, ainsi que le risque d'apparition d'efflorescences.

Nous présentons quelques exemples d'essais de valorisation des différents types de déchets.

- l'incorporation **de déchets combustibles**, participe à réduire la consommation en énergie mais peut influencer les propriétés des produits finis. Parmi les tests conduits, les résultats sont assez variés :
 - les résidus pétroliers (Acchar et al., 2009; Eliche-Quesada et al., 2012a; Eliche-Quesada et al., 2012b; Souza and Holanda, 2004) permettent de diminuer la température de cuisson mais font diminuer la résistance mécanique ;
 - Les boues de papeterie (Demir et al., 2005) préviennent les fissures de séchage. Elles augmentent la porosité et la pente de séchage ce qui permet de diminuer le retrait au séchage. Le besoin en eau de façonnage est augmenté, du fait des teneurs en humidité très importantes de ces boues, la température de cuisson diminuée et enfin la résistance mécanique est aussi diminuée.
- Parmi les **déchets fondants**, on trouve :
 - les cendres industrielles (Dondi et al., 2002; Furlani et al., 2008; Zhang, 2013; Zimmer and Bergmann, 2007) sont de bons fondants permettant l'abaissement de la température de cuisson, augmentant la résistance mécanique du produit fini mais diminuant la porosité de celui-ci ;
 - les sciures de granites, les résidus de taille de marbres, calcaires et ardoises (Acchar et al., 2006; Campos et al., 2004; Hojamberdiev et al., 2011; Menezes et al., 2005; Monteiro et al., 2004; Montero et al., 2009; Segadaes et al., 2005; Torres et al., 2004; Torres et al., 2009) peuvent augmenter la porosité d'un mélange et diminuer les émissions de S et F. Dans la plupart des cas, les auteurs n'observent pas d'impact significatif sur les propriétés des céramiques, mise à part une diminution de la résistance mécanique ;
 - les déchets contenant du bore (Christogerou et al., 2009) réduisent la température de cuisson, la porosité, le retrait au séchage et l'absorption d'eau.
- Les **mélanges de déchets fondants et combustibles**, présentent des avantages certains :
 - plusieurs études montrent les avantages d'utiliser les déchets de verre avec les déchets de fabrication de papier pour la production de briques (Asquini et al., 2008; Demir, 2006; Furlani et al., 2010; Furlani et al., 2011; Maschio et al., 2009). En effet, les boues de papeteries sont considérées comme des déchets combustibles qui augmentent notamment la porosité du produit fini alors que les déchets de verre ont des caractéristiques fondantes permettant d'abaisser la température de cuisson et d'augmenter la résistance mécanique du produit.
- Une valorisation de nombreux autres **déchets** d'industriels a été tentée par exemple :
 - les boues de tannerie (Basegio et al., 2002) et autres déchets de l'industrie textile (Herek et al., 2012) n'ont pas d'impact significatif sur les mélanges de production ;
 - les déchets de thé ou café (Demir, 2006; Eliche-Quesada et al., 2011) peuvent faciliter le façonnage et le séchage ;
 - les sciures de bois (Turgut and Algin, 2007) présentent pour principal effet de diminuer la conductivité thermique du mélange après cuisson ;

- les boues d'épuration (Jordan et al., 2005; Merino et al., 2007; Zhou et al., 2013) sont de bons fondants diminuant la température de cuisson, augmentant la résistance mécanique, diminuant la porosité mais pouvant entraîner des risques d'efflorescences ;
- les sables de fonderie quant à eux (Alonso-Santurde et al., 2011; Alonso-Santurde et al., 2010; Alonso-Santurde et al., 2012; Furlani et al., 2012; Quijorna et al., 2012) permettent de diminuer le retrait au séchage mais présentent un risque élevé de fêles au passage du point quartz et peuvent contenir des teneurs importantes en polluants potentiellement émissibles.

La littérature présente de nombreuses études d'incorporation de déchets de diverses industries dans des mélanges de production de l'industrie de la terre cuite, soit directement dans les mélanges, soit en réalisant des mélanges avec d'autres matériaux argileux. Cette incorporation dépasse rarement les 20 % en masse du mélange. Ces dernières années de nombreuses "review" ont été publiées dont celle de Zhang (2013), celle de Monteiro et Vieira (2014) qui remet en question les conclusions de la précédente, celle de Borjes et al. (2014) qui présente des comparaisons sur les effets de l'incorporation de différents déchets industriels sur les caractéristiques céramiques et enfin celle de Muñoz Velasco et al. (2014) qui présente cette valorisation de déchets comme un réel soutien en matière première pour la production de briques.

1.2. La valorisation de sédiments

Les études sur la valorisation des sédiments sont souvent conduites avec l'objectif de valoriser des sédiments de dragage dans des pays où les ressources en matière première pour l'industrie des tuiles et briques sont limitées. Ces produits de dragages sont abondants et leur disponibilité est régulière suite à l'entretien des voies de navigation, la préservation des volumes utiles des barrages, etc.

Ces études peuvent être séparées en trois catégories, en fonction de l'origine des sédiments évalués : les sédiments marins, les sédiments fluviaux et portuaires et les sédiments de barrages.

1.2.1. Les sédiments marins

La dynamique des sédiments marins est complexe du fait des mélanges des apports fluviaux et des remobilisations de sédiments par la dérive littorale. Cependant, les aménagements sur le littoral consistent en de véritables pièges à sédiments ce qui impose une gestion des sédiments pour maintenir les activités humaines liés à ces aménagements (navigation notamment). Plusieurs études ont donc été menées pour valoriser ces sédiments, souvent considérés comme des déchets, d'une part et substituer une partie de la matière première d'autres industries comme l'industrie de la terre cuite :

- Les études réalisées en Espagne dans la baie de Santander et l'estuaire de la Suances s'intéressent à la valorisation de sédiments marins contaminés (Romero et al., 2008, 2009). La qualité des produits obtenus montre que l'absorption d'eau et les propriétés mécaniques peuvent être meilleures qu'avec des argiles de carrières. Cette étude montre la faisabilité d'utiliser des sédiments marins comme matière première secondaire pour l'industrie de la terre cuite mais ces sédiments nécessiteraient leur incorporation dans un mélange. La réalisation de tests de lixiviation sur les produits réalisés à partir de sédiments marins contaminés montre que

la cuisson diminue nettement la mobilité des polluants présents. Leurs résultats les conduisent à conclure que ces briques (Romero et al., 2009) présentent peu de risques pour l'environnement. Pour Romero et al., les sédiments marins peuvent donc bien être utilisés comme matière première en substitution mais seulement partielle de l'argile des carrières.

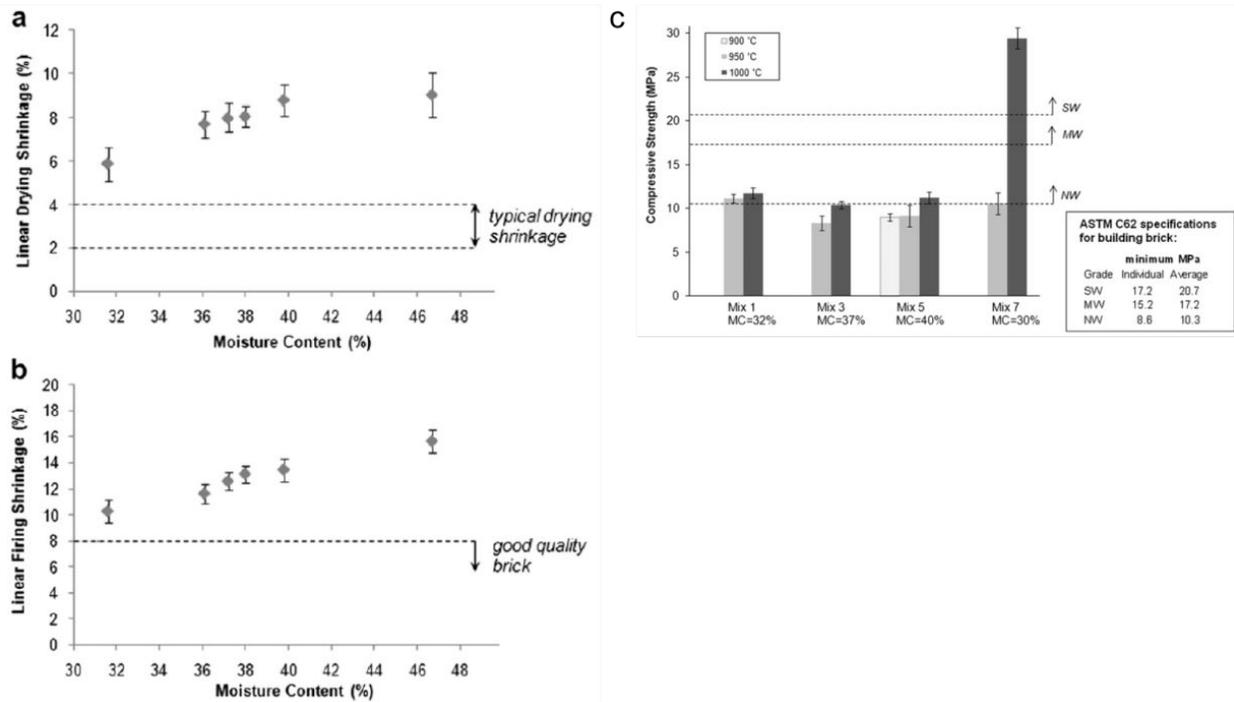
- Une autre étude conduite en Italie par Baruzzo et al., (2006), montre la fabrication de produits en terre cuite à partir de sédiments marins seuls ou en mélange avec des déchets d'autres industries. Des tests de lixiviation montrent que les éléments polluants sont immobilisés au sein du produit par la cuisson et que ces derniers ont de bonnes caractéristiques. Cependant, les retraits à la cuisson sont un peu trop élevés pour envisager une valorisation dans l'état.
- Une étude d'un laboratoire danois montre l'intérêt de la faisabilité d'utiliser des sédiments marins de l'Arctique pour un pays comme le Groenland. En effet, il s'agit d'un pays où les matériaux de construction sont tous importés faute de ressources locales. Hors, Belmonte et Ottosen (2015) montrent qu'il est possible d'utiliser les sédiments marins de la côte sud-ouest du Groenland pour la production de briques et ainsi rendre en partie autonome ce pays. Les caractéristiques de ces sédiments sont en effet compatibles avec une utilisation comme matière première, cette fois, principale pour la production de briques.

1.2.2. Les sédiments fluviaux et portuaires

Comme nous l'avons vu précédemment, les ports constituent de larges sources de sédiments du fait des dragages réguliers à effectuer pour maintenir les tirants d'eau dans les chenaux de navigation, dans les structures portuaires. Les sédiments dragués dans les ports et cours d'eau constituent un large potentiel pour les matériaux de construction dans les pays où les ressources en matériaux argileux sont rares :

- une étude complète allant jusqu'à l'échelle du pilote industriel a été réalisée en Allemagne sur les sédiments du port de Brême (Hamer and Karius, 2002). Les produits finis obtenus à partir de mélanges composés de 70 % de sédiments portuaires et de 30 % de matériaux argileux provenant de carrières présentent des performances tout à fait acceptables. Malgré la fabrication de produits de qualité, la commercialisation de ceux-ci n'a cependant pas rencontré d'intérêt du public. Ces auteurs soulèvent le problème de l'acceptabilité sociale de l'utilisation de sédiments dans des matériaux de construction. En effet, les sédiments portuaires sont souvent considérés comme des déchets dans l'opinion publique ;
- des essais ont été conduits à partir des sédiments dragués dans le port de Savannah, directement sur les boues ou sur des mélanges dans lesquels celles-ci remplacent 50 % des matériaux naturels (Mezencevova et al., 2012). Les briques ainsi obtenues remplissent les critères industriels à l'exception des retraits au séchage et à la cuisson qui sont un peu forts ;
- les sédiments issus du dragage de la rivière Qinhuai en Chine sont utilisés en large proportion (entre 50 à 70 %) pour contribuer à la formation des pores dans des produits argileux réduisant la conductivité thermique de près de 40 % mais également la résistance mécanique (Xu et al., 2014). Les lixiviations montrent que les concentrations en métaux lourds sont inférieures aux normes, ceux-ci étant inertés pendant le chauffage ;
- plusieurs ports méditerranéens ont besoin de draguer leurs chenaux régulièrement. Les sédiments dragués peuvent représenter de grands volumes similaires à ce que l'on a pu observer en France. Par exemple, il est dragué 3,4 Mm³ de sédiments par an au Maroc dans les ports (Frar

et al., 2014). Les enjeux d'une gestion durable à terre des sédiments dragués dans les ports les poussent à chercher des voies de valorisation pour ces sédiments et l'industrie de la terre cuite en est une (Levacher et al., 2011). L'étude de Frar et al. (2014) montre qu'il est possible de réaliser des briques avec des sédiments du port de Larache associés à des argiles de carrières jusqu'à une substitution de 40 % mais que ce n'est pas le cas pour les sédiments du port de Tanger. Ils obtiennent des résistances mécaniques pour les mélanges qui sont tout à fait acceptables.



• **Figure 4-1 : Figures extraites de l'article de Mezencevova et al. (2012) sur les sédiments du port de Savannah (USA).**

a) Retrait au séchage lors de l'augmentation de la teneur en eau de façonnage sur les briques fabriquées exclusivement à partir des sédiments de dragage et cuites à 950 °C. b) Retrait à la cuisson dans les mêmes conditions. c) Résistance mécanique à trois températures de cuisson de quatre mélanges à partir des sédiments dragués.

- Une série d'études réalisées par l'Ecole Centrale de Lille sur la valorisation de sédiments marins et fluviatiles, y compris des sédiments piégés dans les canaux (El Fgaier et al., 2013; Lafhaj et al., 2008; Roziere et al., 2015; Samara, 2007; Samara et al., 2009), montre qu'il est aussi possible d'utiliser ces sédiments pour la production de briques mais après un traitement lourd. L'objectif du traitement est d'inertiser les polluants présents dans les sédiments, à l'aide du procédé Novosol (Solvay) qui inerte les polluants par phosphatation et calcination sans pour autant diminuer la qualité du produit fini

Concentrations of main heavy metals in the leachates of raw and treated sediments according to French standards in mg/kg on dry material				
Element	Raw sediment	Treated sediment	Limit values for waste acceptable as inert L/S = 10 (l/kg)	Limit values for waste acceptable as nonhazardous L/S = 10 (l/kg)
Cd	<0.03	<0.03	0.04	1
Cu	5.97	0.87	2	50
Zn	1.21	0.301	4	50
Ni	4.63	0.08	0.4	10
Pb	<0.2	<0.2	0.5	10

Figure 4-2 : Figure extraite de l'article de Lafhaj et al., 2008 montrant l'efficacité du traitement par le procédé Novosol sur le Cu, Zn et Ni.

Leurs études ont été menées jusqu'à l'échelle du pilote en usine et montrent que les briques obtenues fournissent des performances au moins équivalentes aux briques jusque-là produites au sein du site industriel où ont été réalisés les essais. Cependant, il convient de noter que le coût et la mise en œuvre du procédé Novosol en limite l'utilisation pour une production de tuiles et briques dans le contexte économique actuel.

1.2.3. Les sédiments de retenues

L'utilisation de sédiments de retenues est envisagée depuis plusieurs décennies dans les régions où les opérations de dragage sont régulières car les sites favorables à l'implantation de nouveaux barrages sont rares où lorsque le volume de sédiments accumulés met en péril la structure. Des solutions de valorisation de ces sédiments dans le domaine de la construction contribueraient à la préservation de la ressource dans les pays où celle-ci est limitée (Huang et al., 2001; Remini, 2006; Yusuf et al., 2012).

- Les études sur les boues des retenues algériennes montrent des propriétés des vases très proches de celles des argilites utilisées par l'industrie (Remini, 2006). Les résultats des tests montrent des caractéristiques qui répondent aux normes industrielles, un ajout de sable serait souhaitable pour améliorer le retrait et la porosité du produit fini ;
- des études similaires sont conduites en Tunisie avec des résultats tout aussi prometteurs (Irie et al., 2012). Les dragages pourraient même être planifiés en fonction de la demande de l'industrie des tuiles et briques ;
- en Indonésie, les sédiments du barrage Bili-Bili présentent des compositions en minéraux argileux qui nécessitent une stabilisation par l'addition de 5 à 20 % de ciment Portland (Yusuf et al., 2012) ;
- la valorisation des sédiments du barrage de Sepirud en Iran montre de meilleurs résultats pour la fabrication de briques creuses à partir de la vase avec l'incorporation de silts, sable fin plutôt que de sciure de bois qui modifient les propriétés physiques du sédiment (Jamshidi-Chenari et al., 2015) (Figure 4-3).
- les sédiments du lac de barrage de Shi-men à Taiwan ont fait l'objet de plusieurs études pour la fabrication de briques par addition de minéraux argileux (entre 0 et 20 %) puis frittage à température élevée (entre 1 000 et 1 150 °C) conduit à des propriétés en accord avec celles de l'industrie (Chiang et al., 2008). Les polluants présents dans les sédiments semblent inertés par la cuisson et les tests de lixiviation montrent des valeurs inférieures aux normes des matériaux de construction. Les teneurs en éléments polluants dans les lixiviats passent lors d'une cuisson à 1 100 °C de 0,07 à < 0,009 % pour le Pb, de 0,03 à < 0,005 % pour le Cu et de 1,15 à 0,86 % pour le Zn ;

- une autre étude montre que cette valorisation est également possible en réalisant des mélanges entre les sédiments de la retenue (entre 80 à 100 % du mélange) et de sédiments des boues de traitement des eaux (de 0 à 20 %) (Huang et al., 2001).

L'utilisation de sédiments aux propriétés proches de celles des matières premières à substituer permet d'envisager des taux d'incorporation bien plus conséquents que pour les déchets industriels.

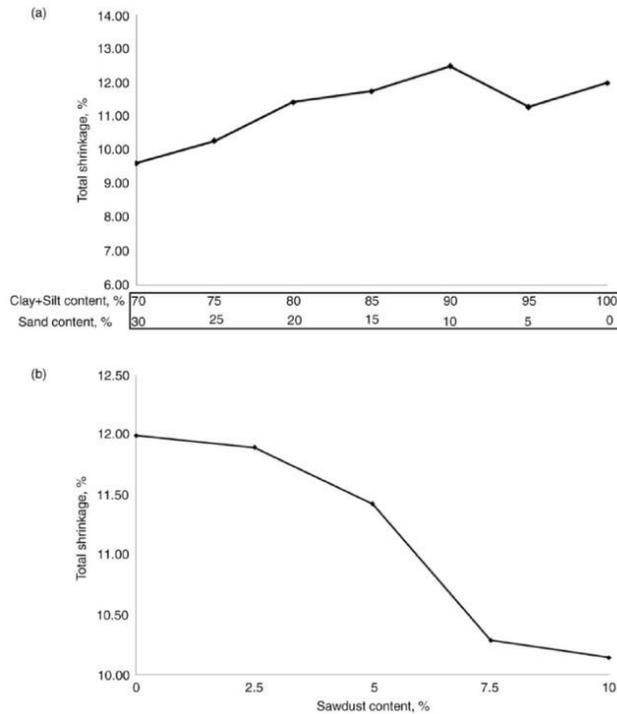


Figure 4-3 : Retrait au séchage (Jamshidi-Chenari et al., 2015) a) addition de sédiments fins (argile et silt) et sable B) sciure en proportions variables

1.3. Conclusion

L'utilisation de déchets industriels dans l'industrie de la terre cuite s'avère en général assez positive, même si certaines propriétés céramiques peuvent être altérées par l'addition de ces composants. Cependant, les taux d'incorporation de ces déchets ne dépassent que rarement les 20 % et représentent plus souvent de l'ordre de 1 à 5 % du mélange de production. La substitution d'une partie de la matière première par ces déchets constitue une voie intéressante, mais les volumes en jeu restent faibles.

La valorisation de sédiments constitue une piste plus prometteuse en terme de volumes utilisés. Les quelques études montrent des taux d'incorporation d'au moins 20 % et pouvant atteindre près de 80 %. Certains sédiments peuvent même être utilisés directement.

Dans toutes les études, la présence de polluants est inertée soit par traitement préalable ou tout simplement par la cuisson à forte température.

Si l'ensemble des résultats paraît très prometteur, la part de l'acceptation sociétale ne doit pas être négligée et constitue un volet à part entière à évaluer dans la démarche.

2. Un accroissement du potentiel des atterrissements du territoire français

Les résultats des sites pilotes, ont montré que le CMR constitue un mode d'évaluation du potentiel d'un atterrissement fiable, puisqu'en fonction de la position de l'échantillon sur les diagrammes ternaires, l'opérateur peut anticiper les difficultés qui vont apparaître lors des essais classiques de l'industrie de la terre cuite.

Ainsi, bien que la réalisation d'éprouvettes à partir de sédiments bruts se soit montrée concluante, un certain nombre d'entre elles n'atteignent pas les qualités des mélanges de production actuellement utilisés du fait de difficultés rencontrées au cours de la fabrication (fissuration, etc.) ou de la diminution des performances du tesson terre cuite (aspect de surface, risque d'efflorescences, diminution de la résistance mécanique).

Les sédiments se situant sur le CMR en dehors du domaine des mélanges industriels se sont effectivement révélés impropres au façonnage, leur étude de valorisation est restée très limitée puisqu'ils n'ont pu être extrudés.

Nous proposons d'explorer des pistes de valorisation par mélange, en suivant dans un premier temps l'approche classique de l'industrie de la terre cuite, par ajout de dégraissants pour modifier la distribution granulométrique et la composition minéralogique. Ensuite, en nous appuyant sur le CMR, nous proposons de réaliser des mélanges entre sites en exploitant les points forts complémentaires de certains sites. La méthodologie mise en place peut être utilisée avec des sédiments de provenances diverses.

Les deux approches sont illustrées pour les deux milieux dans lesquels nous avons recensé le plus d'atterrissements : le domaine fluvial et les baies côtières estuariennes.

- Le bassin versant de la Durance avec son fort taux de MES et les caractéristiques variées de leur signature minéralogique a été retenu pour le domaine fluvial.
 - Nous disposons de matériel pour réaliser les mélanges sur 3 sites, celui de Serre-Ponçon sur la Durance amont, celui de Cadarache sur la Durance moyenne et celui de Castillon sur le Verdon ;
 - au cours des essais sur sédiments bruts, ceux de Serre-Ponçon n'ont pu être extrudés (faible teneur en minéraux argileux, forte teneur en silicates). Les éprouvettes obtenues à partir des sédiments de Castillon-Verdon présentaient des défauts (forte teneur en calcite) et celles provenant des sédiments de Cadarache présentaient le meilleur aspect ;
 - cependant, les sédiments de Cadarache présentent une distribution granulométrique un peu fine qui induit notamment les difficultés au départ de l'eau colloïdale lors du séchage et éventuellement des performances thermiques plus limitées dues à la faible porosité. De plus, la teneur élevée en calcite de ces sédiments induit un risque

d'apparition de grains de chaux au cours de la vie du produit et de zones de faiblesses diminuant la résistance mécanique pour l'instant très bonne.

- Le pertuis Breton, alimenté d'une part par des cours d'eau traversant des domaines géologiques contrastés et d'autre part par la dérive littorale, a été choisi pour le domaine des baies estuariennes.
 - Parmi les sites qui ont été caractérisés dans le chapitre 3, nous avons choisi celui du port de l'Aiguillon s/ Mer qui fait l'objet de dragages bien qu'irréguliers ;
 - la composition minéralogique et les assemblages de minéraux argileux de ce site correspondent sur le CMR à des valeurs de mélanges industriels. Prélevé en bordure d'estuaire, cet échantillon présente toutefois une teneur en Na un peu élevée. La distribution granulométrique montre un déficit dans le pôle des fortes granulométries.

2.1. Les effets croisés de l'ajout d'additifs

Les sédiments de certains atterrissements présentent des faiblesses qui peuvent être facilement compensées par l'ajout d'additifs. La question de la granulométrie peut être facilement gérée, mais comme nous allons le voir elle aura un impact sur les autres propriétés du mélange, minéralogiques, géochimiques et comportement aux essais.

2.1.1. Obtention d'une distribution granulométrique appropriée

La majorité des échantillons présente des distributions granulométriques trop riches en éléments fins par rapport à celles des mélanges industriels. Quelques unes d'entre elles, au contraire, montrent une trop forte proportion des plus grandes classes. Les échantillons prélevés au cours de cette thèse représentent cependant un très faible volume par rapport à celui des atterrissements, ce qui peut poser la question de leur représentativité en termes de granulométrie. La question de l'obtention d'une distribution granulométrique souhaitée est donc traitée de façon générique sur le matériel disponible et pour constituer une solution locale, il faudrait recourir à un échantillonnage plus complet.

Après une présentation du mode opératoire d'obtention d'une distribution granulométrique, nous discutons des types d'additifs qui peuvent être utilisés en fonction de la composition minéralogique des sédiments.

La distribution granulométrique doit assurer une bonne cohésion du mélange, propriété indispensable à un bon comportement au façonnage. L'amélioration de la distribution granulométrique d'une matière première passe par l'ajout de "dégraissants" qui est une pratique courante dans l'industrie de la terre cuite. L'élément "dégraissant" le plus simple est le sable qui constitue ainsi le premier outil d'amélioration d'une distribution granulométrique. Un autre type de dégraissant est également utilisé, la chamotte, composée de terre cuite broyée avec une granulométrie qui peut être maîtrisée (souvent des déchets cuits de fabrication).

La connaissance de la distribution granulométrique s'appuie sur la projection des données granulométriques sur le diagramme ternaire de Winkler.

L'analyse du sédiment brut permet d'avoir accès à la distribution des trois pôles granulométriques considérés dans l'industrie de la terre cuite :

- pôle 1, granulométries inférieures à 2,5 µm ("argiles") ;
- pôle 2, granulométries comprises entre 2,5 et 25 µm ("limons") ;
- pôle 3, granulométries supérieures à 25 µm ("dégraissants"), on considère que les dégraissants "efficaces" sont supérieurs à 200 µm.

Les trois pôles du diagramme ternaire sont reliés entre eux par la relation suivante (en % du mélange)

$$Y_{\text{pôle 1}} + Y_{\text{pôle 2}} + Y_{\text{pôle 3}} = 100 \%$$

Connaissant la composition moyenne d'un mélange destiné à la fabrication de tuiles, briques pleines ou briques creuses, il est facile de quantifier les proportions relatives de chacune des classes granulométriques dans l'ajout.

Il faut cependant avoir à l'esprit qu'il n'y a pas une solution unique mais une gamme de valeurs compatibles pour diverses raisons ; les domaines des différents produits acceptent des variations de près de 10 % dans chacun des pôles granulométriques ; et le dernier pôle est moins restrictif que les deux autres en terme de classe granulométrique.

La démarche est illustrée à partir de deux types d'ajouts (Tableau 16) ;

- un sable quartzéux très pur (sable de Fontainebleau) de granulométrie assez fine et homogène (100 µm environ) ;
- la chamotte est obtenue à partir de déchets de production (produits cassés, ébréchés...) par broyage. Celle utilisée dans le cadre de cette thèse a été préparée au CTMNC à partir de tuiles d'une même série de production afin que la chamotte soit de composition homogène pour l'ensemble des essais. Ces tuiles ont été cassées, puis concassées et enfin en partie broyées avant d'être tamisées. La chamotte obtenue présente une granulométrie inférieure à 500 µm. La distribution de la granulométrie de la chamotte a été caractérisée suivant la méthode utilisée pour les sédiments. Les résultats montrent une distribution homogène entre 40 et 400 µm (Annexe 6).

Ces deux ajouts aux distributions granulométriques différentes ne contribuent en fait qu'au pôle le plus grossier du diagramme de Winkler (Figure 4-4).

Les tests ont été conduits avec les deux types d'ajouts pour l'échantillon de Cadarache et seulement avec de la chamotte pour l'échantillon du port de l'Aiguillon qui présente une composition proche de celle d'un mélange industriel et dont nous ne souhaitons pas modifier la composition.

Tableau 16 : Etablissement des mélanges par ajout de dégraissants à partir des pôles de distribution granulométrique

	Distribution granulométrique		
	Y _{pôle 1} (<2,5 µm)	Y _{pôle 2} (<2,5-25 µm)	Y _{pôle 3} (>25 µm)
Sédiment Cadarache - CA-1	50 %	50 %	0
Essai 1 – sableux quartzeux (100 % pôle 3) (granulométrie environ 100 µm)			100 %
Mélange Mix-1			
80 % sédiment Cadarache	40 %	40 %	
20 % sable quartzeux			20 %
Mélange Mix-2			
70 % sédiment Cadarache	35 %	35 %	
30 % sable quartzeux			30 %
Essai 2 – chamotte (100 % pôle 3) (classes granulométriques également réparties entre 40 et 400 µm)			100 %
Mélange Mix-3			
80 % sédiment Cadarache	40 %	40 %	
20 % chamotte			20 %
Sédiment Port de l'Aiguillon PB -1	60 %	40%	
Mélange Mix-B1			
80 % sédiment Port Aiguillon	48 %	32 %	
20 % chamotte			20 %

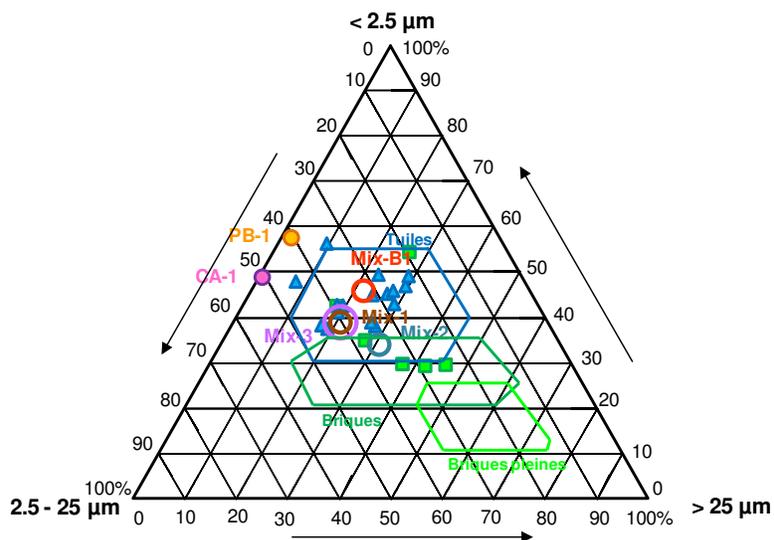


Figure 4-4 : Diagramme de Winkler présentant la distribution granulométrique calculée pour les 4 mélanges.

Les mélanges ainsi obtenus se projettent tous sur le diagramme de Winkler dans le domaine des tuiles. Deux des mélanges de Cadarache se projettent au même point, celui avec 20 % de sable quartzeux et celui avec 20 % de Chamotte.

L'intérêt principal du dégraissant, outre l'obtention de la granulométrie adéquate est de faciliter l'agglomération des particules plus fines autour des particules plus grossières de l'ajout. Celles-ci permettent également une légère augmentation de la porosité, une diminution d'une plasticité, du besoin en eau de façonnage et du retrait au séchage. Ils facilitent enfin le départ de l'eau au cours du séchage et le dégagement gazeux pendant la cuisson. Ces points seront traités en détail dans la présentation des essais.

2.1.2. Impact sur la composition minéralogique

Les deux ajouts utilisés présentent des compositions minéralogiques forts différentes :

- le sable choisi pour le mélange est un sable de Fontainebleau connu pour sa composition relativement pure, de 97 à 99 % de silice.
- La chamotte est obtenue à partir de déchets de production. Elle est majoritairement composée de quartz (71 %), de mullite (17 %, minéral silicaté, avec deux formes stœchiométriques $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ou $2Al_2O_3 \cdot SiO_2$) auxquels on peut ajouter des feldspaths (8 %) et de l'hématite (4 %). La mullite est un minéral issu de la cuisson qui dans le mélange peut être considéré comme inerte.

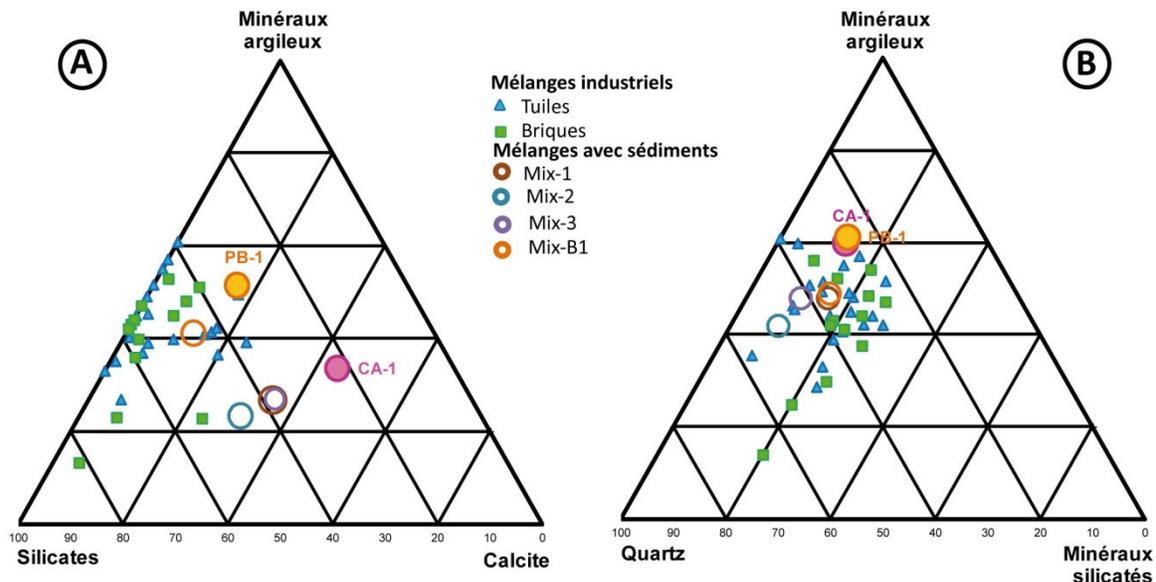


Figure 4-5 : Cadre Minéralogique de Référence (CMR) et données des mélanges à partir de CA-1 et PB-1 (détails sur les légendes du chapitre 2, A et B) Fig. 29-A/B et C et D) Fig. 30-A/B).

Dans le cas de l'échantillon de Cadarache (CA-1), l'ajout de sable composé quasi exclusivement de quartz a pour conséquence de rapprocher le mélange Mix-1 du domaine des tuiles et briques. L'évolution la plus sensible est la diminution de la teneur en calcite, ce qui est plutôt favorable. Par contre, la diminution de la teneur en minéraux argileux, qui n'était pas très élevée à l'origine, peut constituer un inconvénient. Cependant, l'assemblage initial en minéraux argileux de l'échantillon CA-1 qui se situait dans le domaine industriel n'est pas modifié par l'ajout de quartz. La projection du Mélange Mix 1 sur le

CMR se trouve tant pour sa composition minéralogique que pour ses assemblages de minéraux argileux dans le domaine industriel.

Un raisonnement similaire peut être conduit avec le mélange Mix-2 qui, du fait de l'addition d'un peu plus de sable quartzueux possède une composition en minéraux argileux et calcite encore plus faible mais qui reste encore dans le domaine industriel.

Le mélange Mix-3 correspond à l'ajout de chamotte, composée de minéraux inertes dont l'effet sur la composition minéralogique contribue à réduire la teneur en calcite et minéraux argileux. Par contre, l'effet des minéraux silicatés est plus difficile à quantifier car ils seront inertes au cours de la cuisson. La projection de Mix 3 sur le diagramme des minéraux argileux n'est pas modifiée.

Le quatrième mélange (MixB1) qui provient du pertuis Breton possède une composition minéralogique très proche de celle des mélanges industriels. L'ajout de chamotte, en diminuant la proportion de minéraux argileux qui était un peu forte, contribue à déplacer la projection de l'échantillon au centre du nuage des échantillons industriels. Comme nous l'avons vu pour les échantillons précédents, l'ajout de chamotte n'a pas d'influence sur l'assemblage de minéraux argileux qui se trouve projeté dans le domaine industriel.

2.1.3. Modification de la composition géochimique

Les ajouts modifient la composition chimique de façon différente comme le montrent les projections sur le diagramme d'Augustinik :

- le sable quartzueux, composé de silice (SiO_2), contribue à abaisser le rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ du mélange ainsi que les teneurs dans les autres éléments de l'axe des abscisses, alcalins, alcalino-terreux et oxydes quelles que soient les teneurs initiales ;
- la chamotte, qui possède une composition élémentaire correspondant à un mélange industriel, a pour effet de rapprocher les teneurs initiales le ratio $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ou celui des teneurs en éléments accessoires (alcalins, alcalino-terreux et oxydes).

L'ajout de sable quartzueux s'il rapproche la projection des mélanges issus des sédiments de Cadarache du domaine des briques de construction tend à abaisser de façon très nette le rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ qui avait au départ une valeur compatible avec les domaines des tuiles ou des briques

L'ajout de chamotte modifie très légèrement le rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ des mélanges issus des sédiments de Cadarache ou du Port de l'Aiguillon. Par contre, il les rapproche plus sensiblement le long de l'axe des abscisses vers les domaines des échantillons industriels, le mélange du port de l'Aiguillon se trouve ainsi dans le domaine des briques de construction et en bordure de celui des briques.

Ces résultats montrent qu'en fonction de la composition initiale du sédiment, il faut privilégier l'un ou l'autre des ajouts, sable quartzueux pour les fortes valeurs du rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, chamotte pour les faibles valeurs. Pour les valeurs intermédiaires, c'est le rapport des alcalins, alcalino-terreux et oxydes qui servira de guide, l'ajout de sable quartzueux le réduisant de façon plus nette.

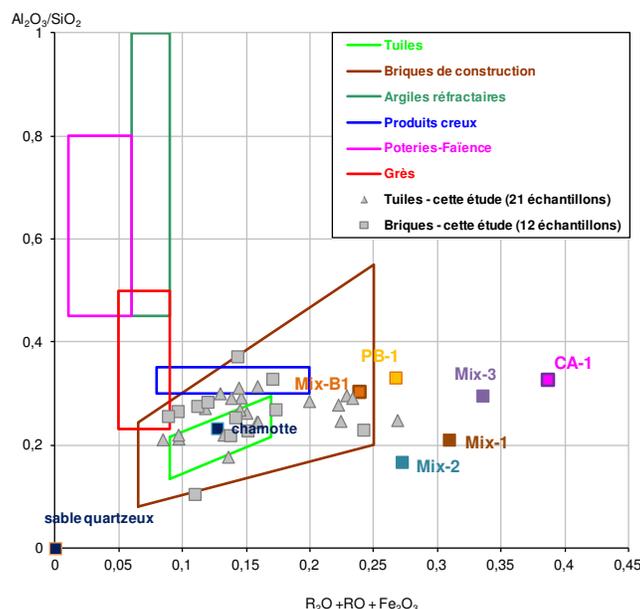


Figure 4-6 : Diagramme Augustinik des sédiments du Port de l'Aiguillon et de Cadarache en mélanges.

Le mélange avec 20 % de dégraissants paraît donc la meilleure option mais les deux mélanges ont été testés afin de vérifier les effets du sable et de la chamotte sur le comportement au façonnage, au séchage et à la cuisson.

2.2. Les essais matériaux

L'influence des ajouts sur les résultats des différents essais matériaux est présentée ci-dessous pour les mélanges obtenus à partir de l'échantillon de Cadarache et du mélange provenant de l'échantillon du port de l'Aiguillon.

2.2.1. Eau de façonnage

L'ajout de sable ou de chamotte contribue à l'obtention de la distribution granulométrique souhaitée par l'addition d'un mélange des classes granulométriques absentes et à la diminution de la teneur en argiles gonflantes et en calcite.

L'addition de matière dont la granulométrie se trouve dans la classe des sables fins (50-200 μm) à moyens (200 μm à 2 mm) concourt à l'augmentation de la porosité. De plus, les deux ajouts testés se comportent comme des « inertes » dans le mélange : Leur ajout contribue à diminuer les teneurs en minéraux argileux, ce qui va réduire les besoins en eau de façonnage :

- l'ajout de sable quartzueux réduit l'apport en eau de façonnage dans les mélanges issus de l'échantillon de Cadarache. Cet apport diminue avec l'augmentation du pourcentage en sable passant de 24,8 % (échantillon naturel) à 20 % (ajout de 30 % de sable quartzueux), sachant que 20 % d'eau de façonnage fait partie de la moyenne de l'industrie ;
- pour l'échantillon de Cadarache (CA-1), la différence est nettement moins nette avec l'ajout de chamotte (24,2 %) qu'avec l'ajout de sable notamment parce que la chamotte est plus poreuse étant donné qu'il s'agit d'un produit de terre cuite ;

- l'ajout de chamotte produit des résultats similaires mais avec des amplitudes très différentes. La réduction d'eau de façonnage est faible pour le mélange issu des sédiments de Cadarache (passage de 24,8 à 24,2 %) alors que pour le mélange issu des sédiments du port de l'Aiguillon l'apport en eau de façonnage diminue d'un tiers passant de 44 % à 30 %.

Après avoir été malaxés, les quatre mélanges montrent une bonne cohésion et une bonne plasticité. Les extrusions des pâtes des quatre mélanges ont été réalisées dans de bonnes conditions. Les éprouvettes présentent un état de surface tout à fait satisfaisant et ne comportent pas de défauts (Figure 4-7). Il convient de noter que celles des mélanges avec le sable quartzueux montrent un aspect de surface légèrement rugueux dû à la présence des grains de quartz assez grossiers.

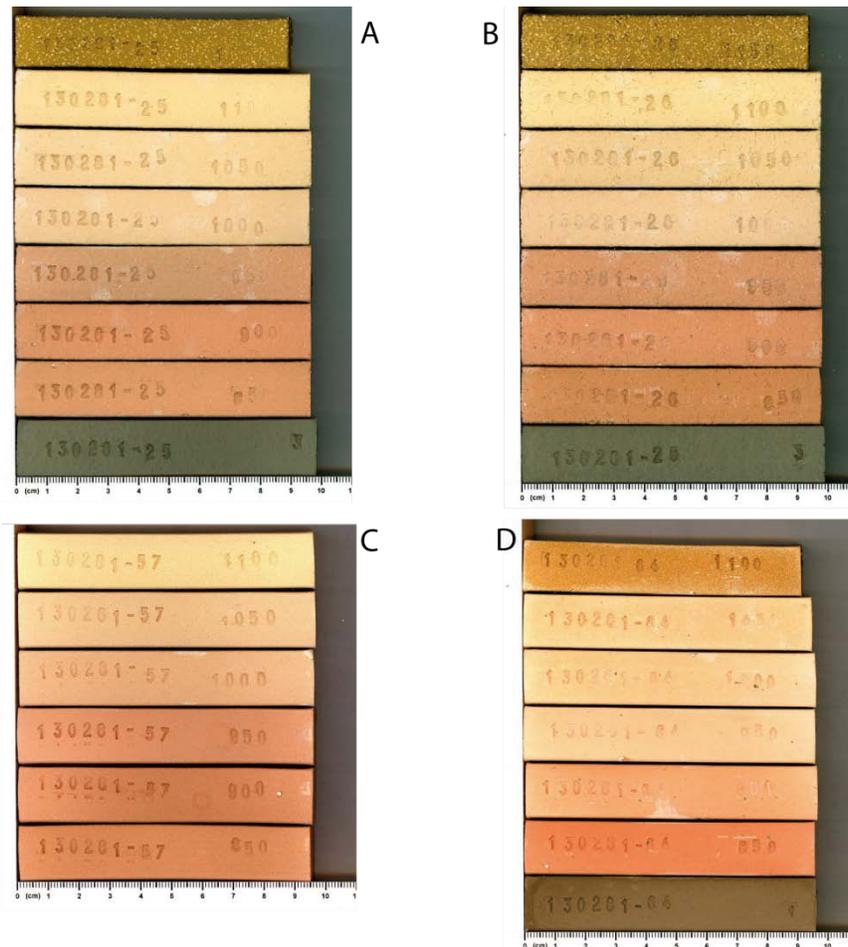


Figure 4-7 : Photographie des éprouvettes après cuisson : A) Mix-1 ; B) Mix-2 ; C) Mix-3 ; D) Mix-B1.

2.2.2. Comportement au séchage

La Figure 4-8 montre le comportement au séchage des trois mélanges issus de l'ajout de sable ou chamotte aux sédiments de Cadarache et du mélange avec de la chamotte des sédiments du pertuis Breton. Les valeurs obtenues sur les courbes de Bigot sont comparées à celles des sédiments bruts.

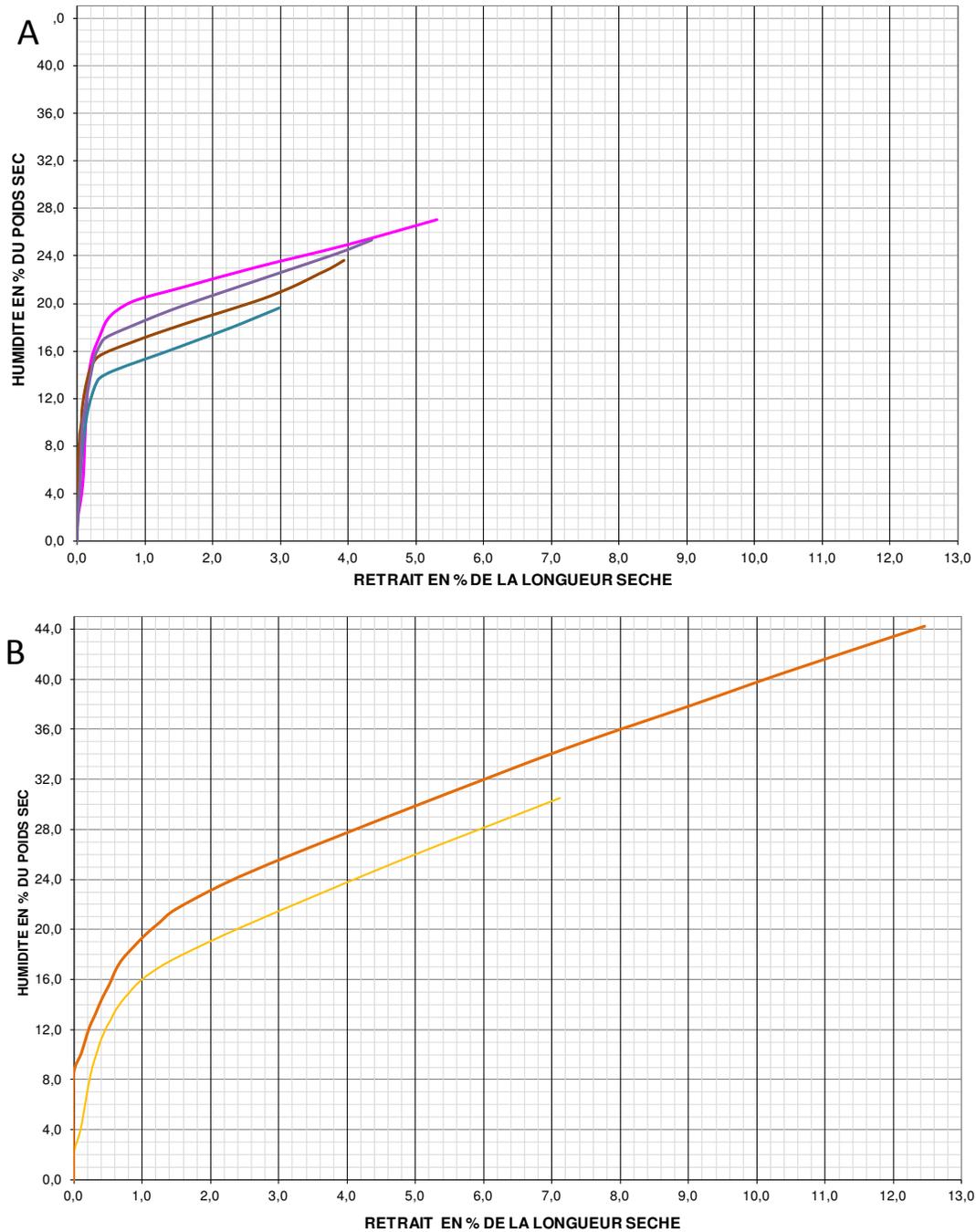


Figure 4-8 : Courbe de Bigot des mélanges avec dégraissants A) Des sédiments de Cadarache B) Des sédiments du pertuis Breton.

- Suite à l'ajout de sable, l'allure générale de la courbe de Bigot pour les mélanges issus des sédiments de Cadarache est peu modifiée avec une pente moyenne suggérant un départ lent et difficile de l'eau colloïdale. Cependant, le retrait lors de son départ diminue avec l'augmentation de la proportion de sable quartzéux (de 5,3 % pour l'échantillon naturel à 3 % pour un ajout de 30 % de sable) ;

- l'ajout de 20 % de chamotte ne modifie pas la pente de la courbe de Bigot pour les mélanges obtenus à partir des échantillons de Cadarache et du port de l'Aiguillon. Il conduit également à une diminution du retrait, de 5,3 à 4,2 % pour le mélange issu des sédiments de Cadarache (amplitude moins importante que pour l'ajout de 20 % de sable 4 %) et de 12,5 à 7 % pour celui du port de l'Aiguillon. L'ajout de Chamotte ne modifie pas les bonnes conditions du départ de l'eau colloïdale dans le mélange obtenu à partir des sédiments du port de l'Aiguillon, et semble améliorer le départ de l'eau d'interposition qui n'était pas très bon pour les sédiments bruts et qui semblent un peu meilleur et plus proche d'1 %.

Les ajouts améliorent les comportements au séchage des échantillons en réduisant les retraits. Dans le cas des mélanges issus de l'échantillon de Cadarache, l'ajout de sable produit une réduction du retrait plus significative qui peut être liée à la différence de granulométrie des ajouts. Pour l'échantillon du port de l'Aiguillon, nous ne disposons que des valeurs de retrait avec de la chamotte, la différence est très sensible, le retrait est diminué d'un peu moins de 50 %. Pour cet échantillon, le volume d'eau d'interposition et le retrait restent toutefois élevés pour un mélange industriel.

2.2.3. Comportement à la cuisson

Le comportement à la cuisson de ces mélanges est représenté par les courbes de retraits et d'absorption d'eau sur la Figure 4-9.

L'ajout de dégraissants semble donc aussi bénéfique pour les mélanges lors de la cuisson des éprouvettes.

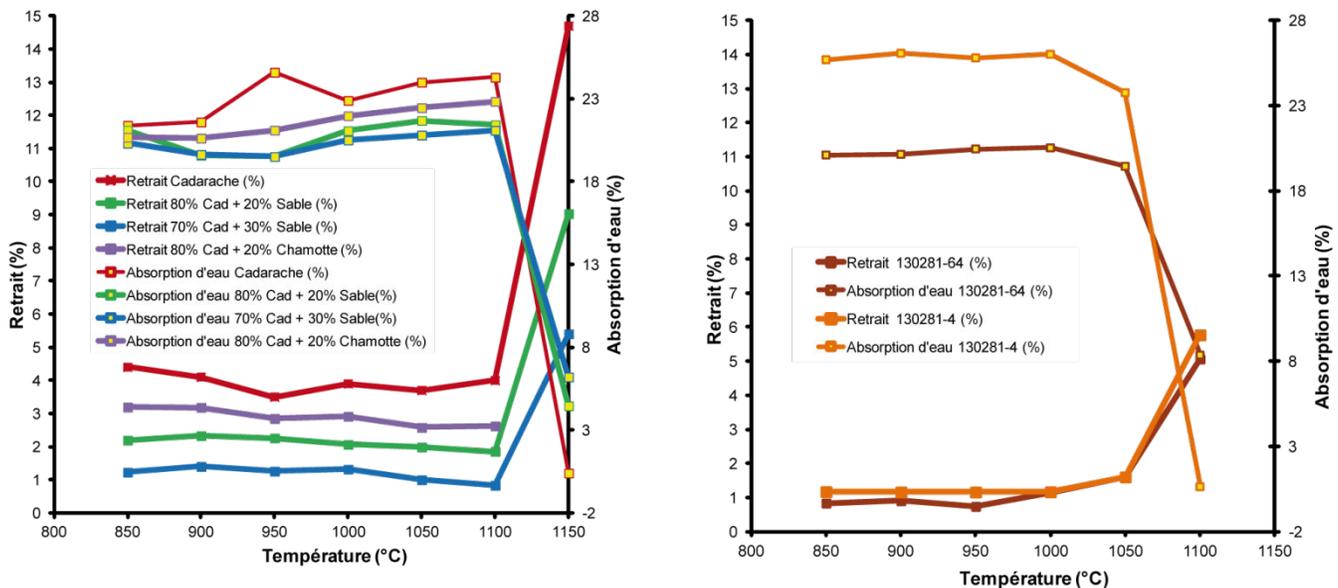


Figure 4-9 : Courbes de retraits et d'absorption d'eau en fonction de la température de cuisson des éprouvettes de Cadarache et du port de l'Aiguillon.

(En rouge, la courbe des sédiments bruts de Cadarache ; en vert, la courbe du mélange avec 20 % de sable, en bleu, la courbe du mélange avec 30 % de sable ; en violet, la courbe du mélange avec 20 % de chamotte. - en orange, la courbe des sédiments bruts du port de l'Aiguillon et en marron, la courbe du mélange avec 20 % de chamotte)

- Les courbes sont relativement similaires entre les sédiments bruts et les mélanges, que ce soit pour les sédiments et mélanges de Cadarache ou du port de l'Aiguillon. Tout comme pour le comportement au séchage, l'ajout de dégraissants dans le mélange, sable ou chamotte, semble diminuer le retrait à la cuisson ainsi que l'absorption d'eau ;
- le retrait et l'absorption d'eau sont stables jusqu'à une température de cuisson de 1 100 °C (Cadarache) ou 1 050 °C (Port de l'Aiguillon). Le retrait augmente rapidement au-delà de cette température et l'absorption d'eau diminue fortement.

2.2.4. Résistance mécanique

Les tests de résistance mécanique mettent en évidence une modification très nette de la résistance des éprouvettes avec l'addition de dégraissants. La résistance mécanique de ces mélanges bien que très proches de celles de Cadarache en cru, est nettement plus faible que pour les sédiments bruts à 950 et 1 100 °C (Figure 4-10). Nous pouvons ainsi distinguer :

- sédiments naturels
 - Les sédiments de Cadarache montraient des résistances mécaniques élevées par rapport au minimum fixé au laboratoire en rapport avec les résistances acceptées dans l'industrie et nous avons attribué cela à la finesse de la granulométrie des sédiments qui montraient une excellente cohésion ;
- ajout de sable quartzeux
 - L'ajout de sable fait nettement diminuer la résistance mécanique de ces mélanges. L'ajout de sable principalement composé de quartz augmente le risque d'avoir des fêlures même invisibles à l'œil nu lors d'un refroidissement trop rapide lors du passage du point quartz (573°C). De plus, ce sont des particules inertes qui ne participent donc pas à la céramisation.
- ajout de chamotte
 - Les résistances mécaniques à 950 et 1 100 °C sont légèrement plus faibles que celles des sédiments que ce soit ceux de Cadarache ou du port de l'Aiguillon. Elles sont de plus, nettement meilleures que celles obtenues avec le sable quartzeux et restent au-dessus des valeurs minima recommandées dans l'industrie ;
- ajouts et fondants
 - L'ajout d'un dégraissant a un effet très positif sur les sédiments d'origine marine en diminuant leur teneur en sodium (NaCl présent dans l'eau de mer) qui est un fondant, retardant ainsi la fermeture de la porosité qui se produit à une température plus élevée.

Le test de la résistance mécanique des éprouvettes de mélanges est celui qui met en évidence le plus de différences entre le comportement des sédiments et celui des mélanges. La chamotte, qui comprend beaucoup moins de quartz que le sable, conduit à un produit moins sensible au passage du point quartz lors du refroidissement et dont la résistance mécanique est moins tributaire des conditions du refroidissement.

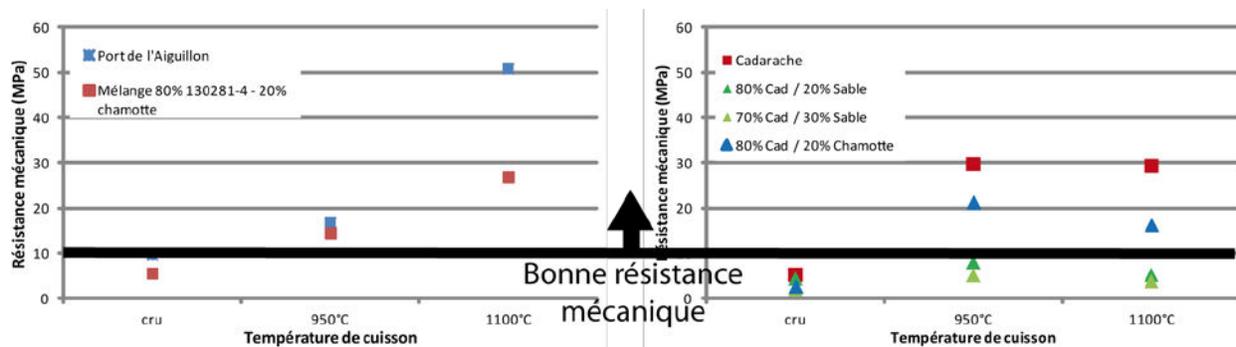


Figure 4-10 : Résistances mécaniques des sédiments bruts et des mélanges de Cadarache et du port de l'Aiguillon

2.2.5. Conclusion sur l'ajout de dégraissant

Les résultats des deux exemples traités à partir de sédiments aux distributions granulométriques un peu faibles et dont la composition était éloignée de la composition des mélanges industriels (Cadarache) ou proche mais avec une teneur en minéraux argileux un peu élevée (Port Aiguillon) montrent que l'ajout d'un dégraissant constitue un bon moyen, non seulement de palier le problème de granulométrie, mais également celui de la composition minéralogique.

Le comportement au façonnage nécessite des besoins en eau plus réduits, ce qui améliore les conditions d'utilisation notamment dans le cas de l'échantillon du pertuis Breton. Les comportements au séchage et à la cuisson sont peu influencés que ce soit avec l'ajout de sable ou de chamotte, mise à part une légère diminution du retrait au séchage et à la cuisson. Seule la résistance mécanique peut être nettement abaissée lors de l'ajout de sable quartzueux, ce qui nécessite un contrôle plus strict du refroidissement après la cuisson afin de maîtriser le passage du point quartz et d'éviter la formation de micro-fissures qui font diminuer cette résistance.

Ces résultats montrent que l'ajout de dégraissant constitue une méthode simple et efficace. La nature et la proportion de dégraissant peuvent être facilement anticipées à partir des diagrammes de Winkler et du CMR.

- Le diagramme de Winkler sert de guide pour déterminer la distribution granulométrique de l'ajout et la proportion qu'il convient d'ajouter pour atteindre le domaine industriel souhaité (tuiles, briques creuses ou pleines). Les essais ont montré que la granulométrie maximum de l'ajout doit être maîtrisée car dans le cas du quartz, elle peut conduire à des irrégularités de surface qui selon le produit fini peuvent être indésirables.
- Une fois l'ordre de grandeur du pourcentage de dégraissant qu'il faut ajouter fixé, le CMR permet de choisir entre le sable quartzueux et la chamotte en fonction des propriétés qui doivent être améliorées. L'un comme l'autre abaissent les teneurs en calcite et minéraux argileux. La chamotte se comporte comme un ajout inerte lors de la cuisson alors que le quartz peut réagir lors du refroidissement, ce qui nécessite un meilleur contrôle de cette phase.

De ces essais, il semble ressortir que la chamotte induit un comportement général du mélange meilleur qu'avec le sable quartzeux. Un autre intérêt de l'utilisation de la chamotte est qu'il s'agit d'une valorisation d'un déchet de production qui s'il n'est pas utilisé doit être géré (évacuation et stockage...).

L'ajout de dégraissant dans des mélanges constitue une pratique d'ores et déjà utilisée par l'industrie qui ne nécessite pas d'adaptation particulière du processus de fabrication.

Le mélange de sédiments avec de la chamotte semble donc être la manière la plus simple de valoriser en tant que matière première, les sédiments présentant des compositions minéralogiques, chimiques et granulométriques relativement proches de celles des mélanges industriels de production actuellement utilisés par l'industrie de terre cuite en France.

2.3. Une valorisation des sédiments hors standard

Nous nous intéressons ici à la valorisation de sédiments dont les compositions minéralogiques sont trop éloignées des compositions des mélanges industriels pour pouvoir être corrigées par des ajouts. Or il s'agit parfois de volumes conséquents, comme celui des sédiments qui s'accumulent dans la retenue de Serre-Ponçon dans le bassin versant de la Durance, avec près de 2,4 Mt/an.

Nous présentons maintenant une approche qui sans négliger l'intérêt de l'ajout de dégraissants, explore l'intérêt du mélange de sédiments aux compositions minéralogiques complémentaires. Cette étude s'appuie sur les sédiments du bassin versant de la Durance qui présentent des caractéristiques contrastées entre ceux de la Durance amont, site de Serre-Ponçon, dominés par les silicates et ceux de la Moyenne Durance, site de Cadarache, riches en minéraux argileux mais aux teneurs en calcite trop élevées :

- les sédiments de la retenue de Serre-Ponçon montrent une composition minéralogique éloignée de celle du CMR avec une teneur élevée en minéraux silicatés et un peu faible en minéraux argileux, et surtout un assemblage en minéraux argileux dominé par les chlorites et les illites avec une absence d'argiles gonflantes. Cependant, ce site présente un intérêt certain lié au fort volume de sédiments qui s'y accumulent ;
- les sédiments de la retenue de Cadarache, comme nous venons de le voir dans l'étude sur les mélanges par ajouts de dégraissant, possèdent une composition minéralogique qui comporte trop de calcite et un assemblage de minéraux argileux en accord avec ceux des mélanges industriels.

La démarche suivie est identique à celle présentée dans l'étude des mélanges par ajout de dégraissant.

2.3.1. Obtention du mélange

L'amélioration de la distribution granulométrique est assez facile lorsque le mélange est constitué à partir des ajouts dont on peut choisir la proportion qui permet d'avoir une distribution granulométrique complémentaire de celle du sédiment.

Dans le cadre de cette expérience, nous devons combiner trois termes, les sédiments des deux retenues et le dégraissant. Les deux dégraissants choisis, le sable quartzueux et la chamotte possèdent des distributions granulométriques différentes, mais toutes deux ne contribuent qu'aux granulométries supérieures à 25 µm dans le diagramme de Winkler. Les distributions de chacun des composants du mélange étant connues, les proportions doivent répondre au système d'équations suivant

$$0,5 x_{CA} + 0,225 x_{SP} = Y_{\text{pôle 1}} (\text{granulo} < 2,5 \mu\text{m}) \quad (1)$$

$$0,5 x_{CA} + 0,65 x_{SP} = Y_{\text{pôle 2}} (2,5 \mu\text{m} < \text{granulo} < 25 \mu\text{m}) \quad (2)$$

$$0,125 x_{SP} + x_{CH} = Y_{\text{pôle 3}} (\text{granulo} > 25 \mu\text{m}) \quad (3)$$

$$\text{avec } Y_{\text{pôle 1}} + Y_{\text{pôle 2}} + Y_{\text{pôle 3}} = 1$$

et $Y_{\text{pôle 1}}$, $Y_{\text{pôle 2}}$ et $Y_{\text{pôle 3}}$ compatibles avec le domaine des tuiles

Plusieurs choix sont possibles, mais :

- les deux premières équations imposent que $Y_{\text{pôle 1}}$ soit inférieur à $Y_{\text{pôle 2}}$, car le coefficient de x_{SP} est supérieur dans l'équation 2, ce qui restreint le domaine granulométrique qui peut être exploré (Figure 4-11) ;
- la proportion de sédiments de Serre-Ponçon est définie par la différence (2)-(1) et se trouve ainsi proportionnelle à la différence entre les teneurs des classes granulométriques des pôles 1 et 2 du mélange final. Dans le domaine qui peut être exploré, cette différence est au maximum de 15 %, ce qui conduit à un mélange contenant au maximum 36 % de sédiments de Serre-Ponçon (pour une différence de 1 %, la proportion de sédiments de Serre -Ponçon tombe à 2,5 %) ;
- la proportion de dégraissant se situe entre 10 et 20 % ;
- la proportion de sédiments de Cadarache oscille entre 54 et 77,5 %.

Dans le cadre d'une étude de valorisation des atterrissements, nous avons choisi de préparer un mélange présentant une proportion assez équilibrée de sédiments en provenance des deux retenues, ce qui donne un mélange avec 50 % de sédiments de Cadarache et 42 % de Serre-Ponçon avec 8 % de dégraissant (Tableau 17). La distribution granulométrique du mélange se trouve donc un peu en-dehors du domaine des tuiles. En effet, comme indiqué ci-dessus, la proportion de sédiments en provenance de Serre-Ponçon n'aurait pu dépasser 36 % pour une distribution granulométrique située dans le domaine des tuiles.

Tableau 17 : Etablissement des mélanges entre sédiments à partir des pôles de distribution granulométrique

	Distribution granulométrique		
	Pôle 1 A (<2,5 µm)	Pôle 2 B (<2,5-25 µm)	Pôle 3 C (>25 µm)
Composants du mélange			
Sédiment - Cadarache CA-1	50 %	50 %	
Sédiment - Serre-Ponçon SP-2	22,5 %	65 %	12,5 %
Chamotte/sable quartzeux			100 %
Composition souhaitée			
Domaine des tuiles	30-55 %	15-50%	10-40 %
Mélange faible contraste entre % SP et % CA contraste 1 % entre Pôle 1 et Pôle 2	39,5 %	40,5 %	20 %
2,5 % Serre-Ponçon	0,5 %	1,5 %	<0,5 %
77,5 % Cadarache	39 %	39 %	
20 % Chamotte/sable quartzeux			20 %
Mélange contraste moyen entre % SP et % CA contraste 10 % entre Pôle 1 et Pôle 2	35 %	45 %	20 %
24 % Serre-Ponçon	5,5 %	15,5 %	3 %
59 % Cadarache	29,5 %	29,5 %	
17 % Chamotte/sable quartzeux			17 %
Mélange contraste élevé entre % SP et % CA contraste 15 % entre Pôle 1 et Pôle 2	35 %	50 %	15 %
36 % Serre-Ponçon	8 %	23 %	5 %
54 % Cadarache	27 %	27 %	
10 % Chamotte/sable quartzeux			10 %
Mélange Mix-4	34,5 %	52,5 %	13 %
42 % Serre-Ponçon	9,5 %	27,5 %	5 %
50 % Cadarache	25 %	25 %	
8 % Chamotte/sable quartzeux			8 %

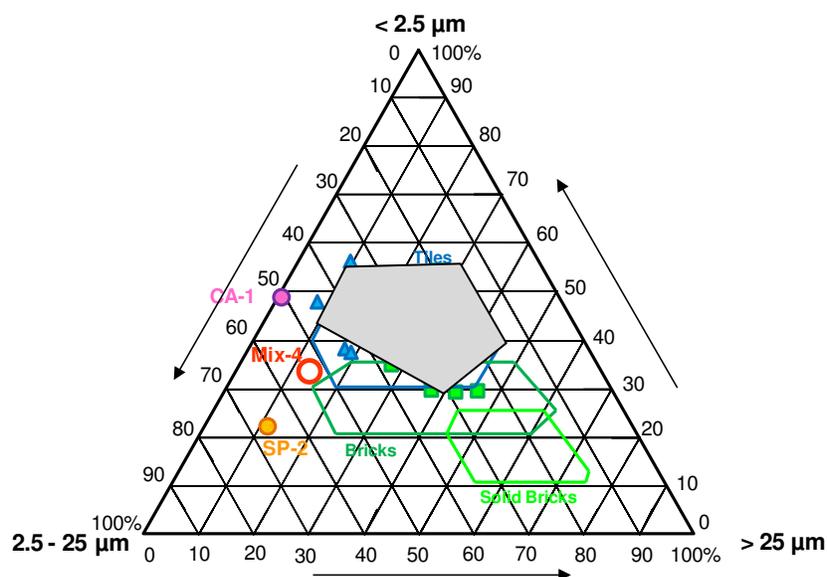


Figure 4-11 : Diagramme de Winkler de mélanges entre sédiments du bassin versant de la Durance

2.3.2. Evolution des compositions minéralogiques et géochimiques

Dans la réalisation du mélange, l'ajout de sable quartzueux ou de chamotte ne modifie pas la position du mélange dans le diagramme de Winkler, par contre, il en déplace la projection sur les diagrammes minéralogiques du CMR.

Avec une composition du mélange Mix-4 comprenant 50 % de sédiments de Cadarache, 42 % de sédiments de Serre-Ponçon et 8 % de sable quartzueux ou de chamotte, l'ajout de sable quartzueux, donne des proportions en quartz de 35 % et en minéraux silicatés de 34 % ; celui de chamotte fait passer ces proportions à 32 % et 38 %. Nous avons choisi de réaliser le mélange à partir de chamotte pour obtenir des proportions en quartz et minéraux silicatés acceptables.

La composition minéralogique du mélange Mix-4 se projette sur le diagramme ternaire du CMR (Figure 4-12) toujours en dehors du domaine des mélanges industriels, notamment par sa teneur un peu élevée en calcite (35 %). Les autres composants sont représentés par des valeurs tout à fait acceptables, y compris les minéraux silicatés (32 %). La projection des ensembles argileux est tout à fait satisfaisante malgré des proportions en illite un peu fortes.

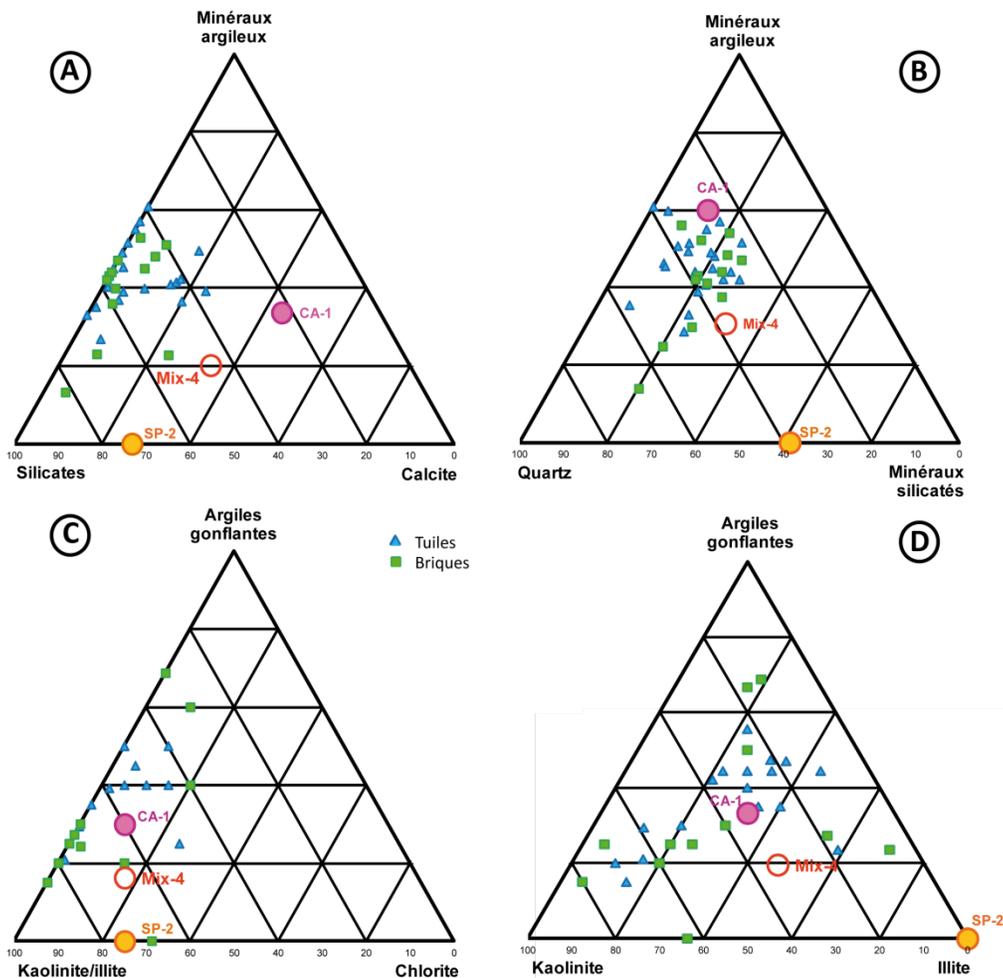


Figure 4-12 : Composition minéralogique de mélanges entre sédiments du bassin versant de la Durance

Le mélange de sédiments de compositions minéralogiques complémentaires provenant de retenues différentes permet de compenser :

- la forte teneur en calcite de l'échantillon de Cadarache par des ajouts ne contenant pas de calcite ;
- la très faible teneur en minéraux argileux de l'échantillon de Serre-Ponçon et son assemblage en minéraux argileux peu compatible avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite par la composition minéralogique beaucoup plus favorable des sédiments de Cadarache.

La projection des données géochimiques sur le diagramme d'Augustinik, montre que le rapport Al_2O_3/SiO_2 se situe dans la gamme de valeurs industrielles pour les tuiles, résultat attendu puisque les trois éléments du mélange présentaient, pour des assemblages minéralogiques contrastés, des rapports voisins. La projection sur l'axe des abscisses s'est déplacée vers les domaines industriels, grâce aux très faibles valeurs de la chamotte et aux valeurs intermédiaires de l'échantillon SP-2 compensant en partie la forte valeur de l'échantillon CA-1, due essentiellement à la présence de calcite.

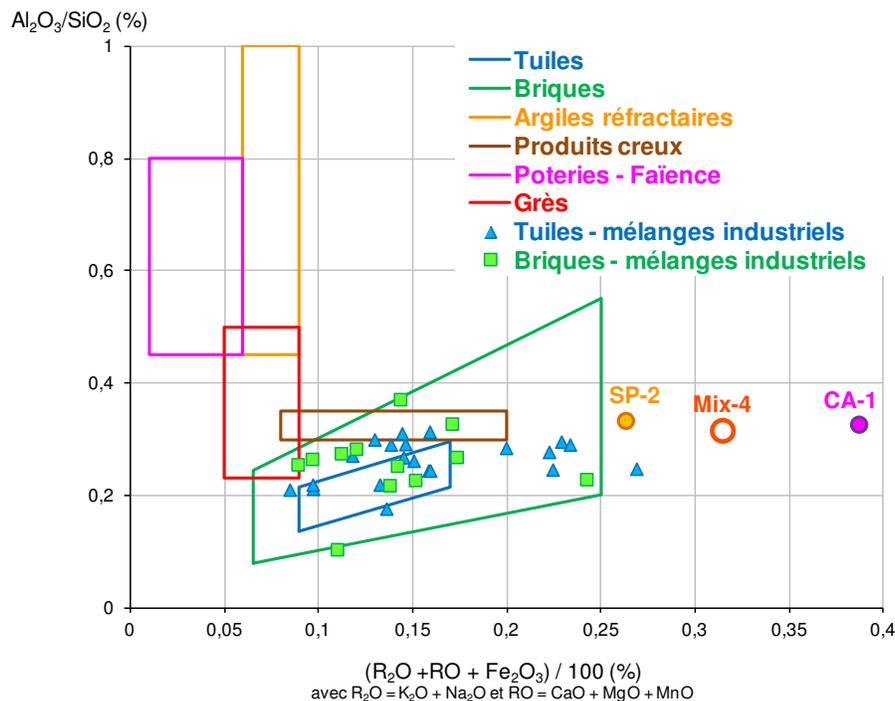


Figure 4-13 : Diagramme Augustinik de mélanges entre sédiments du bassin versant de la Durance

2.3.3. Performances lors des essais

Le mélange Mix-4 a pu être extrudé sans difficulté et les éprouvettes possèdent un bon aspect de surface.

Le comportement au séchage du mélange Mix-4 présente une allure générale proche de celui des sédiments bruts de Cadarache (Figure 4-14), notamment avec une pente de départ de l'eau colloïdale similaire. Ce résultat n'était pas forcément prévisible, nous n'avions en effet pas de référence sur le comportement au séchage des sédiments de Serre-Ponçon, celui-ci n'ayant pu être extrudé.

Malgré une teneur en eau de façonnage du même ordre de grandeur élevée que celle de Cadarache, le retrait de séchage diminue avec une courbe de Bigot très courte. De plus, le départ de l'eau d'interposition s'effectue avec un retrait faible de l'ordre de 0,3 % ce qui est encore plus favorable. Ce mélange présente une bonne aptitude au séchage. Toutefois, la teneur élevée en eau de façonnage pourrait s'avérer rédhibitoire pour l'industrie, car plus il y a d'eau à évacuer, plus il y a d'énergie consommée lors du séchage.

Le besoin élevé en eau de façonnage est attribué à la faible cohésion du mélange due à l'augmentation des teneurs en chlorites dans le mélange en provenance des sédiments de Serre-Ponçon. L'amélioration des caractéristiques est certainement due à la présence dans la distribution granulométrique de particules plus grosses (pôle 3), ce qui a été assuré grâce à l'apport des sédiments de Serre-Ponçon et de la chamotte. Cette distribution granulométrique étirée vers les plus fortes valeurs permet une meilleure évacuation de l'eau colloïdale et d'interposition.

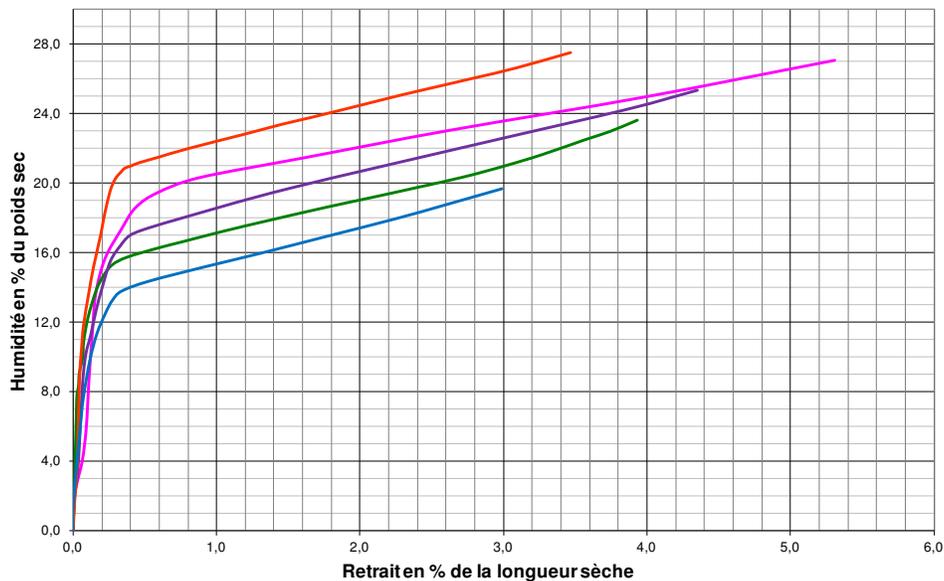


Figure 4-14 : Courbe de Bigot des mélanges CA-1 + SP + Chamotte (Mix-4)

(en rose, la courbe de CA-1 ; en vert, la courbe de Mix-1 ; en bleu, la courbe de Mix-2 ; en violet, la courbe de Mix-3 et en rouge, la courbe de Mix-4).

La même observation peut être effectuée sur le comportement à la cuisson des éprouvettes issues du mélange (Figure 4-15). En effet, mise à part une nette augmentation du pourcentage d'absorption d'eau autour de 31 % au lieu de 24 % pour les sédiments de Cadarache, les allures des courbes de retrait et d'absorption d'eau du mélange sont assez similaires à celles des autres mélanges et des sédiments bruts. De plus, on observe une stabilité des éprouvettes jusqu'à une température de cuisson de 1 100 °C, qui donne un palier de températures de cuisson assez large. Le retrait est quasi nul, proche de 0 %.

Enfin, sur les éprouvettes en « cru », la résistance mécanique de ce mélange, Mix-4 (Figure 4-16) est similaire à celle des sédiments bruts de Cadarache et mélanges obtenus par les ajouts de dégraissants. Lors de la cuisson, à une température de 950 °C, elle est intermédiaire entre celle du mélange des sédiments de Cadarache avec la chamotte et celle des mélanges avec le sable. A 1 100 °C, elle est proche

de celle du mélange avec la chamotte. Cette résistance mécanique est donc plus faible que pour les sédiments bruts de Cadarache, mais elle reste au-dessus de la limite basse acceptable pour les produits de terre cuite dans l'industrie. C'est sans aucun doute, la teneur plus élevée en minéraux silicatés qui fait diminuer cette résistance. Nous ne pouvons cependant pas discriminer dans ce mélange les effets respectifs de la chamotte et des sédiments de Serre-Ponçon. Il y a certainement une combinaison entre leurs effets respectifs et notamment la diminution due à l'ajout de chamotte telle qu'observée dans la partie 2.2.4. de ce chapitre. Au vu de ces résultats, les sédiments de Serre-Ponçon présentent des comportements céramiques proches de ceux que l'on attendrait d'un dégraissant.

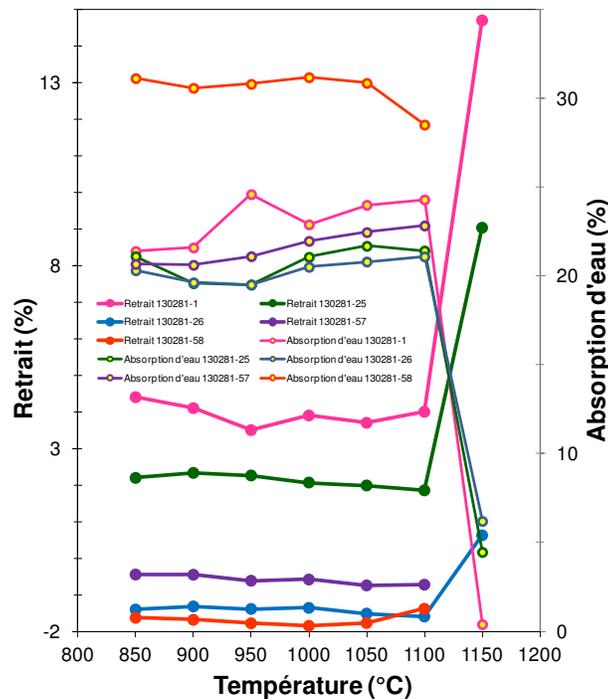


Figure 4-15 : Comportement à la cuisson des mélanges CA-1 + SP + Chamotte (Mix-4)

(en rose, la courbe de CA-1 ; en vert, la courbe de Mix-1 ; en bleu, la courbe de Mix-2 ; en violet, la courbe de Mix-3 et en rouge, la courbe de Mix-4).

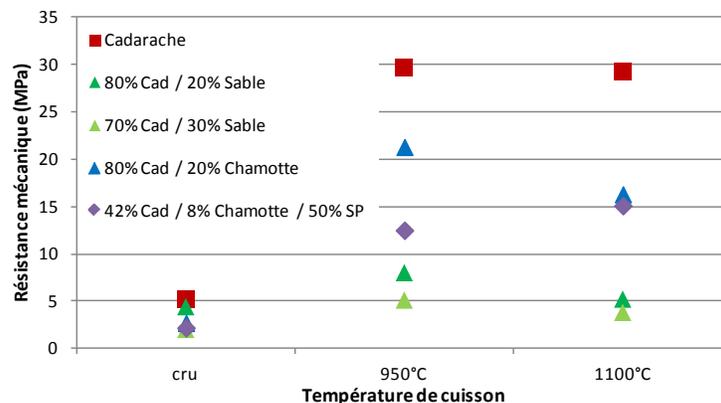


Figure 4-16 : Résistance mécanique des mélanges CA-1 + SP + Chamotte (Mix-4)

2.3.4. Conclusion

Les résultats sur le mélange entre les sédiments de Cadarache et de Serre-Ponçon avec un ajout de dégraissant (chamotte) montrent qu'il est possible d'obtenir un mélange d'une qualité proche de celle des mélanges industriels à partir de sédiments dont les propriétés sont complémentaires et qui, seuls ne possédaient pas de composition favorable à une utilisation dans l'industrie.

Cette démarche s'inscrit dans la logique des mélanges, couramment pratiqués pour la granulométrie, qu'elle étend à la composition minéralogique. Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pu réaliser qu'un seul mélange entre sites en privilégiant des proportions relativement égales et élevées entre les sédiments des deux sites. La fabrication du mélange, à partir de cette contrainte, a été guidée par l'obtention d'une distribution granulométrique proche de celle du domaine des tuiles. On pourrait facilement transposer cette démarche aux compositions minéralogiques ou géochimiques tout en assurant la compatibilité avec la distribution granulométrique.

3. Conclusions

La valorisation de déchets, de sédiments d'atterrissements naturels ou anthropiques, ou de produits issus de dragages constitue un enjeu sociétal important dans l'objectif de préservation des ressources naturelles, de gestions des déchets et de production respectueuse de l'environnement.

Les essais sur la valorisation des déchets, même s'ils sont concluants montrent que l'on ne peut en général incorporer que de faibles quantités de déchets dans le mélange. Même si leurs objectifs ne sont pas de diminuer la consommation de matière première mais bien d'améliorer les performances de leurs mélanges, la réduction de cette consommation de matière première reste limitée à quelques pourcents. La valorisation des sédiments ouvre, dans ce sens, des perspectives plus importantes car certains peuvent être utilisés directement.

L'un des problèmes récurrents des atterrissements de matériaux fins, qu'ils soient d'origines fluviales ou marines, est leur distribution granulométrique souvent trop faible et des minéralogies trop pauvres en matériaux argileux de type argiles gonflantes. Ces problèmes peuvent être facilement résolus par l'ajout de dégraissants permettant d'augmenter la granulométrie de la pâte argileuse, de diminuer les besoins en eau de façonnage et le retrait pendant le séchage. A côté de ces avantages, on peut observer la diminution de la plasticité et de la résistance mécanique si la teneur en minéraux argileux est un peu faible et l'assemblage en minéraux argileux n'est pas suffisamment favorable. Deux types de dégraissants sont couramment utilisés : du sable quartzeux qui aura un effet assez important sur la résistance mécanique du produit final et la chamotte dont les propriétés sont proches de celles des mélanges de production puisqu'il s'agit de déchets de production. La chamotte présente également l'intérêt de la valorisation d'un sous-produit de l'industrie de la terre cuite.

Dans ce travail, nous avons également abordé la question de la valorisation de sédiments qui a priori ne présentent pas de compositions granulométriques, minéralogiques ou géochimiques compatibles.

Les mélanges sont alors envisagés entre sédiments d'atterrissements sources de matériaux fins alors qu'ils ne peuvent être valorisés directement à cause de leur composition minéralogique, chimique et/ou

granulométrique. Nous les avons traités, comme des additifs, au même titre que les dégraissants et autres additifs, permettant ainsi l'amélioration des propriétés du mélange. La démarche a été illustrée avec un mélange obtenu à partir des sédiments de la retenue de Serre-Ponçon qui ne possèdent pas les caractéristiques nécessaires à une valorisation dans l'industrie de la terre cuite mais dont le mélange avec les sédiments de la retenue de Cadarache possède des propriétés proches de celles des mélanges industriels.

L'approche par ajout de dégraissant permet d'obtenir des mélanges tout à fait adéquats à partir de sédiments dont la composition n'était pas trop éloignée de celle attendue. Elle montre que l'apport de sable quartzeux peut modifier l'aspect de surface et réduire la résistance mécanique alors qu'elle est bénéfique à la réduction d'apport en eau de façonnage, au retrait au séchage et à la cuisson.

Une approche par mélange de sédiments dont la composition ne les qualifiait pas pour une valorisation dans l'industrie de la terre cuite a montré que le mélange de sédiments aux propriétés complémentaires, avec l'addition de dégraissant si nécessaire, conduit à un mélange dont les propriétés sont proches de celles des matériaux industriels, en réduisant le retrait au séchage et à la cuisson et avec une résistance mécanique acceptable. L'absorption d'eau peut être augmentée et être assez importante. Elle suggère ainsi une porosité importante et donc une utilisation comme matière première dans la fabrication de briques à enduire.

Ces pistes doivent être explorées plus finement par l'établissement de règles qui permettent de combiner les contraintes granulométriques et minéralogiques ou géochimiques. Elles ouvrent cependant le nombre d'atterrissements qui peuvent être valorisés.

Ces résultats suggèrent qu'aucun sédiment n'est à éliminer complètement de l'évaluation du renouvellement de la ressource à cause d'une composition initiale défavorable. Ils peuvent être en effet valorisés par des mélanges avec des sédiments aux propriétés complémentaires. Dans cette optique, des mélanges peuvent être envisagés par substitution d'une partie de matériaux naturels extraits de carrières par des sédiments.

Le volume de sédiments contribuant au renouvellement de la ressource en matériaux fins, matière première de l'industrie de la terre cuite, serait finalement beaucoup plus proche de l'évaluation du renouvellement de la source de matériaux que ne le suggéraient les conclusions du chapitre 3 établies à partir des données individuelles des sites. Les valeurs sont donc finalement supérieures à celles annoncées, qui pourraient être considérées comme un seuil bas, pessimiste.

Conclusions générales et perspectives

Les enjeux de cette thèse, l'évaluation du renouvellement de la ressource en matériaux argileux et l'exploration de pistes pour la valorisation du plus grand nombre d'atterrissements de matériaux fins s'inscrivent dans une démarche de préservation des matières premières et d'utilisation de matériaux jusqu'ici peu valorisés.

Après une présentation des résultats et conclusions de ce travail, nous aborderons les défis qui se présentent pour passer à un stade de pilotes pré-industriels.

Une ressource en renouvellement

L'évaluation du renouvellement de la ressource a été conduite en abordant les trois éléments qui sont indissociables dans une démarche de ce type : le renouvellement de la source, les taux d'accumulation des sédiments fins et la caractérisation minéralogique.

Le renouvellement de la source en matériaux fins

L'approche s'est, dans un premier temps, appuyée sur les types de formations géologiques exploitées par l'industrie de la terre cuite pour en rechercher des analogues dans les environnements actuels du territoire français.

Une partie des roches sédimentaires exploitées s'est formée dans **des conditions de dépôts qui ne se représenteront pas sur une période de temps compatible avec la période temps considérée** pour estimer le renouvellement de la source, le siècle, voire le millénaire. Ainsi, les **loëss et les terrasses alluviales**, qui appartiennent au régolithe, se forment durant les périodes glaciaires et sont considérés comme **non-renouvelables**.

Une autre partie du régolithe **se forme actuellement, mais sa préservation est fragilisée par les processus d'érosion. Les colluvions et les altérites** sont constitués d'atterrissements de faible taille disséminés sur le territoire pour les premiers et de larges surfaces pour les secondes. Pour ces deux types de formations, la compétition entre accumulation de matériaux fins et érosion due au ruissellement en liaison avec l'activité humaine présentent un bilan qui actuellement ne semble pas en faveur de l'accumulation de la source. Dans ces conditions, il est **difficile d'évaluer le renouvellement** de cette source à l'échelle du territoire français bien qu'elle puisse être localement conséquente.

Les accumulations de matériaux fins sont conséquentes et relativement bien préservées dans les milieux **fluvio-lacustres et les baies côtières estuariennes**. Depuis l'aménagement des cours d'eau à partir du milieu du XIX^{ème} siècle, on a assisté à un transfert des dépôts depuis les plaines d'inondation vers les retenues des ouvrages hydrauliques dans lesquelles plus de 2 Mm³/an s'accumulent. Les voies

navigables (canaux et rivières) et les ports, représentent une source pérenne de sédiments car ils sont régulièrement dragués pour les besoins de la navigation. Le volume de sédiments fins extraits annuellement correspond à plus de 9,5 Mm³. Les systèmes côtiers, baies estuariennes et ports maritimes constituent des lieux très favorables à l'accumulation de sédiments pour les premiers et de création de produits de dragage pour les seconds. Ils représentent près du tiers de l'accumulation des sédiments sur le territoire, majoritairement assuré par les grands ports maritimes (5 Mm³/an).

Sur l'ensemble du territoire, ce sont plus de 20 Mm³ de sédiments fins qui s'accumulent par an dont environ 80 % dans des atterrissements liés à l'activité humaine.

L'estimation du renouvellement de la ressource nécessite une évaluation des propriétés de ces sédiments pour une utilisation par l'industrie de la terre cuite. La démarche classique nécessite la réalisation de nombreux essais. Dans le cadre d'une démarche de faisabilité, nous proposons une méthode établie à partir de l'analyse minéralogique des mélanges.

Le Cadre Minéralogique de Référence

Le cadre minéralogique de référence a été construit à partir de l'analyse de la composition minéralogique et de l'assemblage de minéraux argileux de 36 mélanges industriels de production de briques et de tuiles français.

Ce cadre s'appuie sur des diagrammes ternaires construits à partir des minéraux dominants dans les mélanges industriels qui se projettent dans des zones bien définies. La composition minéralogique est définie à partir de deux diagrammes ternaires dont les pôles sont phyllosilicates, quartz et autres minéraux silicatés pour le premier et phyllosilicates, silicates et calcite pour le second. Deux autres diagrammes ternaires sont proposés pour l'assemblage en minéraux argileux, pour lesquels les projections sont plus dispersées pour le premier dont les pôles sont la kaolinite, l'illite et les argiles gonflantes et pour le second, kaolinite-illite, argiles gonflantes et chlorite.

56 échantillons prélevés sur les sites pilotes sont évalués à l'aide du CMR et par l'approche classique utilisée dans l'industrie de la terre cuite (analyses chimique et granulométrique, puis essais matériaux). La concordance des conclusions quant au potentiel des sédiments pour une utilisation dans l'industrie de la terre cuite, confirme que le CMR est un outil puissant de caractérisation rapide des matériaux fins. En effet, il permet ainsi d'avoir un premier regard, grâce à la composition minéralogique, sur le comportement du matériel au façonnage, au séchage, à la cuisson, sur sa résistance mécanique et ainsi d'envisager les précautions à prendre pour obtenir des produits de bonne qualité.

Le Renouvellement de la ressource

L'évaluation conduite à partir de sites pilotes représentatifs des milieux à fort taux d'accumulation de sédiments fins a mis en évidence à l'aide du CMR l'influence des formations géologiques, zones sources de sédiments.

- Les sédiments issus de l'altération des roches intrusives des massifs montagneux présentent des compositions en phyllosilicates, et plus particulièrement en argiles gonflantes généralement trop faibles pour envisager une utilisation dans l'industrie de la terre cuite ;
- de même, les sédiments provenant de l'érosion de formations sédimentaires comportent souvent des teneurs en calcite trop élevées, parfois très pénalisantes pour une utilisation industrielle.

Les sédiments côtiers, dont les sources sont souvent complexes entre apports fluviaux et dérive littorale, possèdent des teneurs élevées en Na dues au sel de l'eau de mer. Les analyses sur d'anciens sédiments marins aujourd'hui transformés en polders depuis plus d'un siècle montrent que, le sel est rapidement lessivé au cours du temps. Ce sont les atterrissements, dont la minéralogie est la plus proche de celle des mélanges industriels.

L'étude des sites pilotes nous a permis d'extrapoler les résultats obtenus à l'ensemble du territoire français. Nous avons ainsi éliminé les atterrissements alimentés par des apports provenant de roches intrusives, ou de sédiments trop carbonatés, par contre les dépôts fins des baies côtières ont été conservés. Cette estimation, montre que le taux de renouvellement de la ressource est de l'ordre de 5 Mm³/an, soit un tiers des sédiments fins qui s'accumule chaque année. Elle est, de plus, du même ordre de grandeur que la consommation annuelle française de matériaux fins par l'industrie de la terre cuite.

Cette évaluation mériterait d'être affinée en étudiant d'autres grands bassins versant dans des zones à fort taux d'érosion comme l'Isère ou la Loire, ou des baies côtières estuariennes comme celle de Bourgneuf, de la Vilaine...

Vers un potentiel accru de la valorisation des sédiments au sein de l'industrie de la terre cuite

L'évaluation du renouvellement de la ressource en matériaux fins pour l'industrie de la terre cuite montre qu'une grande partie de ces sédiments n'est pas directement utilisable à cause de sa granulométrie, de sa composition minéralogique ou géochimique. Nous proposons deux méthodes pour valoriser ceux-ci et élargir ainsi le volume de la ressource renouvelable :

- pour les sédiments dont les propriétés sont proches de celles des mélanges de production actuelle, celles-ci peuvent être facilement ajustées par l'ajout de dégraissant (sable quartzueux ou chamotte) dont la granulométrie est ajustée ;
- la valorisation de sédiments présentant des compositions *a priori* non compatibles avec une utilisation dans l'industrie de la terre cuite, est abordée à partir de mélanges de sédiments dont les propriétés sont complémentaires.

Ces mélanges et assemblages, permettent non seulement de valoriser une plus large part des sédiments fins des atterrissements, mais également d'utiliser des rebuts de production, la chamotte.

Perspectives

Ce travail de thèse répond à la question sur le caractère renouvelable de la matière première, mais il reste encore de nombreux freins pour la valorisation et l'exploitation directe par l'industrie de la terre cuite des sédiments. Il doit être perçu comme une étude préliminaire qui amène de multiples perspectives pour mener à l'un de ces objectifs principaux, la valorisation de sédiments dans l'industrie de la terre cuite. Une liste non-exhaustive de ces perspectives est présentée ici.

Evaluation de la variabilité de compositions au sein de l'atterrissement

Selon la taille et la morphologie d'un atterrissement, et en particulier lorsque l'on parle de retenues de barrages, la composition des sédiments peut être très variable. Les résultats présentés dans cette thèse ont été obtenus à partir d'un échantillon, au mieux de quelques uns par site. Des études complémentaires devront être envisagées pour comprendre la distribution granulométrique et minéralogique en fonction de la géométrie et de la taille des atterrissements, des courants. Cette caractérisation est un préalable à toute quantification plus précise du potentiel d'un atterrissement.

Incorporation de sédiments dans des mélanges de production

L'utilisation des mélanges de matières premières est une pratique courante dans l'industrie de la terre cuite pour ajuster les mélanges naturels qui sont exploités. Comme nous l'avons montré, la réalisation de mélanges (avec des dégraissants puis entre sédiments complémentaires) s'avère être aussi le meilleur moyen de valoriser des sédiments en améliorant leurs propriétés et ainsi de substituer la matière première actuellement utilisée par l'industrie.

Une autre piste est l'incorporation de sédiments au sein de mélanges de production afin de pouvoir substituer une partie des matières premières de ces mélanges à défaut de pouvoir les substituer en entier.

Polluants et produits dérivés de l'utilisation des sédiments

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas conduit d'analyses sur les contenus en métaux et polluants organiques des sédiments analysés. C'est cependant une étape indispensable dans la démarche de valorisation de ces sédiments, même si les quelques études conduites sur de matériaux analogues montrent un inertage de ces produits au cours de la cuisson. On peut envisager une approche comparative par lixiviation de produits issus des formations géologiques et des sédiments des atterrissements. Cette étape doit contribuer à la mise en place d'un statut précis pour ces sédiments dragués dans les zones fluviales, comme pour ceux du milieu maritime (Port-de-Rouen, 2007), où les teneurs limites de nombreux polluants sont clairement définies, et à l'acceptation des produits par la société (Cappuyns et al., 2015). Une législation plus précise sur le statut des sédiments dragués,

actuellement considérés comme des déchets, facilitera leur valorisation, pour l'instant très contraignante, en tant que "matière première secondaire" dans l'industrie.

*Réalisation d'une **production pilote** à l'échelle réelle de produits de terre cuite*

Les résultats très favorables des essais de valorisation de sédiments d'atterrissement et l'évaluation positive du renouvellement de la ressource permettent d'envisager une utilisation à court ou à moyen terme de ces sédiments en tant que matière première pour l'industrie de la terre cuite.

Nous avons déjà évoqué les questions de pollution qui représentent à elles seules un axe d'études. Un autre axe est celui du passage de l'échantillon de laboratoire au pilote préindustriel pour lequel de nombreuses questions se posent dont celle du séchage des sédiments. Comment assurer le séchage de larges volumes à des coûts compatibles avec ceux de l'industrie de la terre cuite ? Enfin, comment l'industrie de la terre cuite devra faire évoluer le processus de fabrication des tuiles et briques dans le cas de la valorisation de sédiments dans ses mélanges de production ?

Références bibliographiques

- Acchar, W., Rulff, B.M., and Segadães, A.M., 2009, Effect of the incorporation of a spent catalyst reject from the petroleum industry in clay products: *Applied Clay Science*, v. 42, p. 657-660.
- Acchar, W., Vieira, F.A., and Hotza, D., 2006, Effect of marble and granite sludge in clay materials: *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, v. 419, p. 306-309.
- Alary, C., 1998, Mécanismes et bilans de l'érosion dans le bassin versant méditerranéen aménagé : le cas de la Durance (S-E France): Marseille, Université Aix-Marseille III.
- Allen, G.P., Bonnefille, R., Courtois, G., and Migniot, C., 1974, Processus de sédimentation des vases dans l'estuaire de la Gironde Contribution d'un traceur radioactif pour l'étude du déplacement des vases: *La Houille Blanche*, p. 129-136.
- Allouche, A., and Nicolas, L., 2015, Entre perceptions, publicisation et stragies d'acteurs, la difficile inscription des risques littoraux dans l'action publique : focus camarguais: *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, v. HS-21.
- Alonso-Santurde, R., Andres, A., Viguri, J.R., Raimondo, M., Guarini, G., Zanelli, C., and Dondi, M., 2011, Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks: *Journal of Environmental Management*, v. 92, p. 994-1002.
- Alonso-Santurde, R., Coz, A., Quijorna, N., Viguri, J.R., and Andres, A., 2010, Valorization of Foundry Sand in Clay Bricks at Industrial Scale: *Journal of Industrial Ecology*, v. 14, p. 217-230.
- Alonso-Santurde, R., Coz, A., Viguri, J.R., and Andres, A., 2012, Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks: *Construction and Building Materials*, v. 27, p. 97-106.
- Alzieu, C., 1999, Dragages et environnement marin - État des connaissances, *in* Ifremer, ed., Ifremer.
- Arnaud-Fassetta, G., 2003, River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management: *Catena*, v. 51, p. 141-172.
- Asquini, L., Furlani, E., Bruckner, S., and Maschio, S., 2008, Production and characterization of sintered ceramics from paper mill sludge and glass cullet: *Chemosphere*, v. 71, p. 83-89.
- Augustinik, A.I., 1957, *Ceramic*: Leningrad.
- Barféty, J.C., Lemoine, M., De Graciansky, P.C., Tricart, P., and Mercier, D., 1995, Notice explicative de la carte géologique de Brinançon à 1/50000.
- Baruzzo, D., Minichelli, D., Bruckner, S., Fedrizzi, L., Bachiorrini, A., and Maschio, S., 2006, Possible production of ceramic tiles from marine dredging spoils alone and mixed with other waste materials: *Journal of Hazardous Materials*, v. 134, p. 202-210.
- Basegio, T., Berutti, F., Bernardes, A., and Bergmann, C.P., 2002, Environmental and technical aspects of the utilisation of tannery sludge as a raw material for clay products: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, p. 2251-2259.
- Belmonte, L.J., and Ottosen, L., 2015, Use of glaciogene marine clays for brick production in the Arctic, *Euroclay*: Edinburgh.
- Benoit, C., 2008, Biogéochimie et enregistrement des composés organostanniques dans les sédiments du bassin d'Arcachon: Bordeaux, Université Bordeaux I.
- BIOCLIM, 2005.

- Bonnot-Courtois, C., Caline, B., L'Homer, A., and Le Vot, M., 2002, La Baie du Mont Saint Michel et l'Estuaire de la Rance. .
- Bories, C., Borredon, M.-E., Vedrenne, E., and Vilarem, G., 2014, Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review: *Journal of Environmental Management*, v. 143, p. 186-196.
- Bouchet, J.M., Deltreil, J.P., Manaud, F., Maurer, D., and Trut, G., 1997, Etude intégrée du Bassin d'Arcachon, Ifremer.
- BRGM, 2010, Fiches Carrières.
- , 2015, InfoTerre, le visualiseur des données géoscientifiques.
- Bridge, J.S., 2003, Rivers and floodplains Forms, processes, and sediment record, Blackwell Publishing, 504 p.
- Bridgland, D., Westaway, R., and Cordier, S., 2009, FACTORS AFFECTING THE WORLDWIDE DEVELOPMENT OF LONG-TIMESCALE FLUVIAL TERRACE STAIRCASES: *Quaternaire*, v. 20, p. 5-23.
- Brune, G.M., 1953, Trap efficiency of reservoirs: *Trans Amer Geophys Union*, v. 34, p. 407-418.
- Bruneaux, M.A., 2011, Matières premières et adjuvants innovants - Etude des possibilités d'incorporation de déchets issus d'autres industries "matières premières secondaires": Clamart, CTMNC, p. 21.
- Campos, M., Velasco, F., Martinez, M.A., and Torralba, J.M., 2004, Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, p. 811-819.
- Cappuyns, V., Deweirt, V., and Rousseau, S., 2015, Dredged sediments as a resource for brick production: Possibilities and barriers from a consumers' perspective: *Waste Management*, v. 38, p. 372-380.
- Cerdan, O., Delmas, M., Négrel, P., Mouchel, J.-M., Petelet-Giraud, E., Salvador-Blanes, S., and Degan, F., 2012, Contribution of diffuse hillslope erosion to the sediment export of French rivers: *Comptes Rendus Geoscience*, v. 344, p. 636-645.
- CFBR, and Réservoirs, -.C.F.d.B.e.
- Chaumillon, E., Proust, J.N., Menier, D., and Weber, N., 2008, Incised-valley morphologies and sedimentary-fills within the inner shelf of the Bay of Biscay (France): A synthesis: *Journal of Marine Systems*, v. 72, p. 383-396.
- Chiang, K.-Y., Chien, K.-L., and Hwang, S.-J., 2008, Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment: *Journal of Hazardous Materials*, v. 159, p. 499-504.
- Christogerou, A., Kavas, T., Pontikes, Y., Koyas, S., Tabak, Y., and Angelopoulos, G.N., 2009, Use of boron wastes in the production of heavy clay ceramics: *Ceramics International*, v. 35, p. 447-452.
- Cojan, I., and Renard, M., 1997, *Sédimentologie*, 444 p.
- Colmar, A., Walter, C., Le Bissonnais, Y., and Daroussin, J., 2010, Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif: *Etude et Gestion des Sols*, v. 17, p. 19-32.
- CTMNC, 2012, Base de données des sites industriels français des tuiles et briques.
- Delmas, M., Cerdan, O., Cheviron, B., Mouchel, J.M., and Eyrolle, F., 2012, Sediment export from French rivers to the sea: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 37, p. 754-762.
- Demir, I., 2006, An investigation on the production of construction brick with processed waste tea: *Building and Environment*, v. 41, p. 1274-1278.
- Demir, I., Serhat Baspınar, M., and Orhan, M., 2005, Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production: *Building and Environment*, v. 40, p. 1533-1537.
- Desmazes, F., Sottolichio, A., Bertier, C., Libaud, J.B., and Beche, B., 2000, Dynamique de la crème de vase dans l'estuaire de la Loire, *in* CFL, P., ed., *XIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil: Les Sables d'Olonne*, p. 211-218.
- Diluca, J., 1975, Evolution de la Côte Picardie et de la baie de Somme: Amiens, OREAP, p. 97.

- Dixon, J.L., and von Blanckenburg, F., 2012, Soils as pacemakers and limiters of global silicate weathering: *Comptes Rendus Geoscience*, v. 344, p. 597-609.
- Dondi, M., Guarini, G., Raimondo, M., and Ruffini, A., 2002, Orimulsion fly ash in clay bricks - part 3: chemical stability of ash-bearing products: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, p. 1749-1758.
- Dupont, J.P., Guézennec, L., Lafite, R., Le Hir, R., and Lesueur, P., 2001, *Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension: Plouzané (France)*.
- Ehrhold, A., 1999, Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal : exemple de la baie du Mont Saint Michel: Caen, Université de Caen / Basse Normandie.
- El Fgaier, F., Lafhaj, Z., and Chapiseau, C., 2013, Use of clay bricks incorporating treated river sediments in a demonstrative building: Case study: *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 160-165.
- Eliche-Quesada, D., Corpas-Iglesias, F.A., Pérez-Villarejo, L., and Iglesias-Godino, F.J., 2012a, Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing: *Construction and Building Materials*, v. 34, p. 275-284.
- Eliche-Quesada, D., Martínez-García, C., Martínez-Cartas, M.L., Cotes-Palomino, M.T., Perez-Villarejo, L., Cruz-Perez, N., and Corpas-Iglesias, F.A., 2011, The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks: *Applied Clay Science*, v. 52, p. 270-276.
- Eliche-Quesada, D., Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Iglesias-Godino, F.J., Martínez-García, C., and Corpas-Iglesias, F.A., 2012b, Valorization of biodiesel production residues in making porous clay brick: *Fuel Processing Technology*, v. 103, p. 166-173.
- EPTB-Vilaine, 2011, Inondations dans le bassin de la Vilaine: paramètres hydro-géomorphologiques et flux terrigènes, Conference Inondation: Rennes.
- Etcheber, H., Taillez, A., Abril, G., Garnier, J., Servais, P., Moatar, F., and Commarieu, M.V., 2007, Particulate organic carbon in the estuarine turbidity maxima of the Gironde, Loire and Seine estuaries: origin and lability: *Hydrobiologia*, v. 588, p. 245-259.
- FFPP, 2005, Guide pour la gestion des opération de dragage, Fédération Française des Ports de Plaisance, p. 83.
- FFTB, 2014, Statistiques annuelles.
- Frar, I., Ben Allal, L., Ammari, M., and Lamrani, S., 2014, Intégration des matériaux en ettre cuite dans la valorisation des sédiments marins, MATEC Web of Conferences, EDP Sciences.
- Froidefond, J.-M., Jegou, A.-M., Hermida, J., Lazure, P., and Castaing, P., 1998, Variabilité du panache turbide de la Gironde par télédétection. Effets des facteurs climatiques: *Oceanologica Acta*, v. 21, p. 191-207.
- Frouin, M., Sebag, D., Durand, A., Laignel, B., Saliege, J.F., Mahler, B.J., and Fauchard, C., 2007, Influence of paleotopography, base level and sedimentation rate on estuarine system response to the Holocene sea-level rise: The example of the Marais Vernier, Seine estuary, France: *Sedimentary Geology*, v. 200, p. 15-29.
- Furlani, E., Bruckner, S., Minichelli, D., and Maschio, S., 2008, Synthesis and characterization of ceramics from coal fly ash and incinerated paper mill sludge: *Ceramics International*, v. 34, p. 2137-2142.
- Furlani, E., Tonello, G., Aneggi, E., and Maschio, S., 2012, Preparation and characterization of sintered ceramics made with spent foundry olivine sand and clay: *Ceramics International*, v. 38, p. 2619-2625.
- Furlani, E., Tonello, G., and Maschio, S., 2010, Recycling of steel slag and glass cullet from energy saving lamps by fast firing production of ceramics: *Waste Management*, v. 30, p. 1714-1719.
- Furlani, E., Tonello, G., Maschio, S., Aneggi, E., Minichelli, D., Bruckner, S., and Lucchini, E., 2011, Sintering and characterisation of ceramics containing paper sludge, glass cullet and different types of clayey materials: *Ceramics International*, v. 37, p. 1293-1299.

- Gallenne, B., 1974, Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude de la crème de vase: Nantes.
- Gautier, E., Corbonnois, J., Petit, F., Arnaud-Fassetta, G., Brunstein, D., Grivel, S., Houbrechts, G., and Beck, T., 2009, Multi-disciplinary approach for sediment dynamics study of active floodplains: Géomorphologie : relief, processus, environnement, v. 1.
- Gillot, T., 2014, Apport de l'étude des paléosols carbonatés et des climofonctions spécifiques aux reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques : application aux séries alluviales oligo-miocènes d'Europe occidentale: Paris, MINES ParisTech.
- GIP-Loire-Estuaire, 2014, La dynamique du bouchon vaseux, *in* indicateur, C., ed.: Nantes.
- GIP-Loire-Estuaire, 2015, http://www.loire-estuaire.org/accueil/des_missions/sage.
- GIP-Seine-Aval, 2008, Contextes climatique, morphologique et hydro-sédimentaire : dynamique des matériaux fins dans l'estuaire de la Seine, GIP Seine Aval.
- GIP-Seine-Aval, 2009, Usages et aménités : Dragages dans l'estuaire de la Seine.
- GIP-Seine-Aval, 2011, L'estuaire de la Seine, GIP-Seine-Aval.
- Grossel, H., Aujoulat, V., L'Yavanc, J., and Ratiskol, G., 2001, Dynamique des sédiments fins dans une zone côtière à forte turbidité à proximité de l'embouchure de la Loire, *Ifremer*, p. 158.
- Guézennec, L., Romañá, L.A., Gouzon, R., and Meyer, R., 1999, Seine-aval : un estuaire et ses problèmes, *in* aval, F.S., ed.: Brest, p. 29.
- Haase, D., Fink, J., Haase, G., Ruske, R., Pécsi, M., Richter, H., Altermann, M., and Jäger, K.D., 2007, Loess in Europe—its spatial distribution based on a European Loess Map, scale 1:2,500,000: *Quaternary Science Reviews*, v. 26, p. 1301-1312.
- Hamer, K., and Karius, V., 2002, Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment: *Waste Management*, v. 22, p. 521-530.
- Herek, L.C.S., Hori, C.E., Reis, M.H.M., Mora, N.D., Tavares, C.R.G., and Bergamasco, R., 2012, Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge: *Ceramics International*, v. 38, p. 951-959.
- Hjulström, F., 1935, The morphological activity of rivers: *Bulletin of the Geological Institution of the University of Upsala*, p. 227-527.
- Hojamberdiev, M., Eminov, A., and Xu, Y.H., 2011, Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles: *Ceramics International*, v. 37, p. 871-876.
- Huang, C., Pan, J.R., Sun, K.D., and Liaw, C.T., 2001, Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making: *Water Science and Technology*, v. 44, p. 273-277.
- Hydratec, 2013, Dossier de demande d'Autorisation PGPOD (Plan de Gestion Pluriannuel des Opérations de Dragage) - Canaux de Paris: Paris, Mairie de Paris, p. 181.
- IFEN, 2006, Un quart du littoral recule du fait de l'érosion: La lettre thématique mensuelle de l'Institut français de l'environnement, v. 113.
- Irie, M., Kashiwagi, K., Ujiie, K., Nsiri, I., Bouguerra, S., and Tarhouni, J., 2012, Feasibility of Exploitation of the Sediment in the Reservoirs for the Sustainability of Surface Water Resource in Tunisia: *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, v. 68.
- Jamshidi-Chenari, R., Rabanifar, H., and Veisesh, S., 2015, Utilisation of Sepidrud dam basin sediments in fired clay bricks: laboratory scale experiment: *Materiales de Construcción*, v. 65.
- Jordan, M.M., Almendro-Candel, M.B., Romero, M., and Rincon, J.M., 2005, Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tile bodies: *Applied Clay Science*, v. 30, p. 219-224.
- JORF, 1986, Loi n°86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral.
- Kervella, Y., 2010, Impact des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire: Caen, Université de Caen-Basse Normandie.

Kirkby, M.J., Jones, R.J.A., Irvine, B., Gobin, A., Govers, G., Cerdan, O., Van Rompaey, A.J.J., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., Grimm, M., Vieillefont, V., Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., Van Lynden, G.J. and Huting, J., 2004, Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, Version 1 October 2003. Explanation of Special Publication Ispra 2004 No. 73 (S.P.I.04.73). Volume 16: Luxembourg

European Commission, p. 18.

Kornmann, M., 2005, Matériaux de construction en terre cuite: Paris,Genève, 275 p.

Kornmann, M., 2006, La courbe de Bigot revisitée / New explanation of the Bigot' curve: L'industrie céramique et verrière, v. 1005, p. 44-54.

Lafhaj, Z., Samara, M., Agostini, F., Boucard, L., Skoczylas, F., and Depelseinaire, G., 2008, Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol (R) process and valorization in clay bricks: Construction and Building Materials, v. 22, p. 755-762.

Laguionie, P., and Jigorel, A., 2008, Etude bathymétrique du piège de Lyvet - 2007, INSA Rennes et Comité Opérationnel des Elus et des Usagers de la Rance (COEUR).

Lamothe, L., 1918, Les anciennes nappes alluviales et lignes de rivage du bassin de la Somme et leurs rapports avec celles de la Méditerranée occidentale: Bulletin de la Société Géologique de France, v. 18, p. 3-58.

Lautridou, J.P., Monnier, J.L., Morzadec, M.T., Somme, J., and Tuffreau, A., 1986, The Pleistocene of Northern France: Quaternary Science Reviews, v. 5, p. 387-393.

Leopold, M., and Volkel, J., 2007, Colluvium: Definition, differentiation, and possible suitability for reconstructing Holocene climate data: Quaternary International, v. 162, p. 133-140.

Leplat, J., 1968, Limons et loess: Bulletin de Liaison du Laboratoire Routiers des Ponts et Chaussées, v. 29, p. 1-32.

Levacher, D., Sanchez, M., Duan, Z., and Liang, Y., 2011, Valorisation en unité pilote de sédiments méditerranéens : étude des caractéristiques géotechniques et de la perméabilité: Revue Paralia, v. 4, p. 4.1-4.20.

Loutre, M.F., and Berger, A., 2000, Future climatic changes: Are we entering an exceptionally long interglacial?: Climatic Change, v. 46, p. 61-90.

Macaire, J.-J., Bellemlh, S., Di-Giovanni, C., De Luca, P., Visset, L., and Bernard, J., 2002, Sediment yield and storage variations in the Négron River catchment (south western Parisian Basin, France) during the Holocene period: Earth Surface Processes and Landforms, v. 27, p. 991-1009.

Maillet, G.M., and Clouet, H., 2012, Potentiel de l'étude des formations sédimentaires de l'estuaire moyen de la Loire pour la compréhension des processus morpho-dynamiques en milieu estuarien mésotidal: Dynamiques environnementales, v. 30, p. 41-54.

Malavoi, J.R., 2015, Communication orale au congrès ASF 2015.

Maneux, E., Probst, J.L., Veyssy, E., and Etcheber, H., 2001, Assessment of dam trapping efficiency from water residence time: Application to fluvial sediment transport in the Adour, Dordogne, and Garonne River basins (France): Water Resources Research, v. 37, p. 801-811.

Mano, V., F., M., Coynel, A., Etcheber, H., Ludwig, W., M., M., J., N., A., P., Blanc, G., and Schafer, J., 2006, Space and time variability of suspended particulate matter (SPM) transport in 32 French rivers (100 to 100 000 km²; daily to yearly), Sediment Dynamics and Hydromorphology of Fluvial Systems ICCE IAHS International Symposium: Dundee Scotland, p. 29-37.

Maschio, S., Furlani, E., Tonello, G., Faraone, N., Aneggi, E., Minichelli, D., Fedrizzi, L., Bachiarrini, A., and Bruckner, S., 2009, Fast firing of tiles containing paper mill sludge, glass cullet and clay: Waste Management, v. 29, p. 2880-2885.

- Menezes, R.R., Ferreira, H.S., Neves, G.A., Lira, H.D., and Ferreira, H.C., 2005, Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 25, p. 1149-1158.
- Merino, I., Arevalo, L.F., and Romero, F., 2007, Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives: *Waste Management*, v. 27, p. 1829-1844.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., and Jakeman, A.J., 2003, A review of erosion and sediment transport models: *Environmental Modelling & Software*, v. 18, p. 761-799.
- Meunier, A., 2005, *Clays*, 472 p.
- Meybeck, M., Laroche, L., Durr, H.H., and Syvitski, J.P.M., 2003, Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers: *Global and Planetary Change*, v. 39, p. 65-93.
- Mezencevova, A., Yeboah, N.N., Burns, S.E., Kahn, L.F., and Kurtis, K.E., 2012, Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick: *Journal of Environmental Management*, v. 113, p. 128-136.
- Milliman, J.D., and Syvitski, J.P.M., 1992, Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers: *The Journal of Geology*, v. 100, p. 525-544.
- Miramont, C., 2000, Evolution temporelle de la dynamique érosive et sédimentaire dans les Alpes du Sud : l'exemple des bassins de "terres noires" et de la Durance: *Forêt méditerranéenne*, v. XXI, p. 195-201.
- Monteiro, S.N., Pecanha, L.A., and Vieira, C.M.F., 2004, Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, p. 2349-2356.
- Monteiro, S.N., and Vieira, C.M.F., 2014, On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update: *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 599-610.
- Montero, M.A., Jordan, M.M., Hernandez-Crespo, M.S., and Sanfeliu, T., 2009, The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies: *Applied Clay Science*, v. 46, p. 404-408.
- Montier, C., Daroussin, J., and King, D., 1998, Cartographie de l'aléa "Erosion des sols" en France, *in Travaux*, E.e., ed., Volume 18: Orléans, Institut Français de l'Environnement.
- Muñoz Velasco, P., Morales Ortíz, M.P., Mendivil Giró, M.A., and Muñoz Velasco, L., 2014, Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review: *Construction and Building Materials*, v. 63, p. 97-107.
- Nichols, g., 2009, *Sedimentology and stratigraphy*, 432 p.
- Notebaert, B., Berger, J.F., and Brochier, J.L., 2014, Characterization and quantification of Holocene colluvial and alluvial sediments in the Valdaine Region (southern France): *Holocene*, v. 24, p. 1320-1335.
- ONML, O.N.d.I.M.e.d.L.-. 2004, Eurovision database.
- Pomerol, C., Lagabrielle, Y., Renard, M., 2005, *Eléments de Géologie*, 13ème édition: Paris, 762 p.
- Pont, D., and Roditis, J.-C., 1993, Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhône à l'amont immédiat de son delta: *Méditerranée*, p. 5-18.
- Port-de-Rouen, 2007, *Sédiments de dragage : référentiels et analyses*.
- Provensal, M., Arnaud-Fassetta, G., and Vella, C., 2004, Géomorphologie du delta du Rhône: *LBulletin Archéologique de Provence*, v. Supplément 2, p. 59-63.
- Pye, K., 1995, The nature, origin and accumulation of loess: *Quaternary Science Reviews*, v. 14, p. 653-667.
- Quijorna, N., Coz, A., Andres, A., and Cheeseman, C., 2012, Recycling of Waelz slag and waste foundry sand in red clay bricks: *Resources Conservation and Recycling*, v. 65, p. 1-10.

- Radakovitch, O., Roussiez, V., Ollivier, P., Ludwig, W., Grenz, C., and Probst, J.-L., 2008, Input of particulate heavy metals from rivers and associated sedimentary deposits on the Gulf of Lion continental shelf: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 77, p. 285-295.
- Remini, B., 2006, Valorisation de la vase des barrages - quelques exemples algériens: *Larhyss Journal*, v. 5, p. 75-89.
- Richard, F., 1987, *La Terre cuite architectural : 4000 ans de briques et de tuiles des origines à la France moderne*: Clamart, CTTB, p. 103.
- Ricordel-Prognon, C., 2007, *Datations par paléomagnétisme des paléoaaltérations du Massif Central et de ses bordures : implications géodynamiques.*: Paris, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Ricordel-Prognon, C., Quesnel, F., and Thiry, M., 2009, *Les altérites : l'épiderme de la Terre*, BRGM.
- Romaña, L.A., 1994, Les grands estuaires français, *in* Equinix, ed., spécial environnement littoral, Volume 47-48, Ifremer, p. 6.
- Romero, M., Andres, A., Alonso, R., Viguri, J., and Rincon, J.M., 2008, Sintering behaviour of ceramic bodies from contaminated marine sediments: *Ceramics International*, v. 34, p. 1917-1924.
- Romero, M., Andres, A., Alonso, R., Viguri, J., and Rincon, J.M., 2009, Phase evolution and microstructural characterization of sintered ceramic bodies from contaminated marine sediments: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 29, p. 15-22.
- Roose, E., 1994, *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*, 424 p.
- Roziere, E., Samara, M., Loukili, A., and Damidot, D., 2015, Valorisation of sediments in self-consolidating concrete: Mix-design and microstructure: *Construction and Building Materials*, v. 81, p. 1-10.
- RTM, 2015, *Base de données de la Restauration des Terrains de Montagnes RTM*.
- Samara, M., 2007, *Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite*: Lille, Ecole centrale Lille.
- Samara, M., Lafhaj, Z., and Chapiseau, C., 2009, Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment: *Journal of Hazardous Materials*, v. 163, p. 701-710.
- Sanchez-Angulo, M., 2000, *Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire*, HDR: Caen, p. 89.
- Sanchez, M., 2008, *Dynamique des sédiments fins dans une zone côtière à forte turbidité de l'embouchure de la Loire*, Xèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil: Sophia Antipolis, p. 169-178.
- Schumm, S.A., 1985, Patterns of Alluvial Rivers: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 13, p. 5-27.
- Segadaes, A.M., Carvalho, M.A., and Acchar, W., 2005, Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products: *Applied Clay Science*, v. 30, p. 42-52.
- SeineGrandsLacs, 2015, *Etablissement Public Territorial de bassin Seine Grands Lacs*.
- SHOM, 2015, *Cartographie de marnage issue de l'outil en ligne Cartodyn du SHOM*.
- Sogreah, 2002, *Amélioration de l'hydraulique du Bassin d'Arcachon*, *in* publique, D.d.E., ed., Volume N°711105-R6.
- Souza, G.P., and Holanda, J.N.F., 2004, Densification behaviour of petroleum waste bearing clay-based ceramic bodies: *Ceramics International*, v. 30, p. 99-104.
- Staebler, M., 2006, *L'estuaire de la Loire*: Nantes, GIP-Loire-Estuaire.
- Stone, R.P., and Hilborn, D., 2000, *Equation universelle des pertes en terre (USLE)*: Fiche technique - Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario.
- Thiry, M., 2013, *Technique de préparation des minéraux argileux en vue de l'analyse par diffraction des Rayons X*: Fontainebleau, MINES ParisTech.

- Torres, P., Fernandes, H.R., Agathopoulos, S., Tulyaganov, D.U., and Ferreira, J.M.F., 2004, Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, p. 3177-3185.
- Torres, P., Fernandes, H.R., Olhero, S., and Ferreira, J.M.F., 2009, Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 29, p. 23-30.
- Turgut, P., and Algin, H.M., 2007, Limestone dust and wood sawdust as brick material: *Building and Environment*, v. 42, p. 3399-3403.
- Van Rompaey, A., Vieillefont, V., Jones, R., Montanarella, L., Verstraeten, G., Bazzoffi, P., Dostal, T., Krása, J., Deventer, J., and Poesen, J., 2003, Validation de l'aléa érosion des sols à l'échelle européenne., *in* Report, E.S.B.R., ed., Volume 13: Luxembourg, European Communities, p. 27.
- VNF-Sud-Ouest, 2011, Dossier de demande d'Autorisation PGPOD (Plan de Gestion Pluriannuel des Opérations de Dragage) - Canal du Midi, Voies Navigables de France.
- VNF, 2010, Base de données des barrages et écluses en France.
- Weber, N., 2004, Morphologie, architecture des dépôts, évolution séculaire et millénaire du littoral charentais : Apports de la sismique réflexion combinée à des suivis bathymétriques et validée par des vibrocarottages.: La Rochelle, Université de La Rochelle.
- Winkler, H.G.F., 1954, Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineral-bestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer erzeugnisse: *Ber. DKG*, v. 31, p. 337-343.
- Wolman, M.G., and Leopold, L.B., 1957, River flood plains; some observations on their formation, *Professional Paper*.
- Xu, Y., Yan, C.H., Xu, B.T., Ruan, X.H., and Wei, Z., 2014, The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick: *Ceramics International*, v. 40, p. 8833-8840.
- Yang, X.K., and Lu, X.X., 2014, Estimate of cumulative sediment trapping by multiple reservoirs in large river basins: An example of the Yangtze River basin: *Geomorphology*, v. 227, p. 49-59.
- Yin, Q.Z., and Berger, A., 2015, Interglacial analogues of the Holocene and its natural near future: *Quaternary Science Reviews*, v. 120, p. 28-46.
- Yusuf, H., Pallu, M.S., Samang, L., and Tjaronge, M.W., 2012, The utilization of Bili-bili Dam's dredging sediment stabilized with cement for construction material: *International Journal of Engineering and Technology*, v. 2.
- Zhang, L.Y., 2013, Production of bricks from waste materials - A review: *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 643-655.
- Zhou, J., Li, T.T., Zhang, Q.Y., Wang, Y.X., and Shu, Z., 2013, Direct-utilization of sewage sludge to prepare split tiles: *Ceramics International*, v. 39, p. 9179-9186.
- Zimmer, A., and Bergmann, C.P., 2007, Fly ash of mineral coal as ceramic tiles raw material: *Waste Management*, v. 27, p. 59-68.

Annexes

Annexe 1. Les sites industriels.....	209
Annexe 2. Les retenues de barrages.....	219
Annexe 3. Liste des échantillons.....	231
Annexe 4. Les analyses minéralogiques.....	239
Annexe 5. Les analyses géochimiques.....	257
Annexe 6. Les analyses granulométriques.....	275
Annexe 7. Les essais matériaux.....	279
Annexe 8. Les résultats des analyses classiques par systèmes pilotes.....	283

Annexe 1. Les sites industriels

Sites de production tuiles et briques en France

La liste suivante comprend les 149 sites de production français qui représentent 95 % de la production française. Ce sont les industriels ressortissant du CTMNC et qui le financent à partir d'une taxe acceptée sur la production.

Nous disposons d'une estimation de la production annuelle pour 49 de ces sites. Cette estimation a été effectuée par le CTMNC en 2010. Ils correspondent aux sites pour lesquels des analyses de Carbone organique et total sont réalisés au centre.

Les coordonnées GPS sont fournies dans le système WGS 84 en degrés décimales.

Intitulé du site	Code postal	Commune	Type de production	Production annuelle en t (2010)	Latitude	Longitude
BARTHE SA	31430	LE FOUSSERET	Autres		43,3054418	1,0394635
BRIQUETERIE BOUISSET	81240	ALBINE	Mixte		43,466227	2,5270069
BRIQUETERIE BOUYER LEROUX	49280	LA SEGUINIÈRE	Briques	121307	47,090205	-0,948989
BRIQUETERIE BOUYER LEROUX	49270	SAINT LAURENT DES AUTELS	Briques	30080	47,2692214	-1,2324368
BRIQUETERIE BOUYER LEROUX	85570	SAINT MARTIN DES FONTAINES	Mixte	103120	46,5374856	-0,9062174
BRIQUETERIE CAPELLE	31190	GREPIAC	Mixte		43,3708124	1,4545559
BRIQUETERIE CHIMOT	59770	MARLY	Briques		50,3545313	3,5371389
BRIQUETERIE D'ALLONNE	60000	ALLONNE	Briques		49,4067957	2,1126209
BRIQUETERIE DE NAGEN	31590	SAINT MARCEL PAULEL	Mixte		43,666997	1,61496
BRIQUETERIE DE TREMONT	49310	TREMONT	Mixte		47,15079	-0,474325
BRIQUETERIE DEMOOR ET COLIN	62370	RUMINGHEM	Briques		50,855697	2,1643441
BRIQUETERIE LAGRIVE	14100	GLOS	Briques		49,121558	0,281816
BRIQUETERIE LOULERGUE	36230	NEUVY SAINT SEPULCRE	Mixte		46,5977247	1,7933519
BRIQUETERIE LUTTON	85140	LA MERLATIÈRE	Briques		46,76282	-1,305982
Briqueterie PASCAL	15100	GRIZOLS DE SAINT GEORGES	Mixte		45,00945	3,115489
BRIQUETERIE SAINTE MARCELLE	66490	SAINT JEAN PLA DE CORTS	Briques		42,5106313	2,7915307
BRIQUETERIES DU NORD	59115	LEERS	Briques		50,6869948	3,2186781
BRIQUETERIES DU NORD	59160	LOMME	Briques	20744	50,6461351	3,0125561
BRIQUETERIES DU NORD	59242	TEMPLEUVE	Briques	22067	50,5182836	3,1534015
Carrelage BOUTAL	83690	SALERNES	Autres		43,563768	6,231328
CARRELAGE DE LA BUSSIÈRE	45230	LA BUSSIÈRE	Autres		47,742382	2,737295

Intitulé du site	Code postal	Commune	Type de production	Production annuelle en t (2010)	Latitude	Longitude
CERAMIQUE DU BEAUJOLAIS	69400	VILLEFRANCHE SUR SAONE	Autres		45,9884314	4,7355486
CORBET Terres cuites	49230	TILLIERES	Mixte		47,1523265	-1,1422531
ENTREPRISE YOU	85260	LES BROUZILS	Briques		46,848784	-1,295906
Ets Céramiques WOESTELANDT	59143	NIEURLET	Tuiles		50,7877546	2,2930475
Ets MERCIER ET FILS	17600	SAINT SORNIN	Autres		45,7613736	-0,9420063
GILLAIZEAU TERRE CUIITE	85310	CHAILLE SOUS LES ORMEAUX	Mixte		46,571948	-1,377289
GRANULATS EXPANSES DE LA MAYENNE	53250	VILLEPAIL	Autres		48,403872	-0,295117
IMERYS TC - GROSSOUVRE	18600	GROSSOUVRE	Tuiles		46,8786684	2,9369159
IMERYS TC - BLAJAN	31350	BLAJAN	Tuiles	43694	43,26028	0,642032
IMERYS TC - COLOMIERS CEDEX	31773	COLOMIERS CEDEX	Briques	104073	43,604526	1,30816
IMERYS TC - PIBRAC	31773	COLOMIERS CEDEX	Briques		43,6036034	1,3338048
IMERYS TC - LEGUEVIN	31490	LEGUEVIN	Tuiles	115958	43,5914483	1,2511148
IMERYS TC - GIRONDE SUR DROPT	33190	GIRONDE SUR DROPT	Briques	120293	44,584143	-0,090259
IMERYS TC - COMMENAILLES	39140	COMMENAILLES	Tuiles	78507	46,801642	5,453018
IMERYS TC - SAINT GEOURS D'AURIBAT	40380	SAINT GEOURS D'AURIBAT	Tuiles	193660	43,7609428	-0,8379957
IMERYS TC - MABLY	42300	MABLY	Briques	111113	46,072833	4,042404
IMERYS TC - SAINT MARCELLIN EN FOREZ	42680	SAINT MARCELLIN EN FOREZ	Briques	86687	45,497422	4,1838232
IMERYS TC - VERGONGHEON	43360	VERGONGHEON	Autres	24320	45,3694685	3,3169396
IMERYS TC - LA BOISSIERE DU DORE	44430	LA BOISSIERE DU DORE	Briques	63660	47,2348906	-1,2173894
IMERYS TC - VIHIERES	49310	VIHIERES	Autres	0	47,1492966	-0,5290035
IMERYS TC - PARGNY SUR SAULX	51340	PARGNY SUR SAULX	Tuiles	136646	48,7540968	4,8437272
IMERYS TC - PHALEMPIN	59133	PHALEMPIN	Tuiles	33271	50,5058789	3,021992
IMERYS TC - SAINT GERMER DE FLY	60850	SAINT GERMER DE FLY	Tuiles	269576	49,4464111	1,8085977
IMERYS TC - WARDRECQUES	62120	WARDRECQUES	Tuiles	74347	50,7003806	2,3496722
IMERYS TC - QUINCIEUX	69650	QUINCIEUX	Tuiles	120444	45,914811	4,7786859
IMERYS TC - SAINTE FOY L'ARGENTIERE	69610	SAINTE FOY L'ARGENTIERE	Tuiles	223507	45,704408	4,470519
IMERYS TC - DAMIATTE	81220	DAMIATTE	Tuiles	26243	43,651434	1,974643
Jacques BREST Céramiques	83690	SALERNES	Autres		43,563768	6,231328
LA FRANÇAIS DES TUILES ET BRIQUES	03170	DOYET	Mixte		46,347936	2,820993
LE POTIER MARSEILLAIS	13009	MARSEILLE	Autres		43,2493047	5,4017398
LES CARREAUX DE CHESLEY	10210	CHESLEY	Autres		47,9767333	4,1086059
LES GRES MEDOCAINS	33480	LISTRAC MEDOC	Briques		45,045499	-0,885621
LES TERRES CUITES J. SISMONDINI	83690	SALERNES	Autres		43,5717009	6,2163558
LES TUILERIES DE PRENTEGARDE	15250	SAINT PAUL DES LANDES	Mixte		44,955447	2,279525
M. Alain BOUQUET	33190	MORIZES	Tuiles		44,6069126	-0,0975153
M. Frédéric LIGNAT	33620	LARUSCADE	Autres		45,1211795	-0,3704914
M. Jean PERRIN	43700	BRIVES CHARENSAC	Mixte		45,0455033	3,9318103
M. JEAN-CHARLES MAUFAUGERAT	47290	MONBAHUS	Tuiles		44,5482573	0,5349435

Intitulé du site	Code postal	Commune	Type de production	Production annuelle en t (2010)	Latitude	Longitude
MONIER - SIGNY L'ABBAYE	08460	SIGNY L'ABBAYE	Tuiles		49,6984629	4,41868
MONIER - LIMOUX MASSIA	11300	LIMOUX	Tuiles	200854	43,0505287	2,2941429
MONIER - MARSEILLE	13016	MARSEILLE	Tuiles	139688	43,3552135	5,3499254
MONIER - ROUMAZIERES LOUBERT	16270	ROUMAZIERES LOUBERT	Tuiles	162188	45,8958	0,5761
Monsieur Nicolas DAVID	33190	MORIZES	Autres		44,6063003	-0,0957672
POTERIE DES TROIS ILETS	97229	LES TROIS ILETS	Briques	16620	14,6097322	-61,0935366
RAIRIES MONTRIEUX	49430	LES RAIRIES	Briques		47,6506486	-0,2021803
SA Raymond JOSSE	22130	PLANCOET	Autres		48,5225405	-2,2319244
SARL Alain VAGH Céramiques	83690	SALERNES	Autres		43,5501058	6,2449644
SARL FAUVEL	50680	MOON SUR ELLE	Autres		49,2193771	-1,0538778
SARL HERMOUET	85140	CHAUCHE	Briques		46,834727	-1,280567
SARL MAZEROLAS ET FILS	87800	SAINT HILAIRE LES PLACES	Tuiles		45,644765	1,158501
SARL STORME PRUVOST	33190	GIRONDE SUR DROPT	Mixte		44,599899	-0,08652
SAS BRIQUETERIE LAMOUR	59119	WAZIERS	Briques		50,3834654	3,1116238
SAVERDUN TERRE CUITE - SAVERDUN	09700	SAVERDUN	Briques		43,2414443	1,5675476
SAVERDUN TERRE CUITE - SAINT MARTIN DE VILLEREGLAN	11300	SAINT MARTIN DE VILLEREGLAN	Briques		43,106627	2,210527
SAVERDUN TERRE CUITE - MAUGUIO	34130	MAUGUIO	Briques		43,6154409	4,010165
SE des Ets Louis TRICHARD	83690	SALERNES	Autres		43,563768	6,231328
TEGULYS	19250	MEYMAC	Tuiles		45,5367	2,1465519
TERRE CUITE AVALLONNAISE	89200	LUCY LE BOIS	Autres		47,5603944	3,8898779
TERRE CUITE DE BOURGOGNE	71430	PALINGES	Tuiles		46,558285	4,218189
TERRE CUITE DE SAINT JEAN D'ANGLE	17620	SAINT JEAN D'ANGLE	Autres		45,81325	-0,949874
TERRE CUITE DES MAUGES	49340	VEZINS	Briques		47,123556	-0,788103
TERRE CUITE SAGET	45720	COULLONS	Briques		47,651596	2,489823
TERREAL - REVEL	11400	CASTELNAUDARY	Tuiles	75653	43,326375	1,950575
TERREAL - SEGALA	11320	LA BASTIDE D'ANJOU	Tuiles	141299	43,348145	1,84858
TERREAL - LASBORDES	11400	LASBORDES	Briques	130027	43,293889	2,047279
TERREAL - SAINT MARTIN LALANDE	11400	SAINT MARTIN LALANDE	Tuiles	128326	43,315311	2,001581
TERREAL - SAINT PAPOUL	11400	SAINT PAPOUL	Autres	0	43,318235	1,95352
TERREAL - BAVENT	14860	BAVENT	Tuiles	75757	49,230122	-0,191661
TERREAL - CHASSENEUIL S/BONNIEURE	16260	CHASSENEUIL S/BONNIEURE	Autres		45,82447	0,4502
TERREAL - ROUMAZIERES LOUBERT	16270	ROUMAZIERES LOUBERT	Tuiles	391590	45,885885	0,58344
TERREAL - LE CHAMBON	16500	SAINT MAURICE DES LIONS	Tuiles	0	45,937325	0,688265
TERREAL - MONTPON MENESTEROL	24700	MONTPON MENESTEROL	Tuiles		45,0481	0,175735
TERREAL - COLOMIERS	31770	COLOMIERS	Briques	182153	43,614492	1,300893
TERREAL - REVEL	31250	REVEL	Autres		43,464407	1,981595
TERREAL - CHAGNY	71150	CHAGNY	Tuiles	105125	46,9048	4,75377
TERREAL - LES MUREAUX	78130	LES MUREAUX	Tuiles	60875	48,98487	1,901805

Intitulé du site	Code postal	Commune	Type de production	Production annuelle en t (2010)	Latitude	Longitude
TERREAL - SAINT AMANS SOULT	81240	SAINT AMANS SOULT	Briques	42033	43,491501	2,570091
TERRES CUITES D'AIZENAY	85190	AIZENAY	Tuiles		46,740405	-1,608689
TERRES CUITES DE COURBOISSY	89120	CHARNY	Autres		47,909232	3,101466
TERRES CUITES DE LA LORNE	36300	RUFFEC	Briques		46,632695	1,063015
TERRES CUITES DE LASCHAMPS	63380	PONTAUMUR	Autres		45,88615	2,68436
TERRES CUITES DE RAUJOLLES	12100	MILLAU	Briques		44,087151	3,06321
TERRES CUITES DU SAVES	31470	EMPEAUX	Briques		43,52717	1,085271
TERRES CUITES Yvon CAILLEAU	49430	LES RAIRIES	Autres		47,651559	-0,204632
TUILERIE AUPEIX	87800	SAINT HILAIRE LES PLACES	Tuiles		45,601816	1,157783
TUILERIE BLACHE	69700	LOIRE SUR RHONE	Tuiles		45,58242	4,773485
TUILERIE BRIQUETERIE D'AMANCE	10140	AMANCE	Mixte		48,294344	4,51206
TUILERIE BRIQUETERIE DE CHARDAT	16500	CHARDAT D'ABZAC	Mixte		46,10285	0,703083
TUILERIE BRIQUETERIE DE NIDERVILLER	57565	NIDERVILLER	Mixte		48,71564	7,10929
TUILERIE BRIQUETERIE LITAUD	87620	SEREILHAC	Autres		45,77704	1,093145
TUILERIE BRIQUETERIE Pierre LANTER	67270	HOCHFELDEN	Briques		48,760359	7,563212
TUILERIE BRIQUETERIE ROYER	10200	SOULAIN D'HUYS	Mixte		48,234326	4,705215
TUILERIE Bruno CAILLET	49230	TILLIERES	Tuiles		47,15466	-1,128009
TUILERIE CAZAUBON	32450	BOULAU	Tuiles		43,540638	0,773749
TUILERIE DE CONDAT	47500	FUMEL	Tuiles		44,50253	0,990205
TUILERIE DE LA BRETECHE	45240	LIGNY LE RIBAUT	Briques		47,683218	1,780639
TUILERIE DE LA CHAPELLE	58800	CORBIGNY	Tuiles		47,275236	3,680082
TUILERIE DE PRONY	69620	OINGT	Mixte		45,948971	4,58359
TUILERIE DEJEAN	33190	MORIZES	Tuiles		44,617918	-0,090546
TUILERIE DES CHAUFFETIERES	61290	L'HOME CHAMONDOT	Autres		48,589432	0,715539
TUILERIE FILLON	33920	SAINT YZAN DE SOUDIAC	Tuiles		45,138558	-0,445625
TUILERIE JOYAT	33620	CEZAC	Tuiles		45,078066	-0,381204
TUILERIE LAGONOTTE	36190	SAINT PLANTAIRE	Tuiles		46,480466	1,607694
TUILERIE LAMBERT	16310	SAINT ADJUTORY	Tuiles		45,783329	0,46667
TUILERIE LAURENT	21390	NAN SOUS THIL	Mixte		47,388111	4,35665
TUILERIE PILLIER	16190	SALLE LAVALLET	Autres		45,39904	0,21043
TUILERIE THIBAUT	77120	SAINTS	Autres		48,762825	3,044573
TUILERIE VICTOT ET FILS	86600	SANXAY	Autres		46,436015	0,123935
TUILERIES DES BRUMALES	36190	SAINT PLANTAIRE	Mixte		46,466724	1,656113
TUILES ET BRIQUES DU BERRY	18400	LUNERY	Tuiles		46,952976	2,25338
TUILES ET BRIQUES PRALONG	47120	SAINT ASTIER	Tuiles		44,677	0,18475
TUILES ET CARREAUX CHARBLEYTOU	33620	LAPOUYADE	Tuiles		45,09527	-0,311519
WIENERBERGER SAS - PONT DE VAUX	01190	PONT DE VAUX	Briques	120880	46,433716	4,945689
WIENERBERGER SAS - LANTENNE VERTIERE	25170	LANTENNE VERTIERE	Tuiles	194979	47,23265	5,775874
WIENERBERGER SAS - DURTAL	49430	DURTAL	Briques	71293	47,67084	-0,243534

Intitulé du site	Code postal	Commune	Type de production	Production annuelle en t (2010)	Latitude	Longitude
WIENERBERGER SAS - FLINES LES RACHES	59148	FLINES LES RACHES	Briques	30993	50,429166	3,169528
WIENERBERGER SAS - CAUCHY A LA TOUR	62260	CAUCHY A LA TOUR	Briques	0	50,501315	2,456854
WIENERBERGER SAS - HULLUCH	62410	HULLUCH	Briques	142433	50,48709	2,801585
WIENERBERGER SAS - ACHENHEIM	67200	ACHENHEIM	Briques	134873	48,58116	7,631
WIENERBERGER SAS - BETSCHDORF	67660	BETSCHDORF	Briques	105467	48,899176	7,910753
WIENERBERGER SAS - SELTZ	67470	SELTZ	Tuiles	142174	48,896095	8,098216
WIENERBERGER SAS - PONTIGNY	89230	PONTIGNY	Tuiles		47,906165	3,71137
WIENERBERGER SAS - ANGERVILLIERS	91470	ANGERVILLIERS	Briques	32880	48,64508	2,07558
WIENERBERGER SAS - OLLAINVILLE	91340	OLLAINVILLE	Briques	41183	48,599807	2,234441

Carrières associées aux Sites de production tuiles et briques à partir des données de l'Observatoire de la Terre du BRGM

L'ensemble des carrières répertorié dans cette annexe, l'a été à partir de la base de données du BRGM sur les carrières exploitées pour les produits céramiques sur le lien internet suivant : <http://infoterre.brgm.fr/viewer>

Un essai d'association des sites de production des tuiles et briques a été effectué à partir des données des fiches carrières du site internet et de leur localisation.

Nom Exploitant	Adresse	Code Postal	Commune	Début Exploitation	Fin Exploitation prévue	Production Autorisée par an (kt) actuelle	Site de Production Associé
BOUYER LEROUX	Trémoulin	42600	SAINT MARCELLIN EN FOREZ	2014	2037	160	BOUYER LEROUX ST MARCELLIN (IMERYS)
BOUYER LEROUX	Bourg Est	42600	CHALAIN LE COMTAL	2013	2028		BOUYER LEROUX ST MARCELLIN (IMERYS)
BOUYER LEROUX	La Gagnerie du Fourneau	44390	SAFFRE	1984	2042	68	BOUYER LEROUX LA SEGUINIÈRE
BOUYER LEROUX	Le Chêne aux loups 2	49	LA RENARDIÈRE	2009	2016	150	BOUYER LEROUX LA SEGUINIÈRE
BOUYER LEROUX	La Brunière	49	LA SEGUINIÈRE	1975	2026	55	BOUYER LEROUX LA SEGUINIÈRE
BOUYER LEROUX	L'Épinette Vieille	49000	LA SEGUINIÈRE	1982	2012	144	BOUYER LEROUX LA SEGUINIÈRE
BOUYER LEROUX	Leppo 2	49	SAINT REMY EN MAUGES	2009	2039	80	BOUYER LEROUX ST LAUENT DES AUTELS
BOUYER LEROUX	Pieces des Landes	49600	LE PUISET DORE	2006	2015	34	BOUYER LEROUX ST LAUENT DES AUTELS
BOUYER LEROUX	La Bodinière	49600	LA CHAUSSAIRE	1996	2019	85	
BOUYER LEROUX	L'Établère	49	LA SEGUINIÈRE	1975	2026	55	BOUYER LEROUX LA SEGUINIÈRE
BOUYER LEROUX	Le Baiser	85570	SAINT MARTIN DES FONTAINES	1990	2024	50	BOUYER LEROUX ST MARTIN DES FONTAINES
BOUYER LEROUX	Les Vergneres	85570	SAINT MARTIN DES FONTAINES	1995	2010	26	BOUYER LEROUX ST MARTIN DES FONTAINES
BOUYER LEROUX	Le Fortunière	85410	SAINT CYR DES GATS	1990	2024	128	BOUYER LEROUX ST MARTIN DES FONTAINES
BOUYER LEROUX	La Malinière	85450	MOREILLES	2014	2039		BOUYER LEROUX ST MARTIN DES FONTAINES
BOUYER LEROUX	La Poste	85450	MOREILLES	2004	2015	50	BOUYER LEROUX ST MARTIN DES FONTAINES
BOUYER LEROUX	La Plaine du Chêne	85410	SAINT CYR DES GATS	2012	2024	135	BOUYER LEROUX ST MARTIN DES FONTAINES
BOUYER LEROUX	La Bourdaudière	85390	SAINT GERMAIN L'AIGUILLER	2008	2038	8	BOUYER LEROUX ST MARTIN DES FONTAINES
BOUYER LEROUX (anciennement IMERYS)	Les Sereines	42600	SAINT MARCELLIN EN FOREZ	1978	2029	100	BOUYER LEROUX ST MARCELLIN (IMERYS)
BOUYER LEROUX (anciennement IMERYS)	L'Horre	42450	SURY LE COMTAL	1978	2014	160	BOUYER LEROUX ST MARCELLIN (IMERYS)
BOUYER LEROUX (anciennement IMERYS)	Les Tuileries	42300	MABLY	1976	2025		BOUYER LEROUX MABLY (IMERYS)
BRIQUETERIE du NORD	Vieux Colombier	59115	LEERS	1930	2037	34	BRIQUETERIE DU NORD LOMME/TEMPLEUVE

Nom Exploitant	Adresse	Code Postal	Commune	Début Exploitation	Fin Exploité prévue	Production Autorisée par an (kt) actuelle	Site de Production Associé
BRIQUETERIE du NORD	La Miterie	59160	LOMME	1976	2010	35	BRIQUETERIE DU NORD LOMME/TEMPLEUVE
IMERYS TC	Mulatié, Lengel	31490	LEGUEVIN	1974	2037	350	IMERYS TC - LEGUEVIN
IMERYS TC	Sauvegarde	31770	COLOMIERS	1972	2031	600	IMERYS TC - COLOMIERS CEDEX
IMERYS TC	A la laque, Au Midi de la Laque, A Caygeras	32600	AURADE	2005	2027	45	IMERYS TC - LEGUEVIN / COLOMIERS
IMERYS TC	Sarraillès, Sendéré	31350	BLAJAN	1973	2024	90	IMERYS TC - BLAJAN
IMERYS TC	Séguié du Nord	31350	BLAJAN	2011	2041	90	IMERYS TC - BLAJAN
IMERYS TC	Picauvet, Boundoire, Pudéran	33190	GIRONDE SUR DROPT	1974	2022	100	IMERYS TC GIRONDE SU DROPT
IMERYS TC	Peynet	33190	GIRONDE SUR DROPT	2005	2020	117	IMERYS TC GIRONDE SU DROPT
IMERYS TC	Pescontes	33190	NOILLAC	1995	2024	52	IMERYS TC GIRONDE SU DROPT
IMERYS TC	Forêt de Rauzan	33540	BLASIMON	2004	2034	250	IMERYS TC GIRONDE SU DROPT
IMERYS TC	Meyssan, La Luce, Le Bois de la Groye	33760	CANTOIS	1979	2018	240	IMERYS TC GIRONDE SU DROPT
IMERYS TC	Arbageas, Péchine, Cournet	40380	SAINT GEOURS D AURIBAT	1992	2028	120	IMERYS TC ST GEOURS D AURIBAT
IMERYS TC	Capdubedat, Lorreyte	40380	MONTFOT EN CHALOSSE	1999	2029	130	IMERYS TC ST GEOURS D AURIBAT
IMERYS TC	Guarrigue Longue	81220	SAINT PAUL CAP DE JOUX	1997	2017	30	IMERYS TC - DAMIATTE
IMERYS TC	Séverac	81220	DAMIATTE	1997	2014	65	IMERYS TC - DAMIATTE
IMERYS TC	Champs de Milasse	39230	BOIS DE GAND	2001	2015	72	IMERYS COMMENAILLES
IMERYS TC	Champs de Si	39140	COMMENAILLES	2002	2027	72	IMERYS COMMENAILLES
IMERYS TC	Cote Bayard	43250	VEGONGHEON	1973	2033	40	IMERYS VERGONGHEON
IMERYS TC	La Carriere, pognadoux	43360	BOURNONCLE SAINT PIERRE	1973	2033	40	IMERYS VERGONGHEON
IMERYS TC	Maison Neuve	44430	LA BOISSIERE DU DORE	2010	2024	100	IMERYS LA BOISSIERE DU DORE
IMERYS TC	Le Moulin Bondu	44330	VALLET	1975	2038	1000	IMERYS LA BOISSIERE DU DORE
IMERYS TC	Les Bois Bouhier	49310	LES CERQUEUX SOUS PASSAVAN	2001	2031	25	IMERYS VIHIERES
IMERYS TC	Leppo	49110	SAINT REMY EN MAUGES	2009	2039	60	IMERYS VIHIERES
IMERYS TC	La Garenne	51250	MAURUPT LE MONTAIS	2000	2008	272	IMERYS PARGNY SUR SAULX
IMERYS TC	Brede	51250	CHEMINON	2000	2035	170	IMERYS PARGNY SUR SAULX
IMERYS TC	La Tuilerie	59173	BLARINGHEM	1973	2040	320	IMERYS PHALEMPIN / WARDRECQUES
IMERYS TC	Le Bois des Tailles	60100	BLACOURT	1995	2020	305	IMERYS ST GERMER DE FLY
IMERYS TC	La Tete de Mousse	60000	SAINT GERMER DE FLY	1985	2015	27	IMERYS ST GERMER DE FLY
IMERYS TC	Les Près du Fort	60650	BLACOURT	1999	2029	20	IMERYS ST GERMER DE FLY
IMERYS TC	Les Tetes	60850	CUIGY EN BRAY	1987	2019	288	IMERYS ST GERMER DE FLY
IMERYS TC	Le Champ Fournier	60650	ONS EN BRAY	2013	2033	220	IMERYS ST GERMER DE FLY
IMERYS TC	Brulevent	69610	SOUZY	1973	2041	1000	IMERYS STE FOY L ARGENTIERE
MONIER	Richaume Sud	13114	PUYLOUBIER	1990	2010	240	MONIER MARSEILLE
MONIER	Les Grandes Teres, Grands Ajoncs	16270	ROUMAZIERES LOUBERT	2003	2033	54	MONIER ROUMAZIERES LOUBERT

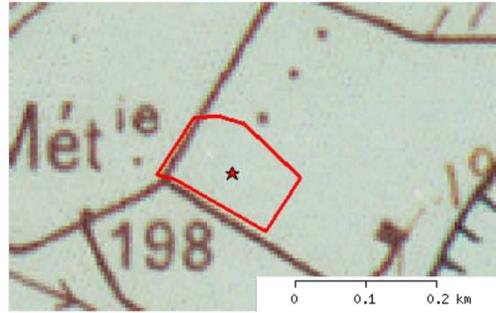
Nom Exploitant	Adresse	Code Postal	Commune	Début Exploitation	Fin Exploitation prévue	Production Autorisée par an (kt) actuelle	Site de Production Associé
MONIER	Les Tourmanchies	16270	MAZIERES	2003	2033	200	MONIER ROUMAZIERES LOUBERT
NOUVELLE ECT	L'Oratoire	13100	AIX EN PROVENCE	1982	2012	80	MONIER MARSEILLE
TERREAL	La Borie	11400	SAINT PAPOUL	1974	2033	720	
TERREAL	Puntis, Quatre Vents	31770	COLOMIERS	1972	2023	300	TERREAL - COLOMIERS
TERREAL	Rieussequel	81240	SAINT AMANS SOULT	1974	2034		TERREAL - SAINT AMANS SOULT
TERREAL	Le Mesnil	14860	BAVENT	1973	2031	50	TERREAL BAVENT
TERREAL	Les Fosses d'Enfer	14230	NEUILLY LA FORET	2003	2028	105	TERREAL BAVENT
TERREAL	La Fidora	16270	ROUMAZIERES LOUBERT	2007	2019	200	TERREAL ROUMAZIERES LOUBERT/LE CHAMBON
TERREAL	Le Grand Champ	16500	MANOT	2007	2037	200	TERREAL ROUMAZIERES LOUBERT/LE CHAMBON
TERREAL	Le Vignaud Les Brandeaux	16270	ROUMAZIERES LOUBERT	1994	2005		TERREAL ROUMAZIERES LOUBERT/LE CHAMBON
TERREAL	Pièce des Vergnes, Beaulieu	16270	ROUMAZIERES LOUBERT	2012	2027	110	TERREAL ROUMAZIERES LOUBERT/LE CHAMBON
TERREAL	Les Terres de Forgemoix, Eamenat 2	16310	CHERVES-CHATELARS	2002	2016	200	TERREAL ROUMAZIERES LOUBERT/LE CHAMBON
TERREAL	La Faurie, Les Champs de la Croix, la Tuilerie d'Etamenat, la Garenne	16310	CHERVES-CHATELARS	2012	2037	200	TERREAL ROUMAZIERES LOUBERT/LE CHAMBON
TERREAL	Les Bois de Vittaud	71150	CHAGNY	1974	2038	450	TERREAL CHAGNY
TERREAL	Chapet	78130	CHAPET	1972	2020	65	TERREAL LES MUREAUX
WIENERBERGER	En Pavode	01190	SAINT ETIENNE SUR REYSSOUZE	1974	2023	150	WIENERBERGER PONT DE VAUX
WIENERBERGER	Grand Crevé	01560	VESSOURS	1982	2018	150	WIENERBERGER PONT DE VAUX
WIENERBERGER	La Tuilerie	25570	LANTENNE VERTIERE	1974	2034	180	WIENERBERGER LANTENNE VERTIERE
WIENERBERGER	La Fosse au Loup	49430	DURTAL	1989	2020	40	WIENERBERGER DURTAL
WIENERBERGER	Aussigné, La Touchardière	49430	DURTAL	2009	2034	180	WIENERBERGER DURTAL
WIENERBERGER	Les Sables et Bois de Flines	59148	FLINES LES RACHES	1982	2024	81	WIENERBERGER FLINES LES RACHES
WIENERBERGER	Le Village sud	62260	CAUCHY A LA TOUR	1983	2017		WIENERBERGER CAUCHY A LA TOUR
WIENERBERGER	Sandberg, Bossenrott	67200	ACHENHEIM	2003	2018	109	WIENERBERGER ACHENHEIM
WIENERBERGER	Alterkrautgarten	67660	BETSCHDORF	1999	2028	296	WIENERBERGER BESCHDORF
WIENERBERGER	Bois de l'Hopial	67930	KESSELDORF	1993	2013	102	WIENERBERGER SELTZ
WIENERBERGER	Reiherwald	67330	BOUXWILLER	1976	2026	15	
WIENERBERGER	Houdoux	91530	LE VAL SAINT GERMAIN	2007	2021	3500	WIENERBERGE OLLAINVILLE/ANGERVILLIERS
WIENERBERGER	La Criblerie	91530	LE VAL SAINT GERMAIN	1980	2022	100	WIENERBERGE OLLAINVILLE/ANGERVILLIERS

Exemple de fiche carrière - BRGM

Observatoire des matériaux



Localisation sur fond topographique



Localisation sur fond géologique

Données Exploitation Maitre

Identifiant Exploitation : 88501

Nom Exploitation : Trémoulet

Numéro siret :

Rue :

Code Postal : 31490

Commune : 31291 LEGUEVIN

Commentaire :

Numéro GIDIC :

Numéro BSS :

Coordonnées (Lambert 93) : 558210,47 6278051,52

Coordonnées (WGS84) : 1,24 43,59

Nom du site

Données Exploitation Site

Nom du site : Trémoulet

Type de site : Excavation (carrière)

Aspect du gite :

Hauteur de la découverte (m) :

Puissance formation exploitée (m):

Le site est il en activité ? (oui/non) : Oui

Type de réaménagement :

Surface autorisée (ha) : 10,36

Statut : Exploitation active

Géologie du Site

Typologie : Gisements liés aux roches sédimentaires

Morphologie :

Age Sup Minerai :

Age Inf Minerai :

Age Sup Encaissant :

Age Inf Encaissant :

Lithologie

Données Substances

Substance	Produit	Nature du Site
Argiles	Tuiles et briques	Roches meubles

Liste des exploitants

GUINTOLI REGION SUD-OUEST

Année début : 2007 Année fin : 2012

Raison sociale : GUINTOLI REGION SUD-OUEST

Numéro SIREN :

Rue : Saint-Etienne de Grès

Code Postal : 13150 Commune : TARASCON

Téléphone : Fax :

Production

Substance	Année	Production autorisée (kt)
Argiles	2011	600
Argiles	2010	600
Argiles	2009	600
Argiles	2008	600
Argiles	2007	600

Documentation

Géométrie des arrêtés préfectoraux

La date de géométrie correspond à la date de fin d'autorisation des arrêtés préfectoraux.

Profondeur (m)	Nappe	Hauteur d'eau (m)	Date
			07 05 2012

Annexe 2. Les retenues de barrages

Dans cette annexe, sont répertoriées les retenues de barrages dont la capacité volumique est supérieure à 1 Mm³ d'eau. Elles sont groupées par région.

Il est à noter que les régions Nord Pas de Calais, Picardie, Ile de France et Haute Normandie sont dépourvues de retenues de barrages de grande taille.

Le flux spécifique SSY est soit issu de la bibliographie (référence numéroté), soit estimé à partir des flux spécifiques locaux (*).

Légende :

Vol. eau : Volume d'eau maximum de la retenue en Mm³

BV : Bassin versant collecteur de la retenue en km²

SSY : Flux spécifiques en t/km²/an

SY : Taux d'érosion en t/an

TE : Capacité de piégeage en %

S : Taux d'envasement en t/an.

Ces taux sont calculés comme indiqués dans le chapitre 2 à l'aide des formules suivantes :

$$S = SY \times TE$$

avec *S* (taux d'envasement annuel) en t/an et *SY* (production annuelle de sédiments) en t/an et *TE* (capacité de piégeage de la retenue) en %

$$TE = 100 \left(1 - \frac{1}{\left(1 + D \frac{C}{A} \right)} \right)$$

avec *TE* en %, *C* en m³, *A* la superficie de la retenue en km² et *D* sans unité (entre 0,046 et 1 selon la granulométrie)

$$SY = SSY \times A$$

avec *SY* en t/an, *SSY* en t/km²/an et *A* en km²

Alsace

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Doller	Michelbach aval	7,3	4,8	20*	96	100,00	96
Seebach	Alfeld	10,2	4,23	20*	85	100,00	85
Total							181
% national							0,001

Aquitaine

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
	Boueilh Boueilho						
Arriutort	Lesque	1,3	4	30	120	99,99	120
Balaing	Balaing	3,5	9	30	270	99,99	270
Bayle	Renung	2	10	30	300	99,99	300
Brousseau	Latrille	2,4	13,4	30	402	99,99	402
Carbouere	Louet	5,2	16	30	480	99,99	480
Cher	Prat	1,6	1654	25	41 350	97,80	40441
Cole	Miallet	5	17	25	425	99,99	425
Dordogne	Tuillièrre	5	9232	25	230 800	96,14	221893
Estela	Coudures	1	2,5	30	75	99,99	75
Gave de Brousset	Fabrèges	6,7	60	30	1 800	99,98	1800
Gave du Bious	Bious	5,1	30,15	30	905	99,99	904
Gees	Serres Castet	2	5,2	30	156	99,99	156
Grabe	Hagetmau Monségur	2,5	15,2	30	456	99,99	456
Labernede	Ganet	1	9,4	25	235	99,98	235
Labourdasse	Fargues	1	3,95	30	119	99,99	118
Larus	Laa	1,3	4,6	30	138	99,99	138
Lescourouse	Lescourouse	8,3	48	25	1 200	99,99	1200
Lot	Temple	23	2694	45	121 230	99,75	120922
Lot	Villeneuve sur Lot	15,6	2500	45	112 500	99,65	112109
Lourden	Lourden	5,1	18	30	540	99,99	540
Petit Lees	Peyrelongue	1,1	4,1	30	123	99,99	123
Ruisseau d'Arrémoulit	Artouste	10	7,7	30	231	100,00	231
Total							503339
% national							4

Auvergne

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Anchal	Anchal	1,2	3	10	30	99,99	30
Banne	Bazergues	1,3	18	10	180	99,97	180
Banny	Gannes	1,2	12	10	120	99,98	120
Bestre	Mayet de Montagne	1,2	135	10	1 350	99,76	1347
Cère	St Etienne Cantalès	133	695	13	9 035	99,99	9034
Cher	Rochebut	20,5	1600	15	24 000	99,83	23959
Cregut	Lastouilles Nord	10,2	9	60	540	100,00	540
Cregut	Lastouilles Sud	11,4	9	60	540	100,00	540
Dordogne	Bort les Orgues	477	1010	60	60 600	100,00	60597
Dordogne	Marèges	47,2	1530	60	91 800	99,93	91735
Dordogne	Aigle	220	730	60	43 800	99,99	43797
Enfer	Pradeaux	2,04	7,6	20	152	99,99	152
Lignon du Velay	Lavalette	41	350	40	14 000	99,98	13997
Marmande	Etang de Pirot	3,7	36,5	20	730	99,98	730
Maronne	Gour Noir	5,2	178	30	5 340	99,93	5336
Maronne	Enchanet	92,7	452	30	13 560	99,99	13559
Rhue	Vaussaie	1,7	272	20	5 440	99,65	5421
Rhue	Grande Rhue	3,7	369	20	7 380	99,78	7364
Sep	Sep	4,7	27	20	540	99,99	540
Sioulle	Queille	6	50	20	1 000	99,98	1000
Sioulle	Fades	69	1300	20	26 000	99,96	25989
Taurons	Tauras	1,2	15	20	300	99,97	300
Truyère	Grandval	271	1782	40	71 280	99,99	71270
Truyère	Lanau	18	53	40	2 120	99,99	2120
Vernoelle	Etang de Sault	1,05	34	20	680	99,93	680
						Total	380337
						% national	3

Basse Normandie

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Orne	Rabodanges	5,2	1000	20	20 000	99,58	19917
Sélune	Roche qui boit	1,5	30	20	600	99,96	600
Sélune	Vezins	19	720	20	14 400	99,92	14388
						Total	34905
						% national	0,3

Bourgogne

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Armançon	Pont et Massère	6,1	269	7	1 883	99,90	1881
Bourbince	Torcy Neuf	7,6	20,2	10	202	99,99	202
Bourdan	Bourdan	8,1	43,9	10	439	99,99	439
Brenne	Grosbois 1	8	30	10	300	99,99	300
Chaloux	Chaumeçon	19,3	98	10	980	99,99	980
Cousin	St Agnan	4,7	50	10	500	99,98	500
Cure	Crescent	14,2	359	10	3 590	99,95	3588
Cure	Settons	22,7	44	10	440	100,00	440
Pont du Roi	Pont du roi	3,1	44	20	880	99,97	880
Tillot	Chazilly	2,2	31,9	10	319	99,97	319
Yonne	Pannecièrre Chaumard	78,6	220	9	1 980	99,99	1980
	Montaubry	4,4	15,7	20	314	99,99	314
						Total	11822
						% national	0,1

Bretagne

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Blavet	Guerlédan	51,2	620	20	12 400	99,97	12397
Elorn	Drennec	8,6	24	20	480	99,99	480
Fremur	Bois Toli	3	50	20	1 000	99,96	1000
Gouessant	Pont Roland	1	350	20	7 000	99,24	6947
Gouet	Gouët	7,9	197	20	3 940	99,95	3938
Guinefont	Port Ruffier	1,9	39	20	780	99,96	780
La Chaise	Chèze	14,4	30	20	600	100,00	600
Meleuc	Mireloup	1,3	27	20	540	99,95	540
Oust	Bosméleac	2,8	64	20	1 280	99,95	1279
Rance	Raphénel	5	380	20	7 600	99,84	7587
Valière	La Valière	5,7	66	20	1 320	99,97	1320
Vilaine	Haute Vilaine	7,2	120	20	2 400	99,96	2399
						Total	39266
						% national	0,3

Centre

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Arnon	Sidiailles	5,6	160	30	4 800	99,94	4797
Creuse	Roche Bat l'Aigue	1,6	100	10	1 000	99,86	999
Creuse	Eguzon	57	1280	10	12 800	99,95	12794
Creuse	Roche aux Moines	4,3	50	10	500	99,97	500
Total							19089
% national							0,1

Champagne Ardenne

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Amance	Radonvilliers	22	1600	7	11 200	99,84	11182
Faux	St Nicolas	8,3	90	10	900	99,98	900
Liez	Liez	13,8	48	10	480	99,99	480
Morge	Seine Morge	207,8	2400	10	24 000	99,97	23994
Mouche	Mouche	7,5	13	10	130	100,00	130
Temple	Brévonnes	148	1700	10	17 000	99,98	16996
Val de Gres	Charnes	11,7	51	10	510	99,99	510
	Marquisades	8,3	0,7	10	7	100,00	7
	Marne Giffaumont	350	2900	10	29 000	99,98	28995
	Wassy	2	4	10	40	100,00	40
Total							83234
% national							1

Franche Comté

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Ain	Vouglans	592	1120	41	45 920	100,00	45918
Ain	Saut Mort	1,8	20	41	820	99,98	820
Ain	Coisetet	36	770	41	31 570	99,95	31555
Doubs	Vaufrey	3,2	489	20	9 780	99,67	9748
Doubs	Chatelot	20,6	911	20	18 220	99,90	18203
Total							106243
% national							1

Languedoc Roussillon

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Agly	Agly	25,8	408	103	42 024	99,97	42010
Altier	Villefort	35,7	126	25	3 150	99,99	3150
Alzeau	Galaube	8,1	21,4	50	1 070	99,99	1070
Aude	Puyvalador	9,9	102	50	5 100	99,98	5099
Aude	Matemale	20,6	32	50	1 600	100,00	1600
Bureau	Saut de Vésols	2,9	2	50	100	100,00	100
Chassezac	Puylaurent	12,8	80	15	1 200	99,99	1200
Chassezac	Raschas	1,6	22	15	330	99,97	330
Crieulon	Rouvière	8,9	97	50	4 850	99,98	4849
Dure	Laprade	8,8	12	50	600	100,00	600
Entvive	Lanoux	70,7	14,9	50	745	100,00	745
Gardon d'alès	Ste Cécile d'Andorge	1,6	109	50	5 450	99,85	5442
Gardon d'alès	Cambous	1	15	50	750	99,97	750
Lampy	Lampy	1,7	7,2	50	360	99,99	360
Loire	Naussac	190	53	15	795	100,00	795
Orb	Avène	33,6	125	50	6 250	99,99	6249
Peyre	Olivettes	4,4	29,5	50	1 475	99,99	1475
Rhône	Vallabregues	70	4000	150	600 000	99,88	599256
Salagou	Salagou	102	76	50	3 800	100,00	3800
Tet	Vinca	24,6	925,1	50	46 255	99,92	46217
Tet	Bouillouses	17,3	14,9	50	745	100,00	745
Vidourle	Conqueyras	11,8	83	50	4 150	99,98	4149
						Total	729990
						% national	6

Limousin

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Chandouille	Chammet	6,8	102	10	1 020	99,97	1020
Couze	St Pardoux	22,9	55,3	30	1 659	99,99	1659
Couze	Mazeaud	7,1	22	30	660	99,99	660
Creuse	Age	2,3	30	10	300	99,97	300
Creuse	Chezelles	1,2	40	10	400	99,93	400
Creuse	Champsanglard	4,2	850	10	8 500	99,56	8463
Creuse	Confolent	4,5	200	10	2 000	99,90	1998
Dinge	Chaumettes	7,45	485	10	4 850	99,86	4843
Dorat	Faux la Montagne	1,35	10,8	10	108	99,98	108
Dordogne	Chastang	187	857	60	51 420	99,99	51415
Dordogne	Argentat	7,2	291	10	2 910	99,91	2907
Doustre	Marcillac	31	140	10	1 400	99,99	1400

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Les Farges	Sèchemailles	2,4	52	10	520	99,95	520
Luzège	Luzège	3,8	406	10	4 060	99,77	4051
Maronne	Hautefage	27	125	30	3 750	99,99	3750
Maulde	Vassivière	106	75	30	2 250	100,00	2250
Maulde	Lartige	2,02	28	15	420	99,97	420
Maulde	Villejoubert	3,3	22	15	330	99,99	330
Maulde	Langleret	1,2	7	15	105	99,99	105
Maulde	Bujaleuf	2,9	146	15	2 190	99,89	2188
Maulde	Fleix	2,7	48	15	720	99,96	720
Maulde	Martineix	1,6	101	15	1 515	99,86	1513
Maulde	Mont Larron	4,8	57	15	855	99,97	855
Mazelle	Beaune 2	1,8	17	15	255	99,98	255
Rozeille	Beissat	1,5	15,5	20	310	99,98	310
Taurion	Etroit	2,05	20	10	200	99,98	200
Taurion	Roche Talanie	8,8	639	10	6 390	99,84	6380
Taurion	Lavaud Gelade	17,4	46	10	460	99,99	460
Taurion	St Marc	20	295	10	2 950	99,97	2949
Triouzoune	Neuvic d'Ussel	24	130	20	2 600	99,99	2600
Vezere	Monceaux la Virolle	20,5	205	20	4 100	99,98	4099
Vezere	Treignac	7,5	26	20	520	99,99	520
						Total	109645
						% national	1

Lorraine

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Arvière	Bouzey	7,1	16	7	112	100,00	112
Mirgenbach	Mirgenbach	7,3	2,2	10	22	100,00	22
Rupt de Mad	Miadine	35	44	10	440	100,00	440
Vieux	Vieux Pré	61,6	11	10	110	100,00	110
						Total	684
						% national	0,01

Midi Pyrénées

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S t/an)
Adour Garet	Gréziolles	4,3	7,2	26	187	100,00	187
Agout	Raviège	44,7	365	29	10 585	99,98	10583
Alrance	Villefranche de Panat	109	43	25	1 075	100,00	1075
Arcadade	St Cricq	3,5	12,5	50	625	99,99	625
Ariège	Garrabet	3,4	1235	25	30 875	99,22	30633
Arn	Saints Peyres	34,7	129	30	3 870	99,99	3870
Arrats	Asterac	10	50	50	2 500	99,99	2500
Arrêt Darré	Arrêt darré	10	57,2	50	2 860	99,99	2860
Arriuogrand	Migouélou	11,9	2,65	50	133	100,00	132
Arties	Izourt	7,9	14,9	25	373	100,00	372
Astan	Laparan	15,7	34,8	25	870	100,00	870
Aussoue	Aussoue	3	10,5	30	315	99,99	315
Avelanet	Balermé	2,02	13	30	390	99,99	390
Bage	Bage	4,4	34	20	680	99,98	680
Boisolle	Puydarrieux	14,5	60	50	3 000	99,99	3000
Boue	Boues	2,02	14,25	50	713	99,98	712
Bure	Bure	4	30	30	900	99,98	900
Cabournieu	Cabeurnieu	1,5	6,65	50	333	99,99	332
Candes	Candes 2	1,8	20	50	1 000	99,98	1000
Ceret	Roucarie	5,6	22	100	2 200	99,99	2200
Ceret	Fontbonne	1,3	32	100	3 200	99,95	3198
Combe la Malle	Peyralade	1,4	0,5	50	25	100,00	25
Dadou	Rassisse	13	210	50	10 500	99,96	10496
Dourdan	Brunet	1,4	2,3	300	690	100,00	690
Escoubous	Escoubous	1,4	6,2	50	310	99,99	310
Estaube	Gloriettes	2,7	54	50	2 700	99,96	2699
Filleit	Filleit	4,95	9,2	25	230	100,00	230
Garonne	St Vidian	5	4349,4	35	152 229	98,14	149404
Gaves d'Arrens	Tech	1,6	60	50	3 000	99,92	2998
Geignes	Geignes	1,08	6	50	300	99,99	300
Geze	Magnoac	4,9	4	50	200	100,00	200
Gimone	Gimone	25	40	50	2 000	100,00	2000
Gnolles	Naguilhes	43	12	25	300	100,00	300
Goul	Goul	1	300	50	15 000	99,35	14903
Gouyre	Gouyre	3,4	22	50	1 100	99,99	1100
Izard	Araing	6,7	2,9	25	73	100,00	72
Laudot	St Ferréol	6,4	48	50	2 400	99,98	2400
Lezert	Bancalié Aval	10,9	21,4	50	1 070	100,00	1070
Lezert	Montdely	4	13,6	50	680	99,99	680
Limoubre	Montagnès	1,2	71	50	3 550	99,87	3545

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S t/an)
Lize	Lizon	1,6	84	50	4 200	99,89	4195
Lot	Golinhac	5,1	312	10	3 120	99,87	3116
Lot	Castelnau Lassas	65	1593	20	31 860	99,95	31843
Mounican	Pla de Soulcens	29,3	443	25	11 075	99,97	11071
Neste de Caillaouas	Caillaouas	6	6,7	50	335	100,00	335
Neste de Couple	Cap de Long	63	10,6	50	530	100,00	530
Neste de Couple	Quédan	7,3	2,5	50	125	100,00	125
Neste d'Oo	Portillon	6,8	3,2	50	160	100,00	160
Osse	Miélan	3,7	23	50	1 150	99,99	1150
Oule	Oule	16,6	28,4	50	1 420	100,00	1420
Plane	Monnes	33,6	16,8	15	252	100,00	252
Plane	Etang	33,6	16,8	15	252	100,00	252
Prat	Liaussac	33,6	16,8	15	252	100,00	252
Selves	Mauray	34,2	97	20	1 940	99,99	1940
Selves	Galens	2,3	67	20	1 340	99,94	1339
Set	Camomazes	18	4,1	50	205	100,00	205
Siguer	Gnioure	28,4	18	25	450	100,00	450
Tarn	Pinet	10,4	2677	90	240 930	99,44	239589
Tarn	Truel	3,6	23	90	2 070	99,99	2070
Tarn	Jourdanie	5,3	461	90	41 490	99,81	41412
Tarn	Rivières	26,4	1739	90	156 510	99,86	156286
Tessonne	Comberouger	1,2	8,4	50	420	99,98	420
Tordre	Tordre	3,2	11,4	50	570	99,99	570
Triere	Montbel	60	15	25	375	100,00	375
Truyère	Sarrans	296	535	40	21 400	100,00	21399
Truyère	Barthe	8	114	40	4 560	99,97	4559
Truyère	Couesque	56	268	40	10 720	99,99	10719
Vebre	Laouzas	45,2	217	30	6 510	99,99	6509
Viaur	Pont de Salars	20,6	182	20	3 640	99,98	3639
Viaur	Thuriès	6,5	868	20	17 360	99,71	17310
Vioulou	Pareloup	169	160	30	4 800	100,00	4800
						Total	828148
						% national	7

PACA

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Biancon	St Cassien	60	132,5	50	6 625	100,00	6625
Durance	Serre Ponçon	1272	3600	650	2 340 000	99,99	2339856
Durance	Curbans	1,2	140	50	7 000	99,75	6982
Durance	St Lazare	6,2	2586	50	129 300	99,10	128138
Durance	Escale	15,7	134	50	6 700	99,98	6699
Durance	Cadarache	3,2	2700	50	135 000	98,20	132568
Garonne (Var)	Cous	1,9	8,6	20	172	99,99	172
Infernet	Bimont	14,25	41	50	2 050	99,99	2050
Las	Dardennes	1,1	12,5	50	625	99,98	625
Laye	Laye	3,5	130	50	6 500	99,92	6495
Le Pellegriin	Trape	2	2,7	50	135	100,00	135
Merindole	Réaltort	2	16	50	800	99,98	800
Rhône	Caderousse	60	2500	150	375 000	99,91	374661
Rhône	Sauveterre	47	2000	150	300 000	99,91	299723
Verdon	Gréoux	78,55	159	365	58 035	100,00	58032
Verdon	Quinson	19,5	71	365	25 915	99,99	25913
Verdon	Ste Croix	766,9	905	365	330 325	100,00	330317
Verdon	Chaudanne	16	30	365	10 950	100,00	10950
Verdon	Castillon	149	655	365	239 075	99,99	239052
Verne	Verne	8	32,3	350	11 305	99,99	11304
Total							3981096
% national							31

Pays de Loire

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Grande Maine	Bultière	5	154	20	3 080	99,93	3078
Graon	Graon	3,6	33	20	660	99,98	660
Gué Gorand	Gué Gorand	1	15,5	20	310	99,97	310
Maine	Ribou	3,2	64	20	1 280	99,96	1279
Maine	Verdon	14	73	200	14 600	99,99	14598
Marillet	Marillet	7,1	135	20	2 700	99,96	2699
Mère	Pierre Brune	3	157	20	3 140	99,89	3136
Vendée	Mervent	8,2	385	30	11 550	99,90	11538
Vouraie	Vouraie	5,5	50	25	1 250	99,98	1250
Total							38549
% national							0,3

Poitou Charente

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Cebron	Puy terrier	11,5	162	30	4 860	99,97	4859
Chambon	Touche Poupard	15	55	30	1 650	99,99	1650
Charente	Lavaud	10	40	30	1 200	99,99	1200
Moulde	Mas Chaban	14,2	52	40	2 080	99,99	2080
						Total	9788
						% national	0,1

Rhône Alpes

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Ain	Cize Bologa	14,7	650	41	26 650	99,90	26624
Ain	Allement	19	90	41	3 690	99,99	3690
Ban	Rive sur le Ban	1,5	21	100	2 100	99,97	2099
Bissorte	Bissorte	39,5	23,7	100	2 370	100,00	2370
Borne	Roujanel	6,7	98	100	9 800	99,97	9797
Bourne	Choranche	1,05	250	100	25 000	99,49	24871
Cenise	Mont Cenis	320	51,4	100	5 140	100,00	5140
Ceze	Senechas	16,2	113	100	11 300	99,98	11298
Chassezane	Malarce	3,7	482	100	48 200	99,72	48064
Cignin	Charmies	4,72	305	100	30 500	99,86	30457
Couzon	Couzon	1,75	25	100	2 500	99,97	2499
Dora de Roseled	Roselend	185	43,1	100	4 310	100,00	4310
Dorinet	Girotte	51	5,2	100	520	100,00	520
Dorlay	Dorlay	3	25	100	2 500	99,98	2500
Drac	Sautet	107,7	990	300	297 000	99,98	296941
Drac	St Pierre Cognet	27,5	551	100	55 100	99,96	55076
Drac	Monteynard	309	509	100	50 900	100,00	50898
Drac	Notre dame de Commers	34	20	100	2 000	100,00	2000
Dranse de Morzine	Jotty	1,14	195	100	19 500	99,63	19428
Eau d'Olle	Grand Maison	137	50	100	5 000	100,00	5000
Eau d'Olle	Verney	15,5	111,7	100	11 170	99,98	11168
Furan	Gouffre d'Enfer	1,1	2	100	200	100,00	200
Furan	Pas du Riot	1,1	21	100	2 100	99,96	2099
Gage	Gage	3,4	41	100	4 100	99,97	4099
Gien	Souliges	2,6	23	100	2 300	99,98	2300
Gien	Piney	1,9	19	100	1 900	99,98	1900

Cours d'eau	Nom de la retenue	Vol. eau (Mm ³)	BV (km ²)	SSY (t/km ² /an)	SY (t/an)	TE (%)	S (t/an)
Gittaz	Gittaz	13,6	20,2	100	2 020	100,00	2020
Gyre	Cheylard	3,3	369	100	36 900	99,76	36811
Gyrier	Devesset	2,3	3,4	100	340	100,00	340
Isère	Tignes	230	171	100	17 100	100,00	17100
Isère	St Egrève	6	1000	100	100 000	99,64	99639
Isère	Beauvoir	7,75	753	100	75 300	99,79	75141
Loire	Villerest	127	6389	15	95 835	99,89	95730
Loire	Palisse	8,5	78	15	1 170	99,98	1170
Lyonne	Bouvante	1,34	33,6	100	3 360	99,95	3358
Poncellamort	St Guérin	13,5	19	100	1 900	100,00	1900
Rhône	Seyssel	7,6	1500	320	480 000	99,57	477949
Rhône	Genissiat	72	1000	320	320 000	99,97	319903
Rhône	Villebois	33	500	320	160 000	99,97	159947
Rhône	Jons	55	2000	320	640 000	99,92	639494
Rhône	Vaugris	41	500	320	160 000	99,97	159958
Rhône	St Pierre de Bœuf	48	300	320	96 000	99,99	95987
Rhône	Arras	44	1000	320	320 000	99,95	319842
Rhône	Isère	37	2000	300	600 000	99,88	599296
Rhône	Rochemaure	46	5000	320	1 600 000	99,76	1596228
Rhône	Donzere	27	1200	320	384 000	99,90	383629
Romanche	Chambon	50,8	254	400	101 600	99,99	101589
Rouchain	Rouchain	7	33	400	13 200	99,99	13199
Sassière	Sassière	10,5	10,7	300	3 210	100,00	3210
Sechere	Coche	2,1	0,7	300	210	100,00	210
Senene	Plats	1,6	28	300	8 400	99,96	8397
St Benet	Plan d'Amont	8,4	21	300	6 300	99,99	6300
St Benet	Plan d'Aval	3,9	23,2	300	6 960	99,99	6959
Tade	Chartran	3,6	14	300	4 200	99,99	4200
Ternay	Ternay	2	29	100	2 900	99,97	2899
Veyton	Flumet	4,8	8,45	300	2 535	100,00	2535
						Total	5860287
						% national	46

Annexe 3. Liste des échantillons

Un nom de prélèvement est attribué à chaque échantillon de sédiments dans la forme suivante XX YY ZZ avec XX l'année du prélèvement, YY le système dans lequel l'échantillon a été prélevé et ZZ le numéro d'ordre de prélèvement.

Légende des systèmes de prélèvements :

- DU pour Durance,
- SE pour la Seine,
- GA pour la Garonne,
- LAY pour le Lay,
- SN pour la Sève Niortaise,
- PO pour les polders du marais poitevin,
- ANT pour le pertuis d'Antioche,
- CH pour la Charente,
- ARC pour le bassin d'Arcachon,
- SOMME pour la Somme,
- RANCE pour la Rance et
- MSM pour la baie du Mont-Saint-Michel.

Un nom d'échantillon est attribué à chaque échantillon et mélange qui a fait l'objet d'essais matériaux.

Il existe trois types d'échantillons recensés dans cette annexe :

- MIN, pour les échantillons subissant les caractérisations primaires (Minéralogie, Chimie),
- MAT, pour les échantillons subissant les essais matériaux,
- MELANGE, pour les mélanges entre échantillons, avec des additifs...

Le bassin versant de la Durance

Les prélèvements ont été effectués en 2 campagnes d'échantillonnage :

- du 27 au 30 mai 2013
- 2 et 3 octobre 2013

Nom du prélèvement	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Latitude	Longitude
13 DU 00	130281-1	MIN/MAT	Cadarache	43°42'35,95"N	5°44'24,6"E
13 DU 02		MIN	Fortville - Guisane	44°54'36,1"N	6°37'16,2"E
13 DU 03		MIN	Confluence Clarée	44°55'23,1"N	6°40'43,2"E
13 DU 06		MIN	Les Albert - Amont Durance	44°55'28,2"N	6°40'50,4"E
13 DU 07		MIN	Clarée	44°55'32,8"N	6°40'46,5"E
13 DU 09		MIN	Cervièrès - Cerveyrette	44°53'05,6"N	6°38'27,0"E
13 DU 11		MIN	Le Villaret - Confluence Cerveyrette	44°51'12,6"N	6°35'10,4"E
13 DU 13		MIN	Vigneau - Gyrone	44°49'01,1"N	6°33'04,1"E
13 DU 15		MIN	L'Argelier - Confluence Gyrone	44°46'30,8"N	6°33'36,6"E
13 DU 17		MIN	Mont Dauphin - Guil	44°40'00,3"N	6°36'57,5"E
13 DU 18		MIN	Eyglisiers - Amont Confluence Guil	44°40'36,5"N	6°36'26,3"E
13 DU 19		MIN	Amont Confluence Guil	44°40'14,4"N	6°36'15,4"E
13 DU 21		MIN	Confluence Guil	44°39'07,3"N	6°35'10,6"E
13 DU 22		MIN	Crevoux	44°33'52,0"N	6°31'22,2"E
13 DU 25		MIN	Pont D994 - Confluence Crevoux	44°33'37,0"N	6°30'42,4"E
13 DU 26		MIN	D40 Baratier - Vachères	44°32'03,5"N	6°29'58,3"E
13 DU 27	130281-7	MIN/MAT	SP Vachères - Boscodon	44°32'21,1"N	6°27'37,5"E
13 DU 28	130281-8	MIN/MAT	SP Vachères - Boscodon	44°32'27,4"N	6°27'37,8"E
13 DU 29	130281-9	MIN/MAT	SP Vachères - Boscodon	44°32'26,8"N	6°27'35,3"E
13 DU 30		MIN	SP Vachères - Boscodon	"	"
13 DU 32		MIN	SP Boscodon	44°30'57,1"N	6°25'36,8"E
13 DU 33		MIN	Plage eau douce - SP confluence Boscodon	44°31'51,4"N	6°25'36,8"E
13 DU 35		MIN	Eygoires SP	44°31'15,6"N	6°23'16,3"E
13 DU 37		MIN	Port St Pierre SP Ubaye	44°28'02,0"N	6°19'29,5"E
13 DU 38		MIN	SP Ubaye Torrent Pareau	44°27'47,8"N	6°22'01,0"E
13 DU 41		MIN	SP Ubaye pont	44°27'14,5"N	6°23'21,1"E
13 DU 42		MIN	SP Ubaye pont	"	"
13 DU 43		MIN	SP Ubaye village Lautaret	44°27'33,6"N	6°21'49,8"E
13 DU 44		MIN	Blanche	44°27'31,0"N	6°14'25,2"E
13 DU 47		MIN	SP camping Nautic	44°31'35,2"N	6°21'43,7"E
13 DU 48		MIN	SP camping Roustou	44°31'14,2"N	6°20'31,4"E
13 DU 52		MIN	SP Chapelle St Michel	44°31'20,4"N	6°19'35,8"E
13 DU 54		MIN	SP Hyvans	44°31'16,3"N	6°19'34,2"E
13 DU 57		MIN	SP plage bois vieux	44°28'39,0"N	6°16'34,1"E

Nom du prélèvement	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Latitude	Longitude
13 DU 59		MIN	Aval Espinasse	44°27'36,5"N	6°13'19,9"E
13 DU 64		MIN	Hameau Malcor - Avance	44°28'42,4"N	6°06'28,7"E
13 DU 67		MIN	Tallard - Confluence Avance Luye	44°28'00,1"N	6°03'36,7"E
13 DU 68		MIN	Echangeur autoroute - Rousine	44°25'35,1"N	6°01'48,1"E
13 DU 71		MIN	ZA Vivas - Aval Saulce	44°24'27,6"N	5°58'29,9"E
13 DU 74		MIN	Monotier Allemort	44°22'51,6"N	5°56'43,9"E
13 DU 77		MIN	Sasse	44°14'57,4"N	5°55'23,8"E
13 DU 79		MIN	Amont Sisteron	44°12'42,1"N	5°56'21,4"E
13 DU 80		MIN	Ribier - Buëch	44°14'03,8"N	5°51'49,3"E
13 DU 82		MIN	Aval St Lazare	44°10'26,9"N	5°57'03,5"E
13 DU 84		MIN	Pont du four à chaux - Jabron	44°09'42,2"N	5°56'44,6"E
13 DU 86		MIN	Usine de Solignac - Confluence Jabron	44°08'43,7"N	5°58'11,4"E
13 DU 88		MIN	Volonne - Riou de Jabron	44°08'05,0"N	5°59'13,4"E
13 DU 89		MIN	Volonne - Vançon	44°07'53,4"N	5°59'21,4"E
13 DU 92		MIN	Aval Escale	44°05'02,8"N	6°00'42,8"E
13 DU 95		MIN	Amont Malijai - Bléone	44°02'33,3"N	6°02'22,8"E
13 DU 97		MIN	Lauzon	43°56'05,4"N	5°51'57,8"E
13 DU 99		MIN	Confluence Bléone	43°55'25,5"N	5°53'58,3"E
13 DU 101		MIN	Confluence Asse	43°48'11,2"N	5°49'20,8"E
13 DU 103		MIN	Pont Oraison Vinon - Asse	43°52'45,7"N	5°54'37,4"E
13 DU 105		MIN	Vinon s/ Verdon	43°43'45,3"N	5°49'04,0"E
13 DU 107		MIN	Confluence Verdon	43°39'55,9"N	5°30'12,2"E
13 DU 109	130281-15	MIN/MAT	Verdon St André les Alpes	43°56'44,2"N	6°31'00,6"E
13 DU 110	130281-16	MIN/MAT	Verdon Chaudanne	43°51'41,9"N	6°33'26,8"E
13 DU 111		MIN	Verdon Ste Croix Cadeno	43°48'10,6"N	6°13'39,1"E
13 DU 112		MIN	Verdon Ste Croix Cadeno	"	"
13 DU 113	130281-17	MIN/MAT	Verdon Ste Croix pont	43°48'05,7"N	6°14'54,8"E
	130281-25	MELANGE	80 % 130281-1 20 % sable	-	-
	130281-26	MELANGE	70 % 130281-1 30 % sable	-	-
	130281-57	MELANGE	80 % 130281-1 20 % chamotte	-	-
	130281-58	MELANGE	50 % 130281-1 42 % 130281-8 8 % chamotte	-	-
	130281-59	MELANGE	Mélange industriel	-	-
	130281-65	MELANGE	Mélange industriel	-	-

Le bassin versant de la Seine

Les prélèvements ont été effectués en 4 campagnes d'échantillonnage :

- 22 août 2013
- 14 septembre 2013
- 22 octobre 2013
- 16 juillet 2014

et nous avons bénéficié de prélèvements durant des opérations de dragage en 2014 de la part des Grands Ports Maritimes du Havre et de Rouen.

Nom du prélèvement	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Latitude	Longitude
13 SE 01	130281-10	MIN/MAT	Crescent Cure	47°22'45,7"N	3°56'17,7"E
13 SE 02	130281-11	MIN/MAT	Crescent Chalaux	47°21'55,8"N	3°54'45,4"E
13 SE 03		MIN	Crescent barrage	47°23'08,9"N	3°54'27,6"E
13 SE 04	130281-12	MIN/MAT	Chaumeçon pont de la Bruyère	47°16'04,9"N	3°55'08,7"E
13 SE 05		MIN	Pannecièrre base nautique	47°16'05,5"N	3°35'08,6"E
13 SE 06	130281-13	MIN/MAT	Pannecièrre pont Yonne	47°07'14,3"N	3°55'52,6"E
13 SE 07	130281-14	MIN/MAT	Pannecièrre pont Ourcille	47°08'33,5"N	3°55'31,0"E
13 SE 08		MIN	Orient Anse des Oiseaux	48°18'00,7"N	4°21'35,7"E
13 SE 09	130281-18	MIN/MAT	Orient plage Géraudot	48°18'03,9"N	4°20'11,3"E
13 SE 10	130281-19	MIN/MAT	Auzon Temple	48°19'38,0"N	4°23'5,79"E
13 SE 11	130281-20	MIN/MAT	Der base nautique Champeaubert	48°33'20,1"N	4°46'57,7"E
13 SE 12		MIN	Der base nautique Champeaubert	"	"
13 SE 13	130281-21	MIN/MAT	Der base nautique Nuisement	48°36'01,8"N	4°45'03,3"E
13 SE 14	130281-22	MIN/MAT	Der presqu'île Nemours	48°34'07,9"N	4°48'07,3"E
13 SE 15	130281-23	MIN/MAT	Orient Mesnil St Père	48°15'44,9"	4°20'29,5"E
	130281-24	MELANGE	130281-21/130281-22	-	-
14 SE 16	130281-53	MIN/MAT	Marais Vernier - Quilleboeuf	49°28'44,7"N	0°30'58,5"E
14 SE 17	130281-60	MIN/MAT	Port du Havre - sédiments clapables	NC	NC
14 SE 18	130281-61	MIN/MAT	Port du Havre - sédiments contaminés	NC	NC
14 SE 19	130281-62	MIN/MAT	Port du Havre - Chambre de stockage	NC	NC
14 SE 20	130281-63	MIN/MAT	Port de Rouen	NC	NC

NC : Non Communiqué car l'emplacement exact des prélèvements ne nous a pas été communiqué par l'organisme qui a fait les prélèvements.

Le bassin versant de la Garonne

Les prélèvements ont été effectués en 2 campagnes d'échantillonnage :

- 3 avril 2014
- du 9 au 12 juillet 2014

Nom du prélèvement	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Latitude	Longitude
14 GA 01	130281-34	MIN/MAT	Grandval - Terre mouillade	44°56'57,0"N	3°06'47,3"E
14 GA 02		MIN	Grandval - Terre mouillade	"	"
14 GA 03	130281-35	MIN/MAT	Grandval - Chateau Alleuze	44°57'29,0"N	3°05'15,5"E
14 GA 04		MIN	Grandval - les Salés	44°56'41,7"N	3°05'53,4"E
14 GA 05	130281-36	MIN/MAT	Grandval barrage	44°55'24,6"N	3°04'33,1"E
14 GA 06	130281-37	MIN/MAT	Grandval - plage de Mallet	44°54'48,2"N	3°07'06,0"E
14 GA 07	130281-38	MIN/MAT	Grandval - Garabit	44°58'30,0"N	3°09'51,2"E
14 GA 08	130281-43	MIN/MAT	Bort les Orgues - Monestier	45°29'05,9"N	2°30'20,3"E
14 GA 09		MIN	Bort les Orgues - Aubazines	45°25'09,6"N	2°29'04,6"E
14 GA 10		MIN	Triouzoune - Antiges	45°23'45,8"N	2°17'11,0"E
14 GA 11		MIN	Enchanet	45°05'05,2"N	2°12'46,7"E
14 GA 12	130281-44	MIN/MAT	St Etienne Cantalès	44°56'10,3"N	2°13'04,6"E
14 GA 13		MIN	St Etienne Cantalès	44°54'24,6"N	2°15'14,2"E
14 GA 14	130281-45	MIN/MAT	Sarrans	44°51'09,2"N	2°46'52,2"E
14 GA 15		MIN	Sarrans	44°51'05,9"N	2°46'07,7"E
14 GA 16		MIN	Sarrans	"	"
14 GA 17		MIN	Sarrans	44°50'58,0"N	2°46'19,1"E
14 GA 18		MIN	Sarrans	44°50'58,1"N	2°46'19,1"E
14 GA 19		MIN	Sarrans	44°51'06,3"N	2°46'46,7"E
14 GA 20		MIN	Sarrans	44°51'09,2"N	2°46'52,2"E
14 GA 21		MIN	Sarrans - Pont de Treboul	44°52'22,8"N	2°51'58,6"E
14 GA 22	130281-46	MIN/MAT	Sarrans - Pont de Treboul	"	"
14 GA 23	130281-47	MIN/MAT	Montezic	44°43'35,4"N	2°40'38,6"E
14 GA 24		MIN	Lac de Maury	44°40'13,6"N	2°40'53,5"E
14 GA 25		MIN	Lac de Selves	44°39'27,7"N	2°41'40,4"E
14 GA 26		MIN	Lac de Pont de Salars	44°17'19,7"N	2°43'39,8"E
14 GA 27	130281-49	MIN/MAT	Lac de Pareloup	44°12'40,0"N	2°45'50,0"E
14 GA 28	130281-50	MIN/MAT	Lac de Villefranche	44°06'58,3"N	2°41'28,7"E
14 GA 29		MIN	Lac de Bancalié	43°47'06,9"N	2°15'36,4"E
14 GA 30		MIN	Lac de Razisse	43°48'26,4"N	2°20'59,6"E
14 GA 31		MIN	Lac de Laouzas	43°38'45,1"N	2°46'39,8"E
14 GA 32	130281-51	MIN/MAT	Lac de Ravièges	43°35'44,7"N	2°36'25,4"E
14 GA 33		MIN	Lac de St Peyres	43°32'31,5"N	2°31'57,4"E
14 GA 34		MIN	Lac de Castelnaud Lassouts	44°29'49,2"N	2°53'28,7"E
14 GA 35		MIN	Lac du Moulinet	44°38'36,9"N	3°14'01,4"E
14 GA 36		MIN	Lac de Ganivet	44°38'51,5"N	3°24'33,6"E

Le Pertuis Breton et les bassins versants associés

Les prélèvements ont été effectués en 3 campagnes d'échantillonnage :

- du 29 avril au 2 mai 2013
- 18 février 2014
- 5 juillet 2014

Nom du prélèvement	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Latitude	Longitude
13 LAY 01	130281-2	MIN/MAT	Moricq - Lay	46°23'44,8"N	1°22'15,7"W
13 LAY 02	130281-3	MIN/MAT	Sortie estuaire - Lay	46°17'44,5"N	1°15'26,2"W
13 LAY 03	130281-4	MIN/MAT	Port Aiguillon - Lay	46°19'58,3"N	1°18'50,9"W
13 LAY 04	130281-5	MIN/MAT	Les Mothes - Lay	46°21'55,7"N	1°22'03,9"W
13 LAY 05	130281-6	MIN/MAT	Barrage Braud - Lay	46°20'50,7"N	1°20'11,4"W
14 LAY 01		MIN	Rochereau - Lay	46°42'14,5"N	0°57'25,7"W
14 LAY 02		MIN	Rochereau - Lay	46°41'26,4"N	0°57'26,9"W
14 LAY 03		MIN	Angle Guignard - Lay	46°38'20,9"N	1°03'53,5"W
14 LAY 04		MIN	Angle Guignard - Lay	46°38'01,2"N	1°04'09,5"W
14 LAY 05		MIN	Vouraie - Lay	46°39'51,0"N	1°08'54,6"W
14 LAY 06		MIN	Marillet	46°34'34,4"N	1°14'49,0"W
14 LAY 07	130281-27	MIN/MAT	Marillet	46°33'52,8"N	1°14'00,8"W
14 LAY 08		MIN	Smagne - Thiré	46°33'04,4"N	1°00'27,7"W
14 LAY 09		MIN	Graon - St Vincent de Graon	46°31'04,4"N	1°23'09,6"W
14 PO 01	130281-28	MIN/MAT	Champagné les Marais - Route pointe aux herbes	46°18'56,4"N	1°08'10,7"W
14 PO 02		MIN	Champagné les Marais - Le petit rocher	46°19'28,5"N	1°07'15,4"W
14 PO 03		MIN	Observatoire de l'Aiguillon - digue 1965	46°18'14,2"N	1°11'50,7"W
14 PO 04	130281-29	MIN/MAT	Observatoire de l'Aiguillon - digues 1965/12	46°18'19,9"N	1°12'12,7"W
14 PO 05		MIN	Observatoire de l'Aiguillon digue Malakoff	46°18'19,3"N	1°12'27,5"W
14 PO 06		MIN	La Dive - le Génie	46°17'28,4"N	1°14'45,8"W
14 SN 01		MIN	Touche Bonpart - Fortranche	46°28'03,4"N	0°11'56,2"W
14 SN 02		MIN	Touche Bonpart - Clavée	46°29'38,5"N	0°13'35,8"W
	130281-64	MELANGE	80 % 130281-4 20% chamotte	-	-
	130281-66	MELANGE	Mélange industriel	-	-

Le Pertuis d'Antioche et les bassins versants associés

Les prélèvements ont été effectués en 2 campagnes d'échantillonnage :

- 20 février 2014
- 7 juillet 2014

Nom du prélèvement	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Latitude	Longitude
14 ANT 01	130281-32	MIN/MAT	Nieulle sur Seudre	45°44'33,8"N	1°03'06,5"W
14 ANT 02		MIN	La Cayenne	45°47'22,4"N	1°07'32,3"W
14 ANT 03		MIN	Ronce les Bains	45°48'12,5"N	1°09'29,9"W
14 ANT 04		MIN	Ronce les Bains	45°48'11,0"N	1°09'22,9"W
14 ANT 05		MIN	Baie de Marecareuil	45°49'59,3"N	1°09'09,4"W
14 ANT 06		MIN	Pointe des Gors	45°51'34,2"N	1°09'15,9"W
14 ANT 07		MIN	Port des Barques	45°57'08,4"N	1°03'16,9"W
14 ANT 08	130281-33	MIN/MAT	Noraudière	45°54'51,6"N	0°58'30,1"W
14 ANT 09		MIN	Baie d'Yves	46°01'01,7"N	1°03'31,6"W
14 CH 01	130281-39	MIN/MAT	Mas Chaban - barrage	45°48'57,6"N	0°38'55,5"E
14 CH 02	130281-40	MIN/MAT	Mas Chaban - amont	45°47'06,6"N	0°39'32,4"E
14 CH 03	130281-41	MIN/MAT	Lavaud - la Gerlie	45°48'04,7"N	0°42'26,9"E
14 CH 04	130281-42	MIN/MAT	Lavaud - barrage	45°49'10,9"N	0°41'08,1"E

Le bassin d'Arcachon

Les prélèvements ont été effectués en une campagne d'échantillonnage, le 19 février 2014.

Nom du prélèvement	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Latitude	Longitude
14 ARC 01		MIN	Jane de Boy	44°45'21,1"N	1°10'28,3"W
14 ARC 02	130281-30	MIN/MAT	Port de Tausat	44°43'02,9"N	1°04'25,2"W
14 ARC 03	130281-31	MIN/MAT	Estuaire Eyre	44°39'07,1"N	1°00'33,2"W

La côte Manche

Les prélèvements ont été effectués en 2 campagnes d'échantillonnage :

- Février 2014 (Baie du Mont Saint Michel)
- 16 et 17 juillet 2014 (Baie de Somme et du Mont Saint Michel, estuaire de la Rance)

Nom du prélèvement	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Latitude	Longitude
14 MSM 01		MIN	Le Gué de l'Epine	48°39'01,4"N	1°23'39,1"W
14 MSM 02		MIN	Pontaubault	48°38'10,1"N	1°21'47,1"W
14 MSM 03		MIN	St Jean le Thomas	48°42'02,1"N	1°30'46,1"W
14 MSM 04	130281-54	MIN/MAT	La Caserne - Couesnon	48°35'48,0"N	1°30'52,1"W
14 MSM 05	130281-55	MIN/MAT	Polder Couesnon	48°36'55,4"N	1°33'43,9"W
14 SOMME	130281-52	MIN/MAT	Baie de Somme	50°12'50,4"N	1°39'17,9"E
14 RANCE 01		MIN	Bas Champ Pleuhiden	48°31'38,4"N	1°57'05,8"W
14 RANCE 02	130281-56	MIN/MAT	Ecluse du Chatelet	48°29'32,8"N	1°59'55,1"W

Annexe 4. Analyses minéralogiques

Méthode

Les analyses de Diffractions de rayons X sont réalisées au Centre Géosciences de MINES ParisTech à Fontainebleau avec un diffractomètre X'Pert Pro MPD - Panalytical équipé d'une anode Cu (raie $K\alpha$, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, tension du générateur 40 kV, courant 30 mA).

Le principe de l'analyse est la diffraction d'un faisceau de rayon X envoyé par une source sur les différents réseaux cristallins. La loi de Bragg relie la longueur d'onde du faisceau incident avec l'angle entre celui-ci et le réseau de plan et avec l'espacement interfoliaire.

$$\lambda = 2d \cdot \sin\theta \text{ (loi de Bragg)}$$

avec λ , la longueur d'onde de la source ; d , la distance interfoliaire ; θ , l'angle entre le faisceau incident et le réseau de plans.

En parcourant, une large gamme d'angle θ , à une même longueur d'onde, il est possible d'obtenir le diffractogramme correspondant aux minéraux présents dans l'échantillon et dont le réseau cristallin est caractéristique.

Les protocoles de préparation des échantillons et les méthodes d'analyses sont classiques et présentés dans le rapport technique de Thiry (2013).

Composition minéralogique

La composition minéralogique des échantillons est obtenue par diffraction de rayons X sur poudres désorientées sur une gamme d'angle incident de 2 à 60° θ . Les échantillons sont broyés très finement.

Cette première analyse permet de déterminer la composition minéralogique générale de l'échantillon dans un premier temps et d'estimer semi-quantitativement la teneur des minéraux qui le composent.

Identification des phyllosilicates

Un protocole analytique spécifique est utilisé pour l'identification des phyllosilicates qui est difficile sur poudre désorientée à cause du seuil d'identification et de leur faible cristallinité. L'analyse est réalisée sur une gamme d'angles incidents plus réduite correspondant aux minéraux argileux entre 2 et 29° θ .

Suite à la décarbonatation de la poudre initiale par attaque acide ménagée, l'analyse est conduite sur la fraction granulométrique $<4 \mu\text{m}$ obtenue à partir d'une décantation. Les suspensions sont utilisées pour réaliser des lames orientées qui seront analysées par DRX. Trois lames sont réalisées par échantillon :

- la première lame orientée est séchée à l'air libre et permet d'obtenir un diffractogramme dit « naturel » ;

- la deuxième lame orientée est chauffée à 490°C, ce qui provoque la déshydroxylation de la kaolinite si elle est présente (réaction irréversible) et la déshydratation des smectites et vermiculites (réaction réversible) mais n'a aucune action sur la chlorite (illustrer par diagramme disparition de pics...);
- la troisième lame orientée est saturée d'éthylène glycol qui a pour effet de faire gonfler les smectites (déplacement du pic).

L'interprétation croisée des 3 diffractogrammes permet la discrimination des différents minéraux argileux composant la fraction fine grâce aux variations des distances interréticulaires induites par les traitements et présentées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Distances interréticulaires types des principaux phyllosilicates selon la préparation orientée effectuée : Naturelle (séchée à l'air libre), saturée à l'éthylène glycol ou chauffée à 490°C.

Phyllosilicates		Naturelle	Ethylène Glycol	Chauffée à 490°C
Chlorite		14,2 Å	14,2 Å	14,2 Å
Smectite		14 à 15 Å	17 Å	10 Å
Vermiculite		14 à 15 Å	14 à 15 Å	10 Å
Illite	$(\text{K},\text{H}_3\text{O})\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$	10 Å	10 Å	10 Å
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	7 Å	7 Å	7 Å

Résultats roche totale

Les mélanges industriels

La correspondance pour chaque échantillon est détaillée dans l'annexe 2.

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
01904-1	38	43	11	0	0	8	0	100
01909-1	32	44	11	0	0	13	0	100
01911-1	17	39	3	32	0	9	0	100
01913-1	41	43	6	2	0	3	5	100
01914-1	38	59	0	0	0	0	3	100
01922-1	26	44	12	7	0	9	2	100
01942-1	28	46	3	16	7	0	0	100
01951-2	30	48	4	8	0	10	0	100
01966-1	23	50	6	0	0	18	3	100
11616-1	26	57	7	0	0	10	0	100
11676-1	32	51	5	9	0	3	0	100
11680-1	39	42	8	0	0	11	0	100
11689-1	34	37	17	1	0	11	0	100
11760-1	22	47	17	2	0	10	0	100
493-01	62	13	2	5	1	17	0	100
493-02	32	37	13	9	3	6	0	100
493-03	26	47	9	0	0	18	0	100
493-04	44	26	3	6	3	18	0	100
493-05	34	35	4	19	0	4	4	100
493-06	29	42	7	0	0	22	0	100
493-07	25	38	12	14	2	9	0	100
493-08	31	33	24	4	0	8	0	100
493-10	49	22	9	7	0	13	0	100
493-11	41	30	17	0	0	10	2	100
493-12	32	49	4	0	0	15	0	100
493-13	25	36	11	22	3	3	0	100
493-14	55	34	5	1	0	2	3	100
493-22	31	40	11	ε	2	13	3	100
140922-1	34	22	10	23	0	11	0	100
140923-1	30	31	10	23	1	3	2	100
140923-2	27	36	16	14	2	3	2	100
140923-3	29	38	10	15	3	3	2	100
140943-1	15	16	0	0	0	65	4	100
140943-2	30	55	8	0	0	7	0	100
140943-3	30	44	9	0	0	17	0	100

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
141004-1	36	35	6	5	0	13	5	100
141004-2	33	37	7	5	0	13	5	100
141004-3	36	10	24	0	0	30	0	100
150054-1	35	39	16	3	0	21	0	100
150054-2	33	44	8	0	0	13	2	100
150054-3	29	51	15	0	0	3	2	100
150054-4	47	41	3	1	0	6	2	100
150054-5	30	47	19	0	0	3	1	100
150054-6	18	44	5	0	2	29	2	100
150054-7	36	42	4	5	0	12	1	100
150054-8	24	47	12	7	2	8	0	100
150054-9	47	0	6	1	0	46	0	100

Le bassin versant de la Durance

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
130281-1	15	33	4	43	2	3	0	100
13 DU 02	21	20	25	21	3	10	0	100
13 DU 03	15		12	37	28	5	3	100
13 DU 06	22	15	33	9	10	11	0	100
13 DU 07	11	8	8	40	27	5	1	100
13 DU 09	12	6	31	18	21	8	4	100
13 DU 11	17	10	18	31	11	11	2	100
13 DU 13	16	11	21	34	5	11	2	100
13 DU 15	20	8	15	23	6	24	4	100
13 DU 17	16	7	41	12	10	5	9	100
13 DU 18	23	9	14	21	14	18	1	100
13 DU 19	18	9	25	25	10	13	0	100
13 DU 21	20	7	27	23	12	11	0	100
13 DU 22	15	10	32	37	1	5	0	100
13 DU 25	21	12	19	21	9	17	1	100
13 DU 26	26	14	23	28	3	5	1	100
13 DU 27	12	10	44	17	5	7	5	100
13 DU 28	17	10	38	15	5	10	5	100
13 DU 29	15	13	33	17	4	18	0	100
130281-7	20	16	24	17	7	8	8	100
130281-8	17		34	16	7	10	9	100
130281-9	18	11	32	13	4	22	0	100
13 DU 30	19	11	30	18	6	13	3	100
13 DU 32	17	11	10	52	6	4	ε	100
13 DU 33	19	19	26	31	1	4	ε	100
13 DU 35	17	20	19	38	1	5	0	100
13 DU 37	15	13	32	34	0	6	0	100
13 DU 38	19	29	31	12	1	8	0	100
13 DU 41	21	18	26	25	2	7	1	100
13 DU 42	18	24	28	21	2	7	0	100
13 DU 43	19	21	37	18	0	5	0	100
13 DU 44	22	12	23	35	1	6	1	100
13 DU 45	20	24	40	9	0	7	0	100
13 DU 48	23	23	32	16	0	6	0	100
13 DU 52	19	21	20	36	0	4	0	100
13 DU 54	19	14	19	43	0	5	0	100
13 DU 57	14	14	12	56	0	2	2	100
13 DU 59	21	14	28	31	2	5	1	100
13 DU 64	21	20	24	26	2	6	1	100

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
13 DU 67	18	32	19	24	1	6	0	100
13 DU 68	22	31	15	23	2	5	2	100
13 DU 71	25	16	14	35	2	6	2	100
13 DU 74	30	20	10	33	1	5	1	100
13 DU 77	20	22	8	44	2	4	0	100
13 DU 79	23	20	13	37	2	5	0	100
13 DU 80	17	20	10	50	1	3	0	100
13 DU 82	26	20	11	38	2	3	0	100
13 DU 83	20	14	4	56	1	3	2	100
13 DU 86	19	26	13	38	1	3	0	100
13 DU 88	23	31	8	34	0	4	0	100
13 DU 89	25	19	4	45	2	5	0	100
13 DU 92	17	35	9	33	1	5	0	100
13 DU 95	20	16	9	49	2	4	0	100
13 DU 97	20	23	6	46	1	4	0	100
13 DU 99	16	23	20	32	2	7	0	100
13 DU 101	20	25	10	42	1	2	0	100
13 DU 103	25	19	6	46	1	3	0	100
13 DU 105	18	11	3	64	0	4	0	100
13 DU 107	23	17	9	44	1	5	0	100
13 DU 109	18	17	8	52	0	5	0	100
13DU109 brut	18	20	7	50	0	5	0	100
13 DU 110	11	23	3	61	0	2	0	100
13DU110 brut	13	21	0	62	0	4	0	100
13 DU 111	14	14	0	67	1	4	0	100
13DU111 brut	23	9	0	57	2	9	0	100
13 DU 112	17	18	1	56	3	5	0	100
13DU112 brut	16	16	0	55	3	10	0	100
13 DU 113	18	19	4	55	1	3	0	100
13DU113 brut	24	14	2	55	1	4	0	100

Systeme Seine

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
13 SE 01	21	37	8	0	0	34	0	100
13 SE 02	33	21	7	0	0	39	0	100
13 SE 03	23	21	19	0	0	37	0	100
13 SE 04	27	33	8	0	0	32	0	100
13 SE 05	31	26	10	0	0	33	0	100
13 SE 06	27	39	11	0	0	23	0	100
13 SE 07	27	42	3	0	0	28	0	100
13 SE 08	33	51	11	1	0	4	0	100
13 SE 09	38	41	2	15	0	4	0	100
13 SE 10	61	25	3	2	0	8	1	100
13 SE 11	63	14	0	17	0	6	0	100
13 SE 12	58	11	1	19	0	11	0	100
13 SE 13	26	24	2	44	0	4	0	100
13 SE 14	27	47	5	13	0	8	ε	100
13 SE 15	59	5	1	30	0	5	0	100
14 SE 16	39	16	4	32	3	6	0	100
14 SE 17	24	16	0	33	6	3	18	100
14 SE 18	17	14	4	42	13	2	8	100
14 SE 19	27	23	4	36	3	7	0	100
14 SE 20	15	0	0	25	0	0	60	100

Systeme Garonne

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
14 GA 01	17	23	38	0	0	22	0	100
14 GA 02	24	16	36	0	0	24	0	100
14 GA 03	18	36	19	0	0	27	0	100
14 GA 04	44	13	25	0	0	18	0	100
14 GA 05	17	19	35	0	0	29	0	100
14 GA 06	20	30	35	0	0	15	0	100
14 GA 07	12	33	26	0	0	29	0	100
14 GA 08	43	21	16	0	0	20	0	100
14 GA 09	62	6	10	0	0	22	0	100
14 GA 10	42	0	10	0	0	43	5	100
14 GA 11	41	0	49	0	0	8	2	100

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
14 GA 12	72	6	3	0	0	19	0	100
14 GA 13	42	0	12	0	2	44	0	100
14 GA 14	11	59	18	0	0	12	0	100
14 GA 15	11	50	29	0	0	10	0	100
14 GA 16	27	24	17	0	0	32	0	100
14 GA 17 A	26	20	24	0	0	30	0	100
14 GA 17 B	14	40	22	0	0	24	0	100
14 GA 18 A	13	35	26	0	0	26	0	100
14 GA 18 B	12	50	14	0	0	24	0	100
14 GA 19	11	57	15	0	0	17	0	100
14 GA 20 A	11	62	0	0	0	27	0	100
14 GA 20 B	37	15	18	0	0	30	0	100
14 GA 20 C	43	10	22	0	0	25	0	100
14 GA 20 D	47	5	23	0	0	21	0	100
14 GA 20 E	37	6	25	0	0	29	4	100
14 GA 20 F	45	11	21	0	0	23	3	100
14 GA 21	18	29	18	0	0	35	0	100
14 GA 22	16	35	25	0	0	24	0	100
14 GA 23	35	23	14	0	0	28	0	100
14 GA 24	41	6	12	0	0	37	4	100
14 GA 25	50	5	9	0	0	36	0	100
14 GA 26	58	8	20	0	0	10	0	100
14 GA 27	60	22	7	0	0	3	0	100
14 GA 28	42	13	12	0	0	15	0	100
14 GA 29	87	5	4	0	0	4	0	100
14 GA 30	63	23	9	0	0	5	0	100
14 GA 31	54	2	9	0	0	35	0	100
14 GA 32	59	0	10	0	0	28	0	100
14 GA 33	53	0	11	0	0	34	0	100
14 GA 34	39	0	13	0	0	0	0	100
14 GA 35	38	15	9	0	0	38	0	100
14 GA 36	54	0	15	0	0	31	0	100

Le Pertuis Breton et les bassins versants associés

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
13 LAY 01 μ	16	53	10	8	2	10	1	100
13LAY01 brut	16	54	10	8	1	10	1	100
13 LAY 02 μ	14	51	9	13	2	8	3	100
13LAY02 brut	13	45	9	11	2	10	10	100
13 LAY 03 μ	16	46	9	15	3	9	2	100
13LAY03 brut	16	46	9	12	3	9	5	100
13 LAY 05 μ	18	54	10	6	2	10	0	100
13LAY05 brut	22	42	11	7	2	15	1	100
130281-2	18	58	5	10	2	7	0	100
130281-3	14	54	7	12	2	4	7	100
130281-4	21	49	6	15	4	4	1	100
130281-5	18	55	5	10	3	9	0	100
130281-6	28	40	6	8	3	15	0	100
14 LAY 01	37	32	18	0	0	11	2	100
14 LAY 02	70	0	4	7	4	15	0	100
14 LAY 03	39	24	19	0	0	18	0	100
14 LAY 04	83	0	3	ε	0	12	2	100
14 LAY 05	45	0	24	ε	0	31	0	100
14 LAY 06	55	23	8	0	0	14	0	100
14 LAY 07	34	39	14	0	0	13	0	100
14 LAY 08	44	25	4	10	0	17	0	100
14 LAY 09	47	0	48	0	0	5	0	100
14 PO 01	18	52	11	8	1	10	0	100
14 PO 02	15	46	10	17	4	8	0	100
14 PO 03	16	46	10	17	3	8	0	100
14 PO 04	19	46	10	13	3	9	0	100
14 PO 05	21	43	12	12	3	9	0	100
14 PO 06	29	44	10	8	1	7	1	100
14 SN 01	37	10	25	3	0	25	0	100
14 SN 02	33	0	31	0	0	36	0	100

Pertuis d'Antioche

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
14 ANT 01	24	46	13	7	0	9	1	100
14 ANT 02	28	34	13	13	0	9	3	100
14 ANT 03	79	0	2	2	0	16	1	100
14 ANT 04	68	7	5	4	2	13	1	100
14 ANT 05	46	14	13	13	0	13	1	100
14 ANT 06	36	13	6	30	0	11	4	100
14 ANT 07	19	36	17	16	2	8	2	100
14 ANT 08	24	38	11	16	2	7	2	100
14 ANT 09	16	33	13	19	4	1	14	100
14 CH 01	50	0	14	0	0	36	0	100
14 CH 02	55	0	5	0	0	40	0	100
14 CH 03	52	0	6	0	0	42	0	100
14 CH 04	56	0	12	0	0	32	0	100

Bassin d'Arcachon

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
14 ARC 01	57	22	6	0	0	7	8	100
14 ARC 02	71	11	5	0	0	10	3	100
14 ARC 03	47	35	7	0	0	9	2	100

Côte Manche (Mont-Saint-Michel - Rance - Somme)

N° échantillon	quartz	minéraux argileux	autres silicates	calcite	autres carbonates	feldspath	autres minéraux	TOTAL
14 MSM 01	39	4	4	27	16	10	0	100
14 MSM 02	38	7	4	26	15	10	0	100
14 MSM 03	23	25	7	21	12	10	2	100
14 MSM 04	36	0	9	24	16	15	0	100
14 MSM 05	42	0	7	22	15	14	0	100
14 RANCE 01	39	13	10	12	8	16	2	100
14 RANCE 02	17	32	14	16	11	9	1	100
14 SOMME	48	0	2	40	4	5	1	100

Résultats de la minéralogie des argiles

Echantillons de mélanges industriels

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
01904-1	80	5	15	0	0	0
01909-1	80	5	15	0	0	0
01911-1	20	10	25	25	20	0
01913-1	70	10	20	0	0	0
01914-1	0	0	0	100	0	0
01922-1	50	25	25	0	0	0
01942-1	50	10	10	30	0	0
01951-2	10	15	35	40	0	0
01966-1	40	30	10	20	0	0
11616-1	20	30	0	45	5	0
11676-1	10	30	0	60	0	0
11680-1	70	5	25	0	0	0
11689-1	20	20	20	40	0	0
11760-1	35	20	0	20	25	0
493-01	15	15	20	40	10	0
493-02	10	40	20	20	10	0
493-03	40	30	30	0	0	0
493-04	20	20	20	30	10	0
493-05	30	20	0	40	10	0
493-06	35	20	30	10	5	0
493-07	15	50	20	0	15	0
493-08	5	60	20	0	15	0
493-10	60	20	20	0	0	0
493-11	20	30	40	0	10	0
493-12	25	25	0	40	10	0
493-13	15	30	10	30	15	0
493-14	70	15	0	15	0	0
493-22	50	25	25	0	0	0
140922-1	20	20	20	20	20	0
140923-1	20	20	20	20	20	0
140923-2	60	15	10	10	5	0
140923-3	25	25	0	25	25	0
140943-1	20	10	10	60	0	0
140943-2	30	35	0	35	0	0
140943-3	30	30	10	30	0	0
141004-1	30	35	0	35	ε	0

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
141004-2	25	40	0	35	ε	0
141004-3	ε	50	0	0	50	0
150054-1	55	20	0	25	0	0
150054-2	50	20	10	20	0	0
150054-3	85	15	0	0	0	0
150054-4	60	20	0	20	0	0
150054-5	85	15	0	0	0	0
150054-6	50	ε	10	40	0	0
150054-7	40	30	0	30	0	0
150054-8	20	35	10	25	10	0
150054-9	40	10	0	30	20	0

Système Durance

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
130281-1	30	30	0	30	10	0
13 DU 02	0	70	0	0	30	0
13 DU 03	0	65	0	0	35	0
13 DU 06	0	50	0	0	50	0
13 DU 07	0	65	0	0	35	0
13 DU 09	0	55	0	0	45	0
13 DU 11	0	65	0	0	35	0
13 DU 13	0	55	0	0	45	0
13 DU 15	0	55	0	0	45	0
13 DU 17	0	60	0	0	40	0
13 DU 18	0	60	0	0	40	0
13 DU 19	0	55	0	0	45	0
13 DU 21	0	60	0	0	40	0
13 DU 22	0	70	0	0	30	0
13 DU 25	0	60	0	0	40	0
13 DU 26	0	50	0	10	40	0
13 DU 27	0	0	0	0	0	0
13 DU 28	0	60	0	0	40	0
13 DU 29	0	50	0	0	50	0
130281-7	25	50	0	0	25	0
130281-8	25	50	0	0	25	0
130281-9	25	50	0	0	25	0
13 DU 30	0	55	0	0	45	0
13 DU 32	0	50	0	0	50	0
13 DU 33	0	60	0	0	40	0
13 DU 35	0	50	0	0	50	0
13 DU 37	0	65	0	0	35	0
13 DU 38	0	45	0	5	50	0
13 DU 41	0	55	0	5	40	0
13 DU 42	0	60	0	0	40	0
13 DU 43	0	70	0	0	30	0
13 DU 44	0	60	0	0	40	0
13 DU 45	0	70	0	0	30	0
13 DU 48	0	75	0	0	25	0
13 DU 52	0	50	0	0	50	0
13 DU 54	0	70	0	0	30	0
13 DU 57	0	75	0	0	25	0
13 DU 59	0	60	0	0	40	0
13 DU 64	0	60	0	0	40	0

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
13 DU 67	0	40	0	20	40	0
13 DU 68	10	30	0	30	30	0
13 DU 71	10	30	0	30	30	0
13 DU 74	15	30	0	25	30	0
13 DU 77	15	30	0	25	30	0
13 DU 79	15	25	0	35	25	0
13 DU 80	20	20	10	30	20	0
13 DU 82	15	25	0	35	25	0
13 DU 83	20	20	20	30	10	0
13 DU 86	15	30	5	30	20	0
13 DU 88	30	10	30	30	0	0
13 DU 89	20	15	40	20	5	0
13 DU 92	20	25	5	30	20	0
13 DU 95	10	35	5	30	20	0
13 DU 97	20	15	45	20	0	0
13 DU 99	20	35	5	20	20	0
13 DU 101	20	25	5	30	20	0
13 DU 103	20	20	20	30	10	0
13 DU 105	20	20	40	10	10	0
13 DU 107	10	35	5	30	20	0
13 DU 109	25	25	5	20	25	0
13DU109 brut	25	25	5	20	25	0
13 DU 110	30	30	10	20	10	0
13DU110 brut	30	20	20	30	0	0
13 DU 111	10	10	20	40	0	20
13DU111 brut	10	10	20	40	0	20
13 DU 112	10	10	20	40	0	20
13DU112 brut	10	10	20	40	0	20
13 DU 113	20	20	40	20	0	0
13DU113 brut	20	20	40	20	0	0

Système Seine

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
13 SE 01	40	20	0	0	25	15
13 SE 02	40	20	0	0	25	0
13 SE 03	40	20	0	0	25	0
13 SE 04	40	20	0	0	25	0
13 SE 05	30	20	0	15	20	15
13 SE 06	20	25	0	0	30	25
13 SE 07	40	20	0	0	25	0
13 SE 08	40	10	10	40	0	0
13 SE 09	40	10	10	40	0	0
13 SE 10	50	15	5	30	0	0
13 SE 11	50	10	10	30	0	0
13 SE 12	50	10	10	30	0	0
13 SE 13	40	10	10	40	0	0
13 SE 14	25	5	10	60	0	0
13 SE 15	35	15	0	50	0	0
14 SE 16	30	15	10	40	5	0
14 SE 17	25	20	10	40	5	0
14 SE 18	25	20	10	40	5	0
14 SE 19	25	20	10	40	5	0
14 SE 20	30	15	0	55	0	0

Système Garonne

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
14 GA 01	20	25	0	40	15	0
14 GA 02	20	25	0	40	15	0
14 GA 03	20	25	0	40	15	0
14 GA 04	20	30	0	35	15	0
14 GA 06	30	25	0	25	20	0
14 GA 07	30	25	0	25	20	0
14 GA 08	60	20	0	20	0	0
14 GA 09	60	10	0	30	0	0
14 GA 10	30	30	0	40	0	0
14 GA 11	15	30	0	35	20	0
14 GA 12	20	40	0	10	30	0
14 GA 13	10	30	0	50	10	0
14 GA 14	30	50	0	0	20	0

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
14 GA 15	40	50	0	0	10	0
14 GA 16	20	30	0	30	20	0
14 GA 17 A	25	25	0	25	25	0
14 GA 17 B	35	25	0	25	15	0
14 GA 18 A	35	25	0	25	15	0
14 GA 18 B	50	40	0	0	10	0
14 GA 19	30	30	0	20	20	0
14 GA 20 A	40	20	0	20	20	0
14 GA 20 B	30	25	0	25	20	0
14 GA 20 C	30	25	0	25	20	0
14 GA 20 D	30	20	0	30	20	0
14 GA 20 E	30	20	0	30	20	0
14 GA 20 F	30	20	0	30	20	0
14 GA 21	25	25	0	25	25	0
14 GA 22	250	25	0	25	25	0
14 GA 23	40	20	0	20	20	0
14 GA 24	25	25	0	25	25	0
14 GA 25	40	20	10	30	0	0
14 GA 26	30	10	0	50	10	0
14 GA 27	60	30	0	0	10	0
14 GA 28	25	10	0	40	25	0
14 GA 29	25	30	0	20	25	0
14 GA 30	25	50	0	0	25	0
14 GA 31	30	10	0	40	20	0
14 GA 32	30	10	0	40	20	0
14 GA 33	15	10	0	60	15	0
14 GA 34	30	30	0	20	20	0
14 GA 35	25	10	0	50	15	0
14 GA 36	10	30	10	30	20	0

Pertuis Breton

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
130281-2	30	30	35	0	5	0
130281-3	30	30	35	0	5	0
130281-4	30	30	35	0	5	0
130281-5	30	30	35	0	5	0
130281-6	30	30	35	0	5	0
14 LAY 01	30	65	0	0	5	0
14 LAY 02	15	75	0	0	10	0
14 LAY 03	30	40	0	0	30	0
14 LAY 04	15	60	0	0	25	0
14 LAY 05	20	65	0	0	15	0
14 LAY 06	30	20	0	50	0	0
14 LAY 07	40	10	0	50	0	0
14 LAY 08	60	20	0	10	10	0
14 LAY 09	25	60	0	0	15	0
14 PO 01	20	45	0	20	15	0
14 PO 02	20	45	0	20	15	0
14 PO 03	20	45	0	20	15	0
14 PO 04	20	45	0	20	15	0
14 PO 05	20	45	0	20	15	0
14 PO 06	20	45	0	20	15	0
14 SN 01	15	35	0	20	30	0
14 SN 02	15	35	0	20	30	0

Pertuis d'Antioche

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
14 ANT 01	15	45	10	20	10	0
14 ANT 02	15	40	10	25	10	0
14 ANT 03	10	50	0	20	20	0
14 ANT 04	15	40	10	25	10	0
14 ANT 05	20	50	0	20	10	0
14 ANT 06	20	40	0	25	15	0
14 ANT 07	20	40	0	25	15	0
14 ANT 08	20	40	0	25	15	0
14 ANT 09	20	40	0	25	15	0
14 CH 01	20	30	0	30	20	0
14 CH 02	30	20	0	30	20	0
14 CH 03	25	20	0	40	15	0
14 CH 04	20	30	0	30	20	0

Bassin d'Arcachon

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
14 ARC 01	20	50	0	10	20	0
14 ARC 02	20	50	0	10	20	0
14 ARC 03	20	50	0	10	20	0

Côte Manche(Mont Saint Michel - Rance - Somme)

N° échantillon	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés	Chlorite	Autres phyllosilicates
14 MSM 01	25	35	0	25	15	0
14 MSM 02	20	35	0	30	15	0
14 MSM 03	30	35	0	20	15	0
14 MSM 04	30	35	0	20	15	0
14 MSM 05	20	35	0	30	15	0
14 RANCE 01	35	35	0	20	10	0
14 RANCE 02	35	35	0	20	10	0
14 SOMME	20	20	0	50	10	0

Annexe 5. Les analyses géochimiques

Analyses de Calcimétrie

La méthode de calcimétrie Bernard permet de mesurer le volume de CO₂ dégagé par la réaction de l'acide chlorhydrique (HCl) avec le carbonate de calcium (CaCO₃) d'un échantillon de sol ou de roche. La teneur en CaCO₃ est ainsi calculable à partir du volume de CO₂.

Les mélanges de production

n° échantillons	CaCO ₃ %
01904-1	1,02
01909-1	1,25
01911-1	35,71
01913-1	1,81
01914-1	1,14
01922-1	5,56
01942-1	18,61
01951-2	6,65
01966-1	0,91
11616-1	1,02
11676-1	7,78
11680-1	0,91
11689-1	1,59
11760-1	1,37
00493-1	4,00
00493-2	8,00
00493-3	1,00
00493-4	6,00
00493-5	17,00
00493-6	1,00
00493-7	12,00
00493-8	3,00
00493-10	4,00
00493-11	1,00

n° échantillons	CaCO ₃ %
00493-12	1,00
00493-13	22,00
00493-14	1,00
00493-22	1,00
140922-1	19,00
140923-1	21,00
140923-2	16,00
140923-3	16,00
140943-1	0,70
140943-2	0,80
140943-3	0,90
141004-1	5,10
141004-2	4,60
141004-3	1,20
150054-1	3,00
150054-2	1,40
150054-3	0,90
150054-4	1,40
150054-5	1,00
150054-6	1,10
150054-7	3,10
150054-8	4,90
150054-9	0,90

Le bassin versant de la Durance

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-1	41,07
130281-7	24,19
130281-8	23,21
130281-9	18,88

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-15	51,25
130281-16	55,36
130281-17	50,11

Le bassin versant de la Seine

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-10	0,46
130281-11	0,45
130281-12	1,02
130281-13	1,02
130281-14	0,91
130281-18	3,29
130281-19	3,57
130281-20	15,76

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-21	38,39
130281-22	7,76
130281-23	18,37
130281-53	26,00
130281-60	27,00
130281-61	37,00
130281-62	27,00
130281-63	40,00

Le bassin versant de la Garonne

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-34	0,23
130281-35	0,46
130281-36	0,23
130281-37	0,23
130281-38	0,34
130281-43	1,00
130281-44	1,00

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-45	1,00
130281-46	1,00
130281-47	1,00
130281-48	1,00
130281-49	1,00
130281-50	1,00
130281-51	1,00

Le Pertuis Breton et les bassins versants associés

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-2	8,07
130281-3	11,02
130281-4	13,40
130281-5	8,85

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-6	7,26
130281-27	1,02
130281-28	6,23
130281-29	10,89

Le Pertuis d'Antioche et les bassins versants associés

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-32	4,00
130281-33	14,78
130281-39	1,00

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-40	1,00
130281-41	1,00
130281-42	1,00

Le Bassin d'Arcachon

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-30	0,89

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-31	0,89

La Côte Manche (Mont-Saint-Michel - Somme - Rance)

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-52	32,00
130281-54	38,00

n° échantillons	CaCO ₃ %
130281-55	41,00
130281-56	20,00

Analyses ICP AES - Eléments Majeurs

Les analyses chimiques élémentaires sont réalisées par spectrométrie ICP-OES Vista MPX (Inductively-Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry). Il s'agit d'une méthode rapide et quantitative qui a pour but de doser les éléments majeurs constituant le produit, en parallèle les uns des autres. L'analyse se fait sur l'échantillon à l'état liquide. Chaque échantillon est donc broyé, tamisé à 63 μm , puis séché à 105 °C pendant 48 h. Il est ensuite chauffé à 1 050 °C pendant 1 h. Le solide obtenu est alors fusionné avec du tétraborate de lithium à 1 140 °C puis mis en solution dans de l'acide chlorhydrique dilué. La solution d'attaque est enfin dosée. Puis grâce à un plasma d'argon, l'échantillon injecté est ionisé. Chaque élément va émettre un rayonnement à une longueur d'onde qui lui est spécifique. L'intensité de chaque raie d'émission est proportionnelle à la concentration de l'élément.

Nom	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	BaO
130281-1	45,0	14,7	4,6	0,7	29,5	1,8	2,3	0,4	0,1	<0,2	<0,1
130281-2	56,5	20,1	7,5	0,9	7,6	2,6	3,5	0,5	0,2	0,3	<0,1
130281-3	51,0	18,2	7,4	0,8	10,6	3,1	4,0	4,5	0,2	0,3	<0,1
130281-4	53,7	17,8	6,7	0,8	11,6	2,9	3,8	1,6	0,1	0,3	<0,1
130281-5	57,6	18,7	7,0	0,9	8,4	2,7	3,3	0,6	0,1	<0,2	<0,1
130281-6	61,5	16,5	6,2	0,8	7,4	2,4	3,6	1,0	0,1	0,3	<0,1
130281-7	52,1	13,8	5,9	0,6	18,6	4,3	2,6	1,1	0,2	<0,2	<0,1
130281-8	54,0	18,0	6,6	0,8	11,7	3,0	3,4	1,5	0,1	0,3	<0,1
130281-9	52,6	16,8	5,6	0,8	14,4	3,6	3,7	1,6	0,2	<0,2	<0,1
130281-10	64,5	19,2	5,9	1,1	1,9	1,3	3,5	1,2	0,2	0,6	<0,1
130281-11	71,8	15,3	4,3	0,8	1,4	1,6	3,3	1,5	0,1	0,3	0,1
130281-12	69,6	17,4	3,6	0,8	1,0	0,7	4,2	1,5	<0,06	0,3	<0,1
130281-13	63,5	19,3	5,9	1,0	2,1	1,4	4,2	1,1	0,1	0,5	<0,1
130281-14	74,6	16,3	1,3	0,8	0,6	0,2	3,9	1,3	0,0	<0,2	<0,1
130281-15	42,2	10,7	3,6	0,5	38,7	1,0	2,2	0,5	<0,06	<0,2	<0,1
130281-16	38,1	9,7	2,8	0,4	45,5	1,2	1,7	0,3	0,1	<0,2	<0,1
130281-17	48,8	5,2	2,7	0,4	39,6	1,2	1,2	0,2	0,0	<0,2	<0,1
130281-18	61,8	14,7	6,3	1,0	11,3	1,1	2,6	0,2	0,1	<0,2	<0,1
130281-19	82,3	8,5	3,0	1,2	2,8	0,3	1,7	0,2	<0,06	<0,2	<0,1
130281-20	80,0	4,9	2,5	0,6	10,0	0,2	1,1	0,3	<0,06	<0,2	<0,1
130281-21	53,1	13,9	4,7	0,8	24,8	1,2	2,2	0,3	<0,06	<0,2	<0,1
130281-22	66,7	16,0	5,5	1,1	6,8	1,2	2,8	0,2	0,0	<0,2	<0,1
130281-23	80,5	3,1	1,7	0,5	13,0	0,2	1,1	0,1	0,0	<0,2	<0,1
130281-27	72,5	14,7	4,1	0,6	0,6	0,9	3,6	0,5	0,1	<0,2	<0,1
130281-28	57,6	20,5	7,4	1,0	6,3	2,5	3,6	0,7	0,2	<0,2	<0,1
130281-29	57,7	19,5	7,0	0,9	8,7	2,7	3,5	0,7	0,1	0,3	<0,1
130281-30	92,7	3,4	1,2	0,3	0,6	0,3	0,8	0,6	0,0	<0,2	<0,1
130281-31	75,3	12,0	6,4	0,6	0,5	1,1	2,2	1,7	0,0	0,3	<0,1
130281-32	60,2	19,6	6,9	0,9	4,5	2,6	3,5	1,6	0,1	<0,2	<0,1
130281-33	56,2	17,1	6,2	0,8	12,0	2,5	3,0	0,9	0,1	0,3	<0,1
130281-34	66,2	18,9	5,6	1,0	0,6	1,7	4,0	1,9	0,1	0,3	<0,1
130281-35	61,5	17,8	8,2	2,0	2,7	2,2	2,7	2,1	0,1	0,5	<0,1
130281-36	65,5	19,7	6,4	1,0	1,0	1,9	3,3	1,6	0,1	0,3	<0,1
130281-37	63,1	22,0	6,6	1,3	0,7	1,8	3,5	1,3	0,1	0,4	<0,1
130281-38	61,3	22,1	7,1	1,1	1,1	2,0	3,4	1,3	0,1	0,6	<0,1
130281-39	72,6	13,9	4,9	0,7	0,9	1,5	2,5	2,3	0,1	<0,2	<0,1
130281-40	79,1	11,9	1,9	0,2	0,4	0,3	4,3	1,5	0,1	<0,2	<0,1
130281-41	74,0	14,3	2,7	0,4	0,4	0,5	5,9	1,4	0,1	<0,2	<0,1
130281-42	74,3	14,0	4,7	0,8	0,3	0,9	4,4	1,0	0,1	<0,2	<0,1
130281-43	73,2	15,7	3,6	0,5	0,3	0,9	4,4	0,9	0,1	<0,2	<0,1
130281-44	84,7	8,3	1,1	0,3	0,4	0,3	3,4	0,7	0,0	<0,2	<0,1
130281-45	57,8	21,2	12,0	1,6	1,0	1,6	2,6	1,1	0,3	0,8	<0,1
130281-46	59,5	20,2	10,5	1,7	1,4	1,8	2,6	1,2	0,2	0,8	<0,1
130281-47	73,6	17,6	1,8	0,5	0,4	0,5	3,8	1,0	0,1	0,3	<0,1
130281-49	64,7	15,5	8,7	1,1	3,2	2,9	1,9	1,3	0,2	<0,2	<0,1
130281-50	76,9	13,4	6,5	0,4	0,2	0,3	1,1	0,2	0,1	<0,2	<0,1
130281-51	74,4	14,7	3,2	0,4	0,6	0,7	4,0	1,3	0,0	0,2	<0,1
130281-52	71,3	3,6	1,9	0,2	19,9	0,7	1,2	1,0	0,0	0,3	<0,1
130281-53	63,7	8,3	3,5	0,6	20,0	1,3	2,0	0,8	0,1	0,3	<0,1
130281-54	58,4	7,6	2,3	0,5	24,7	1,7	1,9	1,9	0,0	<0,2	<0,1
130281-55	57,2	8,8	1,5	0,4	26,7	1,4	1,7	1,2	0,0	0,3	<0,1
130281-56	53,1	15,2	6,3	0,8	14,9	2,5	3,2	2,8	0,1	0,3	<0,1
130281-60	55,2	9,6	4,2	0,6	20,4	2,2	2,4	5,3	0,1	0,3	<0,1
130281-61	53,1	7,7	3,9	0,5	26,6	1,8	1,7	3,6	0,1	0,4	<0,1
130281-62	56,2	10,6	5,1	0,8	21,3	1,6	2,3	0,6	0,1	0,7	<0,1
130281-63	56,4	5,9	3,2	0,4	30,5	0,7	1,2	0,4	0,1	0,6	<0,1

Méthode XRF portable

La sonde portable de Fluorescence de Rayons X (XRF portable), un outil de caractérisation chimique rapide

La composition chimique en éléments majeurs fait parti des caractéristiques discriminantes quant à la compatibilité d'un sédiment à être utilisé dans l'industrie de la terre cuite. De manière courante et comme présenté dans les chapitres précédents, les analyses chimiques sont réalisées à partir d'un ICP-AES permettant d'obtenir des analyses suffisamment justes et précises pour les matières premières de l'industrie. Cependant, cette méthode d'analyses nécessite une préparation de l'échantillon à doser qui est relativement longue. En effet, l'échantillon est analysé sous forme liquide et nécessite donc un broyage, un tamisage, un séchage puis une fusion et une attaque acide. Cette préparation est d'autant plus longue et lourde quand le nombre d'échantillon augmente. Nous avons donc recherché une méthode de caractérisation chimique demandant le moins de préparation possible tout en étant suffisamment précise pour être discriminante. Les analyses chimiques ICP-AES sont ainsi réservées aux échantillons nécessitant une caractérisation plus précise. La sonde XRF portable, dont MINES ParisTech bénéficie de l'utilisation grâce à la Fédération Île de France de Recherche sur l'Environnement (la FIRE), apparaît comme un outil d'analyses chimiques élémentaires rapides. Il s'agit de l'analyseur XRF portable DELTA Olympus. Cette sonde, encore peu utilisée dans la recherche, a nécessité un développement de méthode d'analyses en partie effectué et présenté par Thomas Gillot durant sa thèse (2014).

L'établissement du temps d'analyse

La sonde portable XRF possède trois modes de mesures en fonction des éléments que l'on souhaite obtenir. Pour mesurer les teneurs en éléments majeurs, le mode "minerais plus" est privilégié avec 2 intensités de rayons différentes permettant de mesurer notamment plus précisément les éléments les plus légers. La première limite de cette méthode est que plus un élément est léger moins il est détecté par la sonde. Selon la notice commerciale, le premier élément à être détecté est le magnésium Mg. Dans les faits, il faut une teneur élevée en Mg pour commencer à le détecter et c'est plus souvent l'aluminium Al qui est détecté en premier suivi du silicium Si. Ces deux éléments légers sont détectés avec le rayon d'intensité la plus élevée car il s'agit des éléments dont la précision de mesure est la moins bonne. Plus le temps d'analyse est long plus la précision sera bonne. Il est donc nécessaire d'établir le temps d'analyses pour les deux intensités pour obtenir le temps d'analyse total optimum pour obtenir l'ensemble des éléments souhaités c'est à dire : aluminium Al, silicium Si, fer Fe, manganèse Mn, calcium Ca, potassium K en sachant que ni le sodium Na ni le magnésium Mg ne sont détectés.

L'erreur en fonction du temps de mesure est représentée pour chaque élément dans les graphiques des Figure 4-17 et Figure 4-18. Les éléments mesurés avec le rayon d'intensité la moins élevée sont : Fe, Mn, Ca et K. L'erreur la plus élevée est celle du Ca et est de l'ordre de $\pm 0,08$ % pour un temps de mesure de 10 secondes. Au-dessus de 20 secondes d'analyses, les quatre éléments chimiques présentent des erreurs inférieures à $\pm 0,05$ %, ce qui est tout à fait acceptable pour une caractérisation rapide. A 30 secondes d'analyses, le Ca et le K montrent une erreur de l'ordre de $\pm 0,04$ %, le Fe montre une erreur inférieure à $\pm 0,03$ % et le Mn une erreur inférieure à $\pm 0,01$ %.

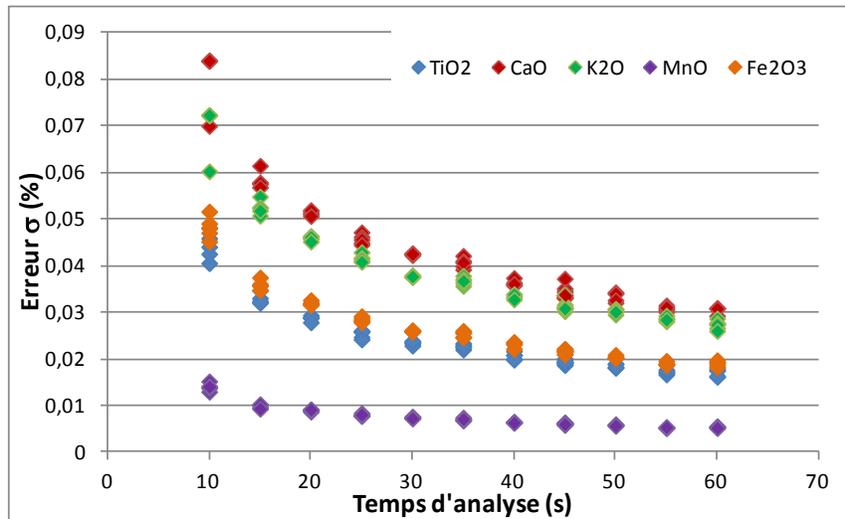


Figure 4-17 : Graphique de l'erreur respective des éléments chimiques Ti, Ca, K, Mn et Fe mesurés par le rayon d'intensité la moins élevée du mode "minerais plus" de la sonde portable XRF.

Le temps d'analyse est plus complexe à choisir pour le rayon d'intensité plus élevée compte des erreurs observées pour les éléments légers Al et Si (Figure 4-18). En effet, à 10 secondes d'analyse l'erreur pour l'Al est de $\pm 1,8$ % et pour le Si de $\pm 1,2$ %. Afin de faire diminuer ces erreurs, le temps d'analyse est augmenté. Pour les deux éléments en question, l'erreur se stabilise à partir de 50 secondes d'analyse et au-delà autour de $\pm 0,7$ % pour l'Al et de $\pm 0,5$ % pour le Si. Il paraît compliqué d'obtenir des analyses plus précises pour ces deux éléments avec la sonde portable XRF.

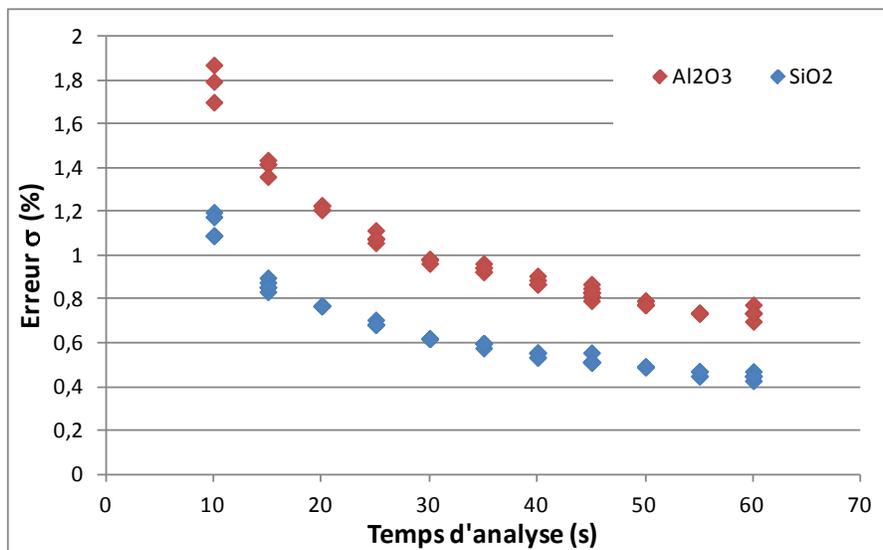


Figure 4-18 : Graphique de l'erreur respective des éléments chimiques Al et Si mesurés par le rayon d'intensité la plus élevée du mode "minerais plus" de la sonde portable XRF.

Compte tenu des erreurs obtenues en fonction du temps d'analyse, nous avons choisi 60 secondes d'analyses pour le rayon d'intensité la plus élevée et 30 secondes d'analyses pour le second rayon afin d'optimiser le temps total d'analyse à 90 secondes par échantillon.

Analyses XRF - Elements Majeurs

Nom	SiO ₂	σ _{Si}	Al ₂ O ₃	σ _{Al}	Fe ₂ O ₃	σ _{Fe}	TiO ₂	σ _{Ti}	CaO	σ _{Ca}	K ₂ O	σ _K	MnO	σ _{Mn}	P ₂ O ₅	σ _P
13 DU 02	39,889	0,428	9,693	0,680	4,578	0,028	0,532	0,025	24,246	0,029	7,045	0,029	0,168	0,008	0,000	0,000
13 DU 03	26,070	0,364	6,509	0,466	2,220	0,020	0,300	0,021	32,239	0,031	3,588	0,021	0,067	0,006	0,000	0,000
13 DU 06	48,788	0,499	11,702	0,699	6,547	0,033	0,488	0,024	14,240	0,023	5,280	0,028	0,187	0,009	0,000	0,074
13 DU 07	24,415	0,349	0,000	0,000	2,068	0,020	0,290	0,021	35,136	0,031	2,791	0,019	0,078	0,006	0,000	0,000
13 DU 09	40,217	0,414	15,689	0,680	5,925	0,029	0,511	0,023	19,391	0,024	8,205	0,029	0,267	0,009	0,000	0,034
13 DU 11	36,445	0,392	7,319	0,655	3,439	0,025	0,459	0,024	27,795	0,030	5,963	0,027	0,115	0,007	0,000	0,000
13 DU 13	31,068	0,406	6,947	0,718	3,854	0,028	0,431	0,025	24,570	0,031	6,045	0,030	0,118	0,008	0,000	0,000
13 DU 15	46,021	0,414	14,404	0,655	4,515	0,026	0,436	0,022	23,232	0,027	8,689	0,030	0,145	0,007	0,000	0,072
13 DU 17	48,845	0,471	15,784	0,718	6,861	0,033	0,628	0,026	16,947	0,025	8,467	0,032	0,309	0,011	0,000	0,000
13 DU 18	53,387	0,449	12,345	0,630	3,901	0,025	0,432	0,022	25,110	0,028	7,132	0,028	0,117	0,007	0,000	0,076
13 DU 19	56,361	0,456	12,206	0,630	3,818	0,024	0,417	0,022	23,488	0,027	6,508	0,028	0,119	0,007	0,000	0,000
13 DU 21	44,709	0,449	11,803	0,699	5,328	0,030	0,557	0,026	22,606	0,028	6,896	0,030	0,230	0,010	0,000	0,076
13 DU 22	48,118	0,449	15,847	0,699	4,866	0,029	0,523	0,025	28,238	0,030	6,554	0,028	0,204	0,009	0,000	0,000
13 DU 25	55,427	0,463	14,329	0,649	4,415	0,026	0,440	0,022	21,875	0,027	8,087	0,031	0,250	0,009	0,000	0,076
13 DU 26	57,466	0,492	16,823	0,668	4,541	0,027	0,523	0,024	21,000	0,027	7,376	0,030	0,229	0,009	0,000	0,000
13 DU 27	57,480	0,471	12,439	0,624	5,937	0,030	0,453	0,023	22,561	0,027	5,458	0,026	0,252	0,009	0,000	0,000
13 DU 28	55,042	0,471	14,902	0,661	5,636	0,029	0,490	0,023	23,276	0,027	7,719	0,030	0,281	0,010	0,000	0,000
13 DU 29	45,715	0,599	12,458	0,938	5,162	0,036	0,506	0,030	15,778	0,031	8,712	0,043	0,194	0,011	0,000	0,000
13 DU 30	59,848	0,478	13,856	0,624	5,380	0,028	0,465	0,022	18,870	0,025	7,131	0,029	0,209	0,009	0,000	0,000
13 DU 32	38,049	0,406	9,353	0,687	3,468	0,026	0,543	0,026	41,097	0,035	3,641	0,022	0,110	0,007	0,000	0,092
13 DU 33	50,685	0,456	16,514	0,687	6,189	0,031	0,631	0,025	22,393	0,027	7,131	0,029	0,415	0,012	0,000	0,000
13 DU 35	47,790	0,449	14,272	0,687	5,024	0,029	0,431	0,023	27,759	0,030	5,205	0,026	0,190	0,009	0,000	0,000
13 DU 37	48,510	0,449	16,105	0,680	5,030	0,029	0,431	0,023	28,564	0,030	6,663	0,028	0,279	0,010	0,000	0,000
13 DU 38	53,779	0,492	17,024	0,687	7,055	0,032	0,645	0,024	9,667	0,019	7,630	0,031	0,187	0,008	0,000	0,000
13 DU 41	58,864	0,492	14,738	0,661	6,750	0,033	0,462	0,023	24,052	0,028	5,276	0,027	0,205	0,009	0,000	0,000
13 DU 42	56,803	0,485	14,681	0,668	6,047	0,031	0,494	0,023	22,651	0,027	5,877	0,028	0,207	0,009	0,000	0,038
13 DU 43	57,117	0,499	16,256	0,687	7,140	0,034	0,479	0,023	17,305	0,025	6,282	0,029	0,533	0,013	0,000	0,000
13 DU 44	51,105	0,449	11,268	0,642	4,984	0,029	0,347	0,021	32,635	0,031	4,113	0,023	0,304	0,011	0,000	0,046
13 DU 47	65,552	0,513	19,922	0,661	7,258	0,032	0,633	0,025	11,526	0,021	10,110	0,035	0,293	0,010	0,000	0,000
13 DU 48	59,555	0,492	20,237	0,680	6,929	0,032	0,626	0,025	17,518	0,025	8,795	0,032	0,666	0,014	0,000	0,073
13 DU 52	45,180	0,428	11,306	0,655	4,713	0,028	0,353	0,021	30,778	0,030	3,644	0,022	0,370	0,011	0,000	0,046
13 DU 54	52,332	0,456	19,966	0,699	3,902	0,026	0,480	0,024	28,013	0,031	9,350	0,033	0,211	0,009	0,000	0,000
13 DU 57	32,580	0,385	10,890	0,737	3,568	0,026	0,326	0,022	42,303	0,035	4,911	0,024	0,878	0,018	0,000	0,000
13 DU 59	54,849	0,471	16,880	0,668	5,537	0,029	0,480	0,023	25,276	0,029	7,647	0,030	0,343	0,011	0,000	0,000
13 DU 64	54,685	0,471	13,951	0,655	5,227	0,029	0,464	0,024	26,676	0,029	5,424	0,026	0,266	0,010	0,000	0,000
13 DU 67	52,767	0,478	13,819	0,668	4,957	0,029	0,468	0,024	22,515	0,028	5,200	0,027	0,263	0,010	0,000	0,000
13 DU 68	53,886	0,471	16,256	0,661	6,227	0,031	0,518	0,023	20,579	0,026	6,181	0,027	0,619	0,014	0,000	0,038
13 DU 71	45,907	0,463	12,212	0,705	4,404	0,027	0,447	0,023	26,139	0,029	5,229	0,026	0,220	0,009	0,000	0,000
13 DU 74	56,496	0,471	11,129	0,630	5,069	0,029	0,500	0,024	28,254	0,030	4,121	0,024	0,178	0,009	0,000	0,000
13 DU 77	45,786	0,435	11,501	0,668	4,380	0,027	0,399	0,023	31,879	0,031	4,362	0,024	0,145	0,008	0,000	0,000
13 DU 79	50,521	0,449	11,123	0,642	4,684	0,028	0,393	0,022	33,283	0,031	3,860	0,022	0,142	0,008	0,000	0,000
13 DU 80	44,424	0,428	8,125	0,642	3,368	0,025	0,303	0,021	38,923	0,033	2,364	0,019	0,109	0,007	0,000	0,000
13 DU 82	50,314	0,449	11,841	0,655	4,621	0,028	0,408	0,022	32,563	0,031	3,955	0,023	0,243	0,010	0,000	0,000
13 DU 84	42,292	0,428	9,177	0,680	3,168	0,023	0,291	0,020	36,485	0,033	3,279	0,021	0,042	0,005	0,000	0,000
13 DU 86	46,085	0,435	12,131	0,661	4,519	0,027	0,429	0,023	29,613	0,030	4,768	0,024	0,218	0,009	0,000	0,000
13 DU 88	54,172	0,499	11,104	0,661	3,904	0,026	0,464	0,024	22,222	0,028	3,909	0,024	0,076	0,006	0,000	0,000
13 DU 89	39,176	0,449	9,718	0,724	3,604	0,026	0,355	0,022	28,587	0,031	4,131	0,024	0,098	0,007	0,000	0,000
13 DU 92	34,063	0,449	10,537	0,800	4,398	0,029	0,481	0,026	27,175	0,032	5,016	0,027	0,170	0,009	0,000	0,000
13 DU 95	43,034	0,428	8,944	0,668	3,888	0,027	0,325	0,022	39,666	0,034	3,044	0,021	0,133	0,008	0,000	0,000
13 DU 97	50,763	0,449	7,722	0,624	2,231	0,020	0,379	0,022	37,218	0,033	2,573	0,020	0,048	0,005	0,000	0,000
13 DU 99	45,287	0,449	13,945	0,712	4,618	0,028	0,489	0,024	27,048	0,030	6,347	0,028	0,200	0,009	0,000	0,000
13 DU 101	47,526	0,449	11,381	0,680	3,908	0,026	0,399	0,023	33,120	0,032	4,045	0,023	0,121	0,007	0,000	0,000
13 DU 103	45,907	0,428	7,533	0,642	3,542	0,026	0,384	0,023	40,038	0,034	2,254	0,019	0,083	0,007	0,000	0,000

Nom	SiO ₂	σ_{Si}	Al ₂ O ₃	σ_{Al}	Fe ₂ O ₃	σ_{Fe}	TiO ₂	σ_{Ti}	CaO	σ_{Ca}	K ₂ O	σ_K	MnO	σ_{Mn}	P ₂ O ₅	σ_P
13 DU 105	36,031	0,406	6,292	0,674	2,394	0,021	0,298	0,021	39,089	0,034	2,542	0,019	0,073	0,006	0,000	0,000
13 DU 107	39,468	0,449	12,420	0,743	4,209	0,028	0,383	0,023	27,936	0,031	5,434	0,027	0,147	0,008	0,000	0,000
13 DU 109	42,420	0,428	9,977	0,687	2,946	0,023	0,358	0,022	36,569	0,033	3,944	0,023	0,066	0,006	0,000	0,000
13 DU 110	31,953	0,421	7,961	0,743	2,866	0,023	0,370	0,023	31,111	0,032	3,048	0,022	0,062	0,006	0,000	0,000
13 DU 111	32,644	0,428	6,267	0,750	2,220	0,022	0,298	0,022	39,108	0,036	2,159	0,020	0,052	0,006	0,000	0,000
13 DU 113	45,501	0,428	6,853	0,636	2,791	0,022	0,383	0,022	37,148	0,032	2,923	0,020	0,054	0,006	0,000	0,046
13 LAY 01	59,762	0,570	18,020	0,768	6,360	0,033	0,562	0,025	8,088	0,020	8,899	0,038	0,414	0,012	0,000	0,000
13 LAY 02	17,270	0,200	6,097	0,365	4,708	0,021	0,365	0,016	4,928	0,012	4,356	0,023	0,151	0,006	0,000	0,000
13 LAY 03	48,546	0,471	14,921	0,674	6,327	0,030	0,529	0,023	9,590	0,019	7,109	0,031	0,126	0,007	0,091	0,030
13 LAY 04	53,416	0,513	17,119	0,699	7,246	0,032	0,694	0,025	7,147	0,016	7,396	0,031	0,138	0,007	0,000	0,000
13 LAY 05	61,516	0,492	16,269	0,642	6,097	0,028	0,553	0,022	7,610	0,016	7,860	0,031	0,213	0,008	0,104	0,029
14 LAY 01	75,999	0,549	19,090	0,624	7,492	0,030	0,638	0,023	0,300	0,006	8,859	0,034	0,169	0,007	0,250	0,058
14 LAY 02	87,907	0,535	5,322	0,447	0,789	0,010	0,118	0,014	9,002	0,017	3,761	0,024	0,075	0,005		0,000
14 LAY 03	61,359	0,492	15,620	0,598	6,704	0,027	0,670	0,022	1,780	0,008	5,849	0,027	0,297	0,009	0,462	0,064
14 LAY 04	85,668	0,535	6,361	0,453	1,069	0,012	0,186	0,015	5,521	0,014	3,324	0,023	0,082	0,005		0,028
14 LAY 05	63,976	0,492	16,760	0,605	5,146	0,024	0,745	0,023	1,227	0,008	8,315	0,032	0,106	0,006	0,292	0,060
14 LAY 06	79,714	0,535	13,044	0,561	3,671	0,021	0,597	0,022	0,145	0,005	9,056	0,035	0,097	0,006		0,019
14 LAY 07	73,460	0,513	17,043	0,598	4,625	0,023	0,457	0,020	0,241	0,006	10,173	0,035	0,085	0,005		0,018
14 LAY 08	63,755	0,506	13,252	0,561	5,758	0,043	0,589	0,022	5,257	0,034	5,075	0,039	0,241	0,008	0,475	0,062
14 LAY 09	65,952	0,492	23,077	0,605	7,448	0,051	0,986	0,028	0,122	0,005	13,965	0,084	0,066	0,006	0,130	0,038
14 PO 01	53,273	0,492	17,598	0,687	7,686	0,032	0,656	0,024	4,776	0,014	7,778	0,032	0,155	0,007	0,000	0,000
14 PO 02	53,459	0,499	16,665	0,705	6,434	0,031	0,531	0,023	10,460	0,020	7,449	0,032	0,213	0,009	0,000	0,034
14 PO 03	48,267	0,442	15,135	0,636	6,014	0,028	0,522	0,022	11,212	0,019	7,084	0,029	0,190	0,008	0,000	0,059
14 PO 04	53,480	0,492	16,206	0,693	6,803	0,031	0,583	0,023	7,391	0,017	7,627	0,032	0,126	0,007	0,000	0,000
14 PO 05	52,574	0,485	16,067	0,680	6,332	0,030	0,593	0,023	10,170	0,019	7,197	0,030	0,152	0,007	0,000	0,000
14 PO 06	56,625	0,492	16,552	0,642	6,553	0,029	0,577	0,022	5,135	0,014	7,469	0,031	0,194	0,008	0,000	0,000
14 SN 01	65,638	0,513	20,621	0,592	8,246	0,058	0,964	0,028	2,528	0,017	8,673	0,060	0,221	0,008	0,227	0,049
14 SN 02	62,101	0,492	23,902	0,586	9,006	0,062	0,905	0,026	0,572	0,006	7,497	0,053	0,159	0,007	0,151	0,038
13 SE 01	32,316	0,599	9,057	0,989	5,390	0,034	0,557	0,028	1,510	0,011	4,755	0,036	0,211	0,010	0,461	0,097
13 SE 02	55,284	0,485	12,628	0,592	4,835	0,023	0,683	0,022	1,096	0,007	5,429	0,026	0,101	0,006	0,316	0,058
13 SE 03	59,384	0,492	15,456	0,605	4,138	0,022	0,510	0,020	1,017	0,007	6,794	0,029	0,122	0,006	0,392	0,060
13 SE 04	44,510	0,613	9,939	0,875	4,225	0,030	0,595	0,029	1,235	0,010	6,542	0,039	0,139	0,009	0,283	0,087
13 SE 05	57,088	0,513	15,450	0,655	5,175	0,026	0,804	0,025	0,600	0,006	8,014	0,033	0,095	0,006	0,279	0,059
13 SE 06	35,268	0,563	7,854	0,510	4,707	0,030	0,517	0,026	0,831	0,008	4,912	0,034	0,093	0,007	0,404	0,084
13 SE 07	63,078	0,499	12,880	0,592	2,432	0,017	0,676	0,023	0,844	0,007	7,461	0,031	0,046	0,004	0,000	0,019
13 SE 08	53,102	0,649	15,173	0,863	7,712	0,033	0,702	0,025	0,817	0,009	6,870	0,039	0,019	0,005	0,000	0,000
13 SE 09	59,349	0,528	13,648	0,687	5,666	0,030	0,750	0,028	12,401	0,022	6,544	0,031	0,160	0,008	0,000	0,000
13 SE 10	61,588	0,492	7,501	0,561	4,714	0,025	0,763	0,025	10,499	0,019	4,118	0,024	0,090	0,006	0,000	0,000
13 SE 11	60,354	0,506	5,473	0,542	2,785	0,020	0,654	0,025	12,222	0,020	2,386	0,020	0,070	0,005	0,000	0,000
13 SE 12	77,361	0,578	6,922	0,573	2,218	0,020	0,762	0,029	11,322	0,022	3,685	0,027	0,053	0,006	0,000	0,000
13 SE 13	39,632	0,449	8,547	0,712	3,753	0,026	0,526	0,026	27,406	0,030	2,854	0,022	0,114	0,008	0,000	0,000
13 SE 14	61,131	0,521	17,894	0,674	6,605	0,031	0,736	0,026	8,684	0,018	7,686	0,032	0,038	0,005	0,000	0,000
13 SE 15	62,764	0,471	5,580	0,542	1,954	0,017	0,543	0,024	23,036	0,026	2,637	0,020	0,025	0,004	0,000	0,000
14 SE 16	64,369	0,492	8,433	0,567	3,224	0,029	0,381	0,021	17,196	0,103	4,455	0,036	0,065	0,006	0,320	0,060
14 SE 17	32,787	0,342	5,423	0,466	2,778	0,025	0,295	0,017	11,472	0,069	3,580	0,030	0,052	0,005		
14 SE 18	30,783	0,321	6,380	0,491	3,437	0,029	0,290	0,018	14,682	0,084	4,516	0,036	0,051	0,005	0,208	0,018
14 SE 19	59,534	0,485	10,978	0,586	4,642	0,038	0,462	0,023	18,371	0,112	5,122	0,040	0,114	0,007	0,590	0,091
14 SE 20	48,196	0,492	8,679	0,642	3,278	0,032	0,273	0,019	19,132	0,135	2,540	0,027	0,132	0,007	0,629	0,097
14 ANT 01	52,368	0,471	16,187	0,661	6,287	0,028	0,602	0,023	5,522	0,015	8,013	0,032	0,108	0,006	0,000	0,000
14 ANT 02	50,193	0,435	13,038	0,592	4,854	0,025	0,479	0,021	7,405	0,016	6,789	0,030	0,083	0,006	0,000	0,000
14 ANT 03	77,346	0,456	4,547	0,378	0,633	0,008	0,109	0,012	2,442	0,009	3,283	0,022	0,022	0,003	0,000	0,000
14 ANT 04	76,655	0,492	8,150	0,479	1,233	0,012	0,232	0,016	4,892	0,013	5,006	0,027	0,050	0,004	0,000	0,000
14 ANT 05	66,258	0,471	11,135	0,535	3,206	0,020	0,552	0,022	10,275	0,019	6,300	0,029	0,067	0,005	0,094	0,029
14 ANT 06	41,722	0,406	9,328	0,598	3,695	0,023	0,413	0,021	19,311	0,025	4,787	0,025	0,070	0,006	0,000	0,000
14 ANT 07	49,679	0,492	14,732	0,693	5,920	0,029	0,543	0,023	9,465	0,019	6,714	0,031	0,113	0,007	0,000	0,000
14 ANT 08	49,073	0,471	13,365	0,680	6,316	0,029	0,538	0,022	9,531	0,018	6,125	0,029	0,138	0,007	0,000	0,000

Nom	SiO ₂	σ _{Si}	Al ₂ O ₃	σ _{Al}	Fe ₂ O ₃	σ _{Fe}	TiO ₂	σ _{Ti}	CaO	σ _{Ca}	K ₂ O	σ _K	MnO	σ _{Mn}	P ₂ O ₅	σ _P
14 ANT 09	40,196	0,399	12,093	0,598	5,842	0,028	0,534	0,022	11,127	0,020	6,371	0,029	0,147	0,007	0,000	0,000
14 CH 01	65,331	0,492	20,413	0,554	6,745	0,047	0,883	0,025	0,693	0,007	8,128	0,055	0,174	0,007	2,000	0,040
14 CH 02	74,701	0,492	19,437	0,535	3,715	0,029	0,435	0,020	0,245	0,005	10,167	0,060	0,250	0,008	5,000	0,000
14 CH 03	67,256	0,471	18,738	0,567	4,719	0,035	0,653	0,023	0,225	0,005	14,130	0,084	0,164	0,007	8,000	0,039
14 CH 04	68,134	0,478	18,813	0,567	5,472	0,039	0,708	0,024	0,146	0,005	13,801	0,084	0,118	0,006	11,000	0,038
14 MSM 01	51,526	0,449	5,076	0,605	1,122	0,014	0,250	0,019	31,695	0,031	2,483	0,020	0,044	0,005	0,000	0,000
14 MSM 02	48,103	0,428	3,496	0,409	1,367	0,015	0,313	0,020	32,590	0,031	2,468	0,019	0,055	0,005	0,000	0,000
14 MSM 03	41,165	0,406	8,572	0,624	3,280	0,023	0,424	0,022	22,359	0,027	4,444	0,025	0,064	0,006	0,000	0,000
14 MSM 02	48,103	0,428	3,496	0,409	1,367	0,015	0,313	0,020	32,590	0,031	2,468	0,019	0,055	0,005	0,000	0,000
14 MSM 03	41,165	0,406	8,572	0,624	3,280	0,023	0,424	0,022	22,359	0,027	4,444	0,025	0,064	0,006	0,000	0,000
14 MSM 04	50,628	0,428	7,237	0,561	1,902	0,021	0,287	0,019	23,063	0,140	3,818	0,032	0,064	0,006	8,000	0,029
14 MSM 05	58,735	0,478	5,738	0,605	1,420	0,018	0,300	0,020	25,937	0,154	3,337	0,030	0,053	0,005	11,000	0,035
14 RANCE 01	45,665	0,406	8,452	0,498	3,532	0,029	0,376	0,019	8,948	0,054	5,309	0,040	0,048	0,005	2,000	0,037
14R ANCE 02	40,467	0,385	10,487	0,529	5,152	0,039	0,417	0,019	9,153	0,057	6,023	0,044	0,056	0,005	5,000	0,037
14 SOMME	47,633	0,385			2,085	0,021	0,250	0,018	24,015	0,126	2,842	0,025	0,040	0,005	0,304	0,055
14 ARC 01	54,157	0,463	9,901	0,561	5,012	0,024	0,459	0,020	0,523	0,006	4,797	0,027	0,048	0,005	0,000	0,000
14 ARC 02		76,640	0,513	8,257	0,491	2,143	0,016	0,359	0,018	0,416	0,005	4,337	0,026	0,024	0,004	0,000
14 ARC 03	45,722	0,421	10,216	0,535	4,694	0,023	0,416	0,018	0,651	0,006	4,119	0,024	0,028	0,004	0,239	0,049
14 GA 01	62,821	0,513	21,559	0,680	9,140	0,033	0,926	0,026	0,692	0,007	9,171	0,034	0,154	0,007	0,509	0,063
14 GA 02	58,857	0,492	20,967	0,661	8,138	0,031	0,976	0,026	0,939	0,007	8,924	0,033	0,145	0,007	0,403	0,061
14 GA 03	51,491	0,492	16,709	0,661	9,459	0,034	1,422	0,030	1,850	0,009	4,476	0,025	0,168	0,007	0,671	0,070
14 GA 04	55,748	0,492	20,785	0,668	7,044	0,029	0,965	0,026	0,808	0,007	9,353	0,033	0,107	0,006	0,512	0,062
14 GA 05	46,292	0,471	17,283	0,661	7,981	0,030	0,677	0,022	1,697	0,008	5,269	0,026	0,224	0,008	0,517	0,064
14 GA 06	55,890	0,492	20,054	0,661	7,265	0,029	0,918	0,026	0,593	0,006	7,411	0,031	0,130	0,007	0,376	0,059
14 GA 07	55,769	0,513	17,931	0,661	6,365	0,028	0,691	0,024	0,962	0,007	6,701	0,030	0,146	0,007	0,599	0,066
14 GA 08	60,932	0,471	22,202	0,586	4,392	0,034	0,655	0,023	0,202	0,005	12,929	0,084	0,120	0,006		0,000
14 GA 09	66,287	0,492	14,826	0,529	3,680	0,029	0,432	0,019	0,293	0,005	8,691	0,059	0,078	0,005		0,000
14 G A10	64,590	0,513	13,371	0,586	3,085	0,028	0,476	0,022	0,697	0,007	11,054	0,076	0,096	0,006		0,000
14 GA 11	62,957	0,549	22,674	0,680	9,651	0,072	0,902	0,030	1,792	0,015	11,536	0,088	0,219	0,010	0,321	0,054
14 GA 12	76,377	0,492	16,640	0,516	2,467	0,021	0,579	0,022	0,276	0,005	10,845	0,064	0,036	0,004		0,000
14 GA 13	64,369	0,513	23,052	0,586	3,774	0,031	0,546	0,022	0,345	0,005	8,298	0,059	0,086	0,006		0,000
14 GA 14	67,934	0,513	19,903	0,554	11,809	0,076	1,013	0,027	0,750	0,007	5,752	0,043	0,388	0,010	0,833	0,049
14 GA 15	68,775	0,513	19,134	0,548	12,314	0,081	0,984	0,026	0,547	0,006	5,921	0,043	0,391	0,010	0,890	0,049
14 GA 16	67,121	0,513	13,586	0,548	4,915	0,037	0,869	0,025	0,972	0,008	7,673	0,054	0,139	0,007	0,222	0,042
14 GA 17a	56,867	0,556	15,053	0,661	6,800	0,057	1,130	0,032	1,509	0,013	6,484	0,055	0,153	0,008	0,330	0,052
14 GA 17b	68,183	0,513	21,849	0,586	10,282	0,068	1,034	0,027	0,741	0,007	8,543	0,058	0,241	0,009	0,567	0,047
14 GA 18a	67,470	0,513	20,117	0,567	9,221	0,062	1,084	0,028	1,076	0,009	7,643	0,053	0,195	0,008	0,520	0,047
14 GA 18b	59,562	0,492	19,260	0,567	10,452	0,070	0,920	0,025	0,683	0,006	5,598	0,042	0,267	0,008	0,668	0,045
14 GA 19	72,284	0,535	19,317	0,561	10,961	0,071	0,958	0,026	0,663	0,006	5,533	0,042	0,285	0,009	0,879	0,051
14 GA 20a	46,799	0,449	13,460	0,529	7,893	0,056	0,695	0,020	0,475	0,005	3,381	0,029	0,285	0,008	0,490	0,038
14 GA 20b	62,301	0,492	23,732	0,586	9,311	0,063	1,425	0,031	0,477	0,006	9,091	0,060	0,262	0,009	0,609	0,045
14 GA 20c	58,607	0,471	25,111	0,592	10,701	0,071	1,601	0,033	0,334	0,005	9,693	0,060	0,151	0,007	0,572	0,043
14 GA 20d	58,500	0,492	27,209	0,605	11,195	0,071	1,629	0,033	0,367	0,005	9,255	0,060	0,142	0,007	0,527	0,044
14 GA 20e	56,853	0,492	26,661	0,617	10,775	0,071	1,584	0,033	0,306	0,005	9,026	0,060	0,153	0,007	0,495	0,043
14 GA 20f	56,953	0,492	26,302	0,624	11,338	0,076	1,677	0,034	0,381	0,005	8,882	0,060	0,173	0,008	0,484	0,044
14 GA 21	57,031	0,499	21,018	0,592	7,909	0,057	1,248	0,030	1,574	0,012	6,247	0,048	0,152	0,007	0,493	0,048
14 GA 22	67,920	0,513	20,904	0,567	9,993	0,068	1,129	0,028	0,979	0,008	6,340	0,047	0,215	0,008	0,747	0,050
14 GA 23	52,574	0,456	17,572	0,554	2,159	0,020	0,410	0,018	0,313	0,004	6,359	0,046	0,044	0,004		0,022
14 GA 24	62,828	0,492	20,237	0,573	4,040	0,032	0,545	0,021	0,906	0,008	10,629	0,072	0,112	0,006	0,162	0,040
14 GA 25	63,955	0,492	15,916	0,554	2,382	0,022	0,260	0,017	2,056	0,015	7,856	0,055	0,182	0,007		0,000
14 GA 26	61,816	0,471	23,392	0,586	6,208	0,044	0,663	0,023	0,167	0,005	12,508	0,084	0,123	0,006		0,000
14 GA 27	63,477	0,492	29,482	0,567	8,435	0,057	0,539	0,020	0,061	0,003	4,991	0,038	0,448	0,010	0,195	0,034
14 GA 28	58,949	0,492	25,067	0,605	9,305	0,065	0,826	0,025	0,791	0,007	8,025	0,057	0,232	0,008	0,169	0,039
14 GA 29	91,372	0,513	13,119	0,453	4,117	0,030	0,892	0,025		0,000	4,891	0,036	0,077	0,005		0,011
14 GA 30	57,987	0,499	12,735	0,529	5,145	0,040	0,882	0,025	0,061	0,003	5,163	0,041	0,096	0,006		0,021
14 GA 31	72,918	0,492	21,024	0,548	2,439	0,022	0,276	0,017	0,315	0,005	11,520	0,072	0,058	0,005	0,236	0,040

Nom	SiO ₂	σ _{Si}	Al ₂ O ₃	σ _{Al}	Fe ₂ O ₃	σ _{Fe}	TiO ₂	σ _{Ti}	CaO	σ _{Ca}	K ₂ O	σ _K	MnO	σ _{Mn}	P ₂ O ₅	σ _P
14 GA 32	61,787	0,492	25,149	0,567	5,636	0,041	0,678	0,023	0,328	0,005	8,179	0,056	0,056	0,005	0,499	0,042
14 GA 33	56,168	0,685	24,645	0,907	5,154	0,047	0,660	0,022	0,321	0,007	8,318	0,082	0,076	0,005	0,336	0,061
14 GA 34	61,110	0,499	25,874	0,624	10,428	0,071	1,157	0,031	2,829	0,020	10,504	0,072	0,198	0,008	0,423	0,054
14 GA 35	61,880	0,471	22,951	0,567	4,894	0,036	0,733	0,023	0,277	0,005	10,436	0,072	0,159	0,007	0,254	0,038
14 GA 36	67,863	0,485	17,799	0,567	3,156	0,026	0,458	0,021	0,550	0,007	15,037	0,096	0,108	0,006		0,013

Comparaison des deux méthodes

Des corrections pour les teneurs en éléments chimiques

Après avoir contrôlé et optimisé la précision de l'analyse en éléments majeurs par la sonde portable XRF en fonction de la durée d'analyse, un contrôle de la justesse de ces analyses est nécessaire. Pour réaliser ce contrôle, une série d'échantillon de mélanges industriels a été analysée à l'aide de la sonde XRF et par ICP-AES pour l'ensemble des éléments en question et en plus par calcimétrie Bernard pour le Ca.

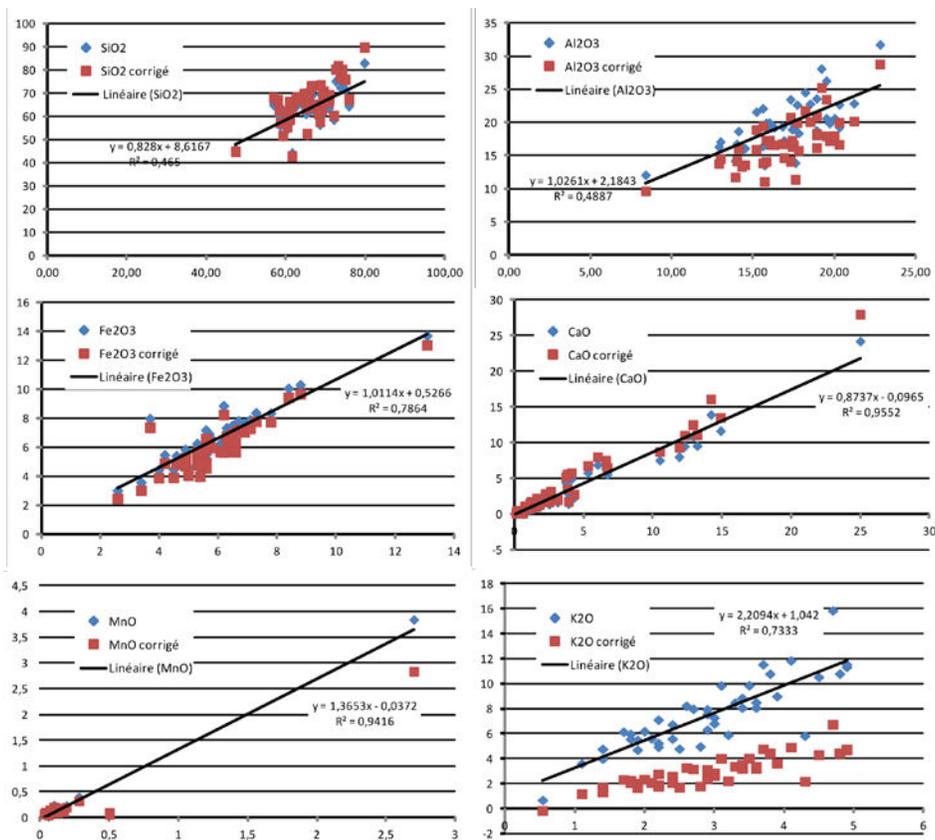
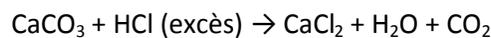


Figure 4-19 : Graphiques de comparaison des teneurs (%) en SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MnO et K₂O par analyses XRF en fonction des teneurs (%) des mêmes éléments par analyses ICP-AES (carrés bleus). Comparaison analyses XRF et ICP-AES pour l'ensemble des mêmes éléments avec la correction établie sur les données obtenues par XRF (carrés rouge)

La comparaison des résultats d'analyses chimiques avec les deux méthodes montre une assez bonne corrélation pour le Fe et l'Al qui ne sont que légèrement surévalués par l'analyse XRF. Ils pourraient nécessiter d'une faible correction établie à partir des régressions linéaires présentée dans la Figure 4-19. L'élément Mn est un peu plus surévalué mais la plupart des données sont relativement proches de l'erreur des deux types d'analyses. On peut donc se poser la question de la significativité d'une correction sur ces éléments. Les éléments Si et Ca sont légèrement sous-évalués avec l'analyse XRF et nécessite donc aussi une légère correction respectivement de 0,8 et de 0,9. Enfin, l'élément K est largement surévalué comme montré aussi par T. Gillot (2014). Une correction de 2,2 est nécessaire pour obtenir une valeur plus juste. Ces corrections apportent de manière générale des valeurs de teneurs en éléments chimiques plus justes mais moins précises puisque l'on induit des erreurs de calculs en plus. De plus, l'erreur de l'ICP AES peut être aussi variable et il peut être intéressant de vérifier la justesse de ces teneurs avec d'autres méthodes plus précises comme la calcimétrie Bernard pour le Ca.

L'analyse de la teneur en Ca par calcimétrie Bernard est une méthode très précise basée sur la mesure du volume de CO₂ dégagé lors de la réaction du CaCO₃ continue dans l'échantillon avec un excès de HCl. On obtient ainsi par calcul une teneur en CaCO₃.



Afin de comparer les teneurs Ca obtenues par XRF, ICP-AES et Calcimétrie Bernard, il est nécessaire de calculer la teneur en CaO relative à la teneur en CaCO₃ obtenue par calcimétrie. Etant donné les masses atomiques respectives du C, O et Ca, 12,051 g/mol, 15,999 g/mol et 40,078 g/mol, on obtient un coefficient de conversion de la teneur en CaCO₃ vers la teneur en CaO de 0,5601.

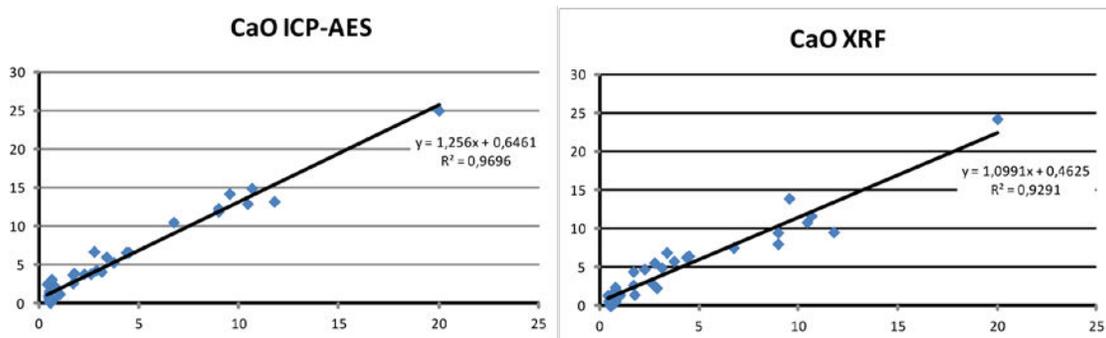


Figure 4-20 : Graphique de des teneurs (%) en CaO obtenue par 3 méthodes analytiques différentes (XRF portable - ICP-AES - Calcimétrie). A) $\text{CaO}_{(\text{ICP-AES})} = f(\text{CaO}_{(\text{Calci})})$; B) $\text{CaO}_{(\text{XRF})} = f(\text{CaO}_{(\text{Calci})})$.

La comparaison des teneurs en CaO des mélanges industriels des tuiles et briques (Figure 4-20) obtenues par ICP-AES, XRF et par calcimétrie Bernard montre que les analyses par ICP-AES et XRF surestiment un peu les teneurs en CaO avec une corrélation qui est tout à fait acceptable ($R^2=0,9696$ pour la corrélation ICP-AES Calcimétrie et $R^2=0,9291$ pour la corrélation XRF Calcimétrie). On pourrait donc appliquer une correction supplémentaire pour obtenir des teneurs en Ca plus précises encore que les teneurs obtenues par ICP-AES.

En conclusion, l'analyse par sonde portable XRF est moins précise que l'analyse ICP-AES et induit en particulier une surestimation de la teneur en K. Compte tenu des erreurs obtenues pour les autres

éléments mesurés et de la précision souhaitée pour une première caractérisation, il n'est sans doute pas nécessaire de corriger l'ensemble des résultats obtenues par la sonde portable XRF car il s'agit souvent d'une variation de l'ordre de grandeur de l'erreur analytique sauf pour la teneur en K dont la surestimation est flagrante de l'ordre de 2 fois. Les teneurs en Ca contrôlées aussi par Calcimétrie Bernard sont relativement justes et les variations sont de l'ordre de grandeur de l'erreur analytique. La caractérisation de la composition chimique par la sonde portable XRF est donc tout à fait suffisante pour une première évaluation rapide et efficace. Cependant, il est nécessaire de contrôler qu'il n'existe pas d'effets de matrices qui pourraient fausser complètement les résultats avec des sédiments qui font l'objet de cette thèse.

Les limites sur des échantillons naturels

La comparaison des teneurs en éléments chimiques mesurées par sonde portable XRF et ICP AES montre des résultats satisfaisant pour les mélanges de production qui sont des échantillons que l'on peut considérer comme relativement "propre". La corrélation des teneurs en SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O et MnO mesurées par XRF sur les sédiments avec celles mesurées par ICP-AES est moins bonne qu'avec les mélanges industriels (Figure 4-21). Les sédiments que l'on souhaite caractériser afin d'évaluer leur potentiel à substituer tout ou partie de la matière première de l'industrie des tuiles et briques peuvent contenir en grande quantité parfois des éléments chimiques non mesurés qui peuvent conduire à une mauvaise évaluation des teneurs, c'est ce que l'on appelle des "effets matrices". On peut remarquer ces effets matrices en s'intéressant notamment au "bouclage" de l'analyse. Le bouclage de l'analyse par sonde portable XRF n'ai souvent pas très précis à plus ou moins 10 % pour les analyses de bonne qualité. Lorsqu'il y a des effets matrices l'analyse ne boucle pas.

Les R^2 pour les sédiments sont relativement proches de ceux observés pour les mélanges industriels pour le Si et l'Al. Les écarts de R^2 sont un peu plus importants pour le Fe, le Ca, le K et le Mn. Afin de vérifier les effets de matrice des sédiments contenant notamment pour certains une teneur en sodium Na assez élevée et non mesurée par la sonde portable, nous avons replacé les coeff de régression linéaire correspondant au coefficient de corrélation entre l'analyse XRF et l'analyse ICP-AES pour les éléments Si, Al, Fe, Ca, K et Mn ainsi que leur R^2 dans le tableau 1. Dans ce tableau, les données des mélanges industriels sont comparées à celles des sédiments, puis à celles des sédiments dont les analyses bouclent à +/- 10 %, puis +/- 15 %, celles des sédiments contenant moins de 2 % d'halite et enfin celles des sédiments ne contenant pas d'halite.

L'analyse des données du Tableau 18 fait ressortir un effet matrice très significatif pour les sédiments, en effet, les meilleurs R^2 des sédiments sont trouvés pour les échantillons dont les analyses bouclent à +/- 10 %. Tout comme pour les mélanges industriels, les coefficients de corrélation sont proches de 1 pour la plupart des éléments et sont de l'ordre de grandeur de l'erreur analytique. Une correction ne paraît donc pas nécessaire pour la précision des résultats souhaités pour une première caractérisation. Seule la teneur en K montre un coefficient de corrélation significativement différent de 2,2 comme pour les mélanges industriels.

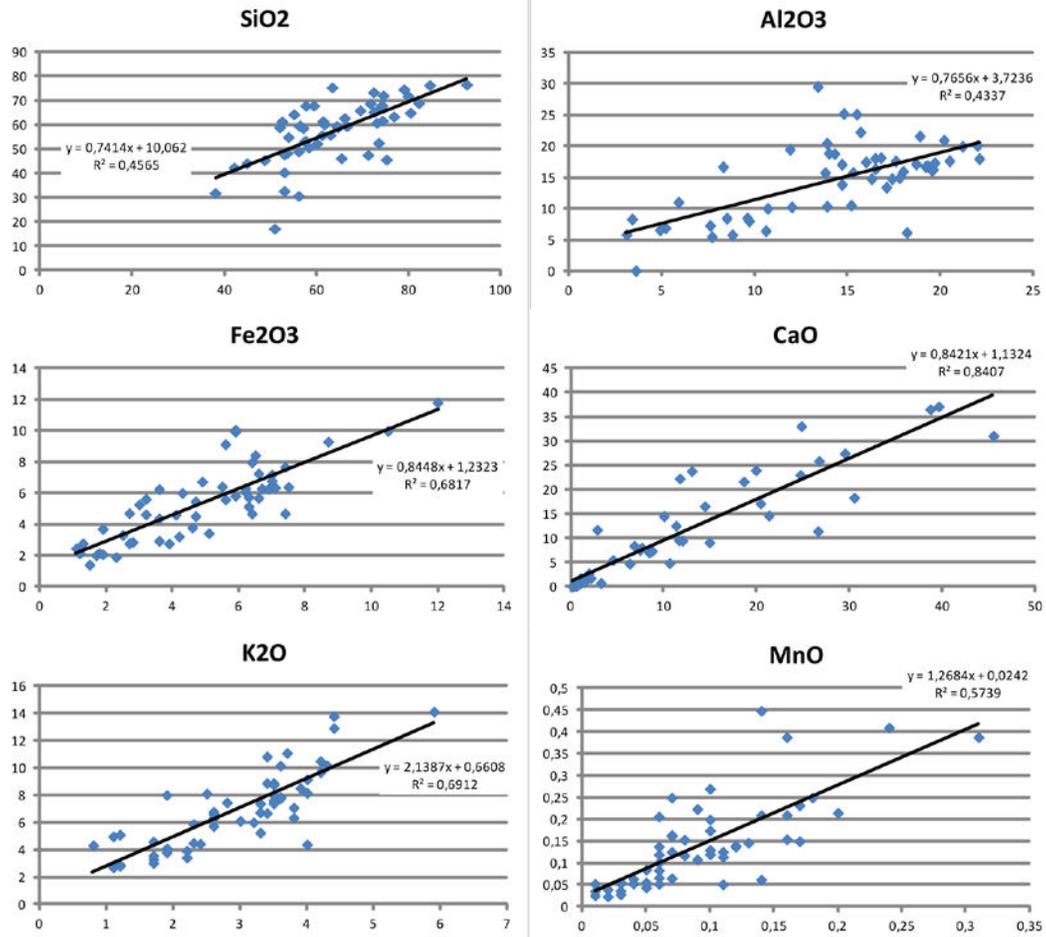


Figure 4-21 : Graphiques de comparaison des teneurs (%) en SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MnO et K₂O par analyses XRF en fonction des teneurs (%) des mêmes éléments par analyses ICP-AES sur des échantillons naturels.

Tableau 18 : Coefficient de régression obtenue par comparaison des teneurs (%) obtenues par ICP-AES et par XFR portable.

		Sédiments					
		Mélanges industriels	Tous	+/- 10 % du bouclage	+/- 15 % du bouclage	Echantillons avec teneur en halite < 2 %	échantillons sans halite
SiO ₂	Coeff de Régression linéaire	0,828	0,7414	0,6158	0,6233	0,6698	0,6929
	R ²	0,465	0,4565	0,6998	0,6306	0,4888	0,5459
Al ₂ O ₃	Coeff de Régression linéaire	1,0261	0,7656	0,7436	0,698	0,7695	0,7014
	R ²	0,4887	0,4337	0,4351	0,4272	0,4633	0,4203
Fe ₂ O ₃	Coeff de Régression linéaire	1,0114	0,8446	0,8509	0,8444	0,8588	0,867
	R ²	0,7864	0,6817	0,7647	0,7242	0,7155	0,734
CaO	Coeff de Régression linéaire	0,8737	0,8421	0,9413	0,9416	0,8739	0,8602
	R ²	0,9552	0,8407	0,882	0,888	0,8691	0,8547
K ₂ O	Coeff de Régression linéaire	2,2094	2,1387	2,1992	2,2066	2,1989	2,1877
	R ²	0,7333	0,6912	0,7769	0,7617	0,7392	0,7386
MnO	Coeff de Régression linéaire	1,3653	1,2684	1,3356	1,3174	1,2922	1,2563
	R ²	0,9416	0,5739	0,6411	0,6343	0,5879	0,5626

Analyses Carbone Total et Organique

La teneur du Carbone Organique Total (COT) est mesurée par un analyseur automatisé. Cette méthode consiste à effectuer une combustion à 940 °C d'un échantillon séché à 105 °C et broyé. Les gaz émis (N₂, CO₂, H₂O) sont séparés par chromatographie et enfin les composés carbonés sont détectés et quantifiés grâce à des étalons de concentrations connues. L'estimation de la quantité de matières organiques permet d'évaluer la porosité du matériau.

n° échantillon	Carbone Total exprimé en C en %	2σ	Carbone Organique exprimé en C en %	2σ	Carbone des Carbonates exprimé en C en %	2σ
140922-1	5,52	0,24	2,77	0,19	2,75	0,31
140923-1	2,76	0,07	<0,01 (LQ)		au plus égale au CT	
140923-2	2,42	0,06	<0,01 (LQ)		au plus égale au CT	
140923-3	2,38	0,05	<0,01 (LQ)		au plus égale au CT	
140943-1	<0,04 (LQ)		<0,01 (LQ)		au plus égale au CT	
140943-2	0,11	0,04	0,12	0,04	<0,1 (LQ)	
140943-3	0,07	0,04	0,1	0,04	<0,1 (LQ)	
141004-1	0,98	0,02	0,14	0,01	0,84	0,03
141004-2	0,83	0,02	0,13	0,02	0,7	0,03
141004-3	<0,04 (LQ)		<0,01 (LQ)		au plus égale au CT	
150054-1	1,86	0,05	1,35	0,04	0,51	0,06
150054-2	0,26	0,03	0,23	0,03	<0,1 (LQ)	
150054-3	0,09	0,02	0,1	0,02	<0,1 (LQ)	
150054-4	0,4	0,02	0,36	0,03	<0,1 (LQ)	
150054-5	0,06	0,02	<0,1		au plus égale au CT	
150054-6	0,27	0,02	0,27	0,02	<0,1 (LQ)	
150054-7	0,8	0,02	0,2	0,02	0,6	0,03
140943-2	0,11	0,04	0,12	0,04	<0,1 (LQ)	
140943-3	0,07	0,04	0,1	0,04	<0,1 (LQ)	
141004-1	0,98	0,02	0,14	0,01	0,84	0,03
141004-2	0,83	0,02	0,13	0,02	0,7	0,03
141004-3	<0,04 (LQ)		<0,01 (LQ)		au plus égale au CT	
150054-1	1,86	0,05	1,35	0,04	0,51	0,06
150054-2	0,26	0,03	0,23	0,03	<0,1 (LQ)	
150054-3	0,09	0,02	0,1	0,02	<0,1 (LQ)	
150054-4	0,4	0,02	0,36	0,03	<0,1 (LQ)	
150054-5	0,06	0,02	<0,1		au plus égale au CT	
150054-6	0,27	0,02	0,27	0,02	<0,1 (LQ)	
150054-7	0,8	0,02	0,2	0,02	0,6	0,03
150054-8	1,58	0,03	0,39	0,02	1,19	0,04
150054-9	0,28	0,02	0,27	0,02	<0,1 (LQ)	
130281-1	5,78	0,17	0,8	0,08	4,98	0,19

n° échantillon	Carbone Total exprimé en C en %	2σ	Carbone Organique exprimé en C en %	2σ	Carbone des Carbonates exprimé en C en %	2σ
130281-7	4,11	0,07	0,29	0,02	3,82	0,07
130281-8	4,16	0,07	0,55	0,02	3,61	0,07
130281-9	3,37	0,06	0,6	0,03	2,77	0,07
130281-15	7,04	0,15	0,66	0,03	6,38	0,15
130281-16	7,73	0,21	0,66	0,04	7,07	0,21
130281-17	7,14	0,13	0,6	0,05	6,54	0,14
130281-2	2,23	0,04	0,85	0,03	1,38	0,05
130281-3	3,85	0,07	2,05	0,08	1,8	0,11
130281-4	4,03	0,09	1,82	0,07	2,21	0,11
130281-5	2,5	0,05	0,93	0,03	1,57	0,06
130281-6	3,03	0,05	1,53	0,04	1,5	0,07
130281-27	1,34	0,04	1,31	0,04	<0,1 (LQ)	
130281-28	2,34	0,04	1,32	0,03	1,02	0,06
130281-29	3,14	0,06	1,57	0,04	1,57	0,07
130281-10	16,79	0,65	16,58	0,29	0,21	0,71
130281-11	5,22	0,16	5,01	0,11	0,21	0,19
130281-12	10,61	0,34	10,37	0,22	0,24	0,41
130281-13	12,54	0,35	12,17	0,53	0,37	0,63
130281-14	4,81	0,23	4,62	0,2	0,19	0,3
130281-18	2,31	0,05	0,38	0,03	1,93	0,06
130281-19	1,3	0,04	0,9	0,03	0,4	0,05
130281-20	2,46	0,05	0,69	0,03	1,77	0,06
130281-21	4,94	0,08	0,71	0,03	4,23	0,09
130281-22	1,48	0,03	0,39	0,03	1,09	0,05
130281-23	2,87	0,05	0,48	0,02	2,39	0,05
130281-53	4,1	0,93	2,3	0,11	1,8	0,94
130281-60	5,41	0,13	1,8	0,12	3,61	0,17
130281-61	7,2	0,19	2,7	0,13	4,5	0,23
130281-62	6,54	0,28	2,91	0,4	3,63	0,49
130281-63	8,85	0,2	3,58	0,42	5,27	0,47
130281-32	1,88	0,06	1,22	0,06	0,66	0,08
130281-33	3,45	0,12	1,57	0,2	1,88	0,24
130281-39	0,69	0,03	0,61	0,05	<0,1 (LQ)	
130281-40	0,39	0,03	0,37	0,06	<0,1 (LQ)	
130281-41	0,81	0,03	0,74	0,07	<0,1 (LQ)	
130281-42	0,84	0,03	0,77	0,08	<0,1 (LQ)	
130281-52	4,5	0,18	0,79	0,12	3,71	0,21
130281-54	5,36	0,14	0,65	0,04	4,71	0,15
130281-55	5,86	0,1	0,71	0,05	5,15	0,11
130281-56	4,57	0,09	2,05	0,07	2,52	0,12
130281-30	0,61	0,03	0,56	0,03	<0,1 (LQ)	
130281-34	2,41	0,05	2,31	0,09	0,1	0,1
130281-35	6,95	0,33	6,35	0,16	0,6	0,37
130281-36	5,26	0,12	4,96	0,24	0,3	0,27
130281-37	5,42	0,12	5,12	0,49	0,3	0,5
130281-38	7,38	0,24	7,03	0,85	0,35	0,88
130281-43	0,62	0,06	0,63	0,12	<0,1 (LQ)	
130281-44	0,08	0,06	0,15	0,12	<0,1 (LQ)	
130281-45	5,13	0,15	4,84	0,13	0,29	0,19

n° échantillon	Carbone Total exprimé en C en %	2 σ	Carbone Organique exprimé en C en %	2 σ	Carbone des Carbonates exprimé en C en %	2 σ
130281-46	5,56	0,12	5,14	0,62	0,42	0,63
130281-47	17,3	0,92	16,74	4,65	0,56	4,74
130281-49	0,28	0,05	0,27	0,13	<0,1 (LQ)	
130281-50	1,41	0,06	1,29	0,11	0,12	0,12
130281-51	1,62	0,06	1,49	0,11	0,13	0,13

Carbone Total exprimé en C en %

Carbone Organique exprimé en C et dosé après élimination des carbonates en %

Carbone des Carbonates exprimé en C et déterminé par différence entre total et organique en %

Analyses des Teneurs en composés Soufre, Fluor et Chlore

n° CTMNC	T °C	Perte au feu	SO ₃ total en cru	SO ₃ total sur cuit	SO ₃ total - Fraction Emissible maximale	F total en cru	F total sur cuit	F total - Fraction Emissible maximale	Cl total en cru	Cl total sur cuit	Cl total - Fraction Emissible maximale
130281-1	1100	23,18	0,2	0,09	0,11	0,08	<0,005	au plus égale au cru	0,02	0,01	0,01
130281-2	1100	12,05	0,06	0,08	<0,02	0,097	0,072	0,025	0,018	<0,005	au plus égale au cru
130281-3	1100	20,43	0,71	0,14	0,57	0,089	<0,005	au plus égale au cru	3,675	<0,005	au plus égale au cru
130281-4	1100	16,92	0,64	0,13	0,51	0,093	<0,005	au plus égale au cru	0,771	<0,005	au plus égale au cru
130281-5	1100	12,4	0,16	0,18	<0,02	0,096	0,059	0,037	0,029	<0,005	au plus égale au cru
130281-6	1100	12,23	0,2	0,09	0,11	0,077	0,034	0,043	0,031	<0,005	au plus égale au cru
130281-15	1100	26,65	0,29	0,31	<0,02	0,053	<0,005	au plus égale au cru	0,013	<0,005	au plus égale au cru
130281-18	1100	11,86	0,21	0,18	0,03	0,057	0,025	0,032	0,009	<0,005	au plus égale au cru
130281-24	1100	14,75	0,2	0,14	0,06	0,054	0,023	0,031	0,008	<0,005	au plus égale au cru
130281-29	1000	13,53	0,1	<0,02	au plus égale au cru	0,097	0,027	0,07	0,018	0,005	0,013
130281-32	1100	10,9	0,6	0,12	0,48	0,1	0,04	0,06	0,677	0,007	0,67
130281-33	1100	15	0,8	0,1	0,7	0,09	0,01	0,08	0,16	<0,005	au plus égale au cru
130281-53	1100	19,25	0,2	<0,02	au plus égale au cru	0,05	0,006	0,044	0,036	0,011	0,025
130281-56	1050	19,5	0,98	0,36	0,62	0,065	0,009	0,056	1,39	0,01	1,38
130281-60	1100	24,11	1	0,25	0,75	0,053	0,005	0,048	3,01	0,01	3
130281-62	1100	21,6	0,35	0,07	0,28	0,088	0,017	0,071	0,025	0,005	0,02

Annexe 6. Analyses Granulométriques

Les analyses granulométriques ont déjà été réalisées sur tous les échantillons. Elles sont réalisées par tamisage par voie humide pour la fraction supérieure à 40 µm et par sédigraphie à rayons X pour la fraction inférieure à 40 µm. Pour réaliser l'analyse au sédigraphe à rayons X, la fraction inférieure à 40 µm est récupérée lors du tamisage par voie humide. Les particules inférieures à 40 µm sont dispersées dans une solution d'hexamétaphosphate de sodium. La solution est agitée pendant 20 h pour que la dispersion soit efficace. En laissant sédimenter la suspension, l'absorption des rayons X permet de déterminer la concentration à un temps donné et à une hauteur donnée de la suspension. La vitesse de chute v des particules dans la suspension est mesurée et donnée par la loi de Stokes ci-dessous. Cette relation est directement liée à la taille de la particule.

$$v = \frac{2r^2 g \Delta(\rho)}{9\eta}$$

v , vitesse limite de chute (en m/s) ;

r , rayon de la sphère (en m) ;

g , accélération de la pesanteur (en m/s²) ;

$\Delta(\rho) = \rho_p - \rho_f$, différence de masse volumique entre la particule et le fluide (en kg/m³) ;

η , viscosité dynamique du fluide (en Pa.s).

Mélanges industriels

Echantillon	< 2,5 µm	2,5 - 25 µm	> 25 µm	> 40 µm	> 200 µm
493-1	29,8	33,0	37,2	27,3	6,2
493-2	49,5	27,8	22,7	21,5	8,6
493-3	54,5	19,3	26,2	25,4	14,7
493-4	42,8	39,2	18,0	11,0	3,7
493-5	42,7	38,1	19,2	16,2	7,5
493-6	47,0	23,8	29,2	27,5	18,2
493-7	45,0	31,2	23,8	21,9	10,5
493-8	42,6	39,4	18,0	15,1	6,1
493-10	29,4	28,8	41,8	39,6	25,4
493-11	45,3	28,2	26,5	25,4	19,8
493-12	37,6	33,6	27,3	25,0	13,1
493-13	48,0	44,6	7,4	5,8	3,2
493-22	49,2	22,1	28,7	27,3	14,0
140922-1	35,0	37,6	27,3	24,6	16,9
140923-1	26,6	51,0	22,3	18,6	6,8
140923-2	38,3	44,4	17,2	12,7	1,4
140923-3	37,5	43,6	18,7	15,9	3,1
140943-1	4,9	9,7	85,3	84,3	68,9
140943-2	56,2	34,3	9,2	5,6	1,7
140943-3	45,9	26,7	27,3	25,5	18,1
141004-1	41,2	39,7	18,9	13,7	2,4
141004-2	38,9	34,4	26,5	21,8	10,5
141004-3	3,7	12,1	84,2	82,5	71,5
150054-1	29,4	24,5	45,3	43,3	24,8
150054-2	42,9	27,9	28,9	26,8	15,7
150054-3	22,0	42,5	34,7	31,6	9,8
150054-4	41,4	22,6	35,9	32,1	19,9
150054-5	12,6	31,2	53,0	51,0	16,4
150054-6	36,0	36,9	26,9	24,2	14,0
150054-7	44,3	17,5	38,2	36,5	27,3
150054-8	64,3	31,3	4,3	2,9	0,3
150054-9	11,8	13,5	74,1	72,2	56,5

Les systèmes fluviatiles

Le bassin versant de la Durance

Echantillon	< 2,5 µm	2,5 - 25 µm	> 25 µm	> 40 µm	> 200 µm
130281-1	48,9	50,5	0,6	0,3	0,0
130281-7	12,1	52,5	35,2	24,3	0,0
130281-8	22,3	63,2	14,4	10,0	0,7
130281-9	32,4	66,1	1,5	0,4	0,0
130281-15	43,1	53,2	3,7	1,1	0,1
130281-16	29,6	54,5	15,9	13,4	7,5
130281-17	17,1	36,8	46,2	37,2	0,2

Le bassin versant de la Seine

Echantillon	< 2,5 µm	2,5 - 25 µm	> 25 µm	> 40 µm	> 200 µm
130281-10	19,0	65,3	15,7	9,8	1,1
130281-11	18,3	35,9	45,5	39,1	10,4
130281-12	16,4	51,5	32,1	29,7	12,0
130281-13	23,4	66,2	10,2	6,7	0,4
130281-14	24,7	48,1	27,3	23,7	9,5
130281-18	53,5	28,1	18,2	15,0	0,8
130281-19	30,7	37,3	32,3	24,3	0,5
130281-20	13,3	29,8	51,7	44,4	22,7
130281-21	36,8	47,4	15,8	12,7	6,3
130281-22	56,7	26,4	17,0	13,2	0,7
130281-23	4,7	19,5	76,0	72,9	4,8
130281-53	27,7	39,2	33,0	23,9	2,6
130281-60	38,8	46,0	15,1	8,7	0,7
130281-61	27,8	26,6	45,6	43,6	39,3
130281-62	31,7	57,3	10,9	5,0	0,0
130281-63	18,5	29,7	51,2	44,3	4,5

Le bassin versant de la Garonne

Echantillon	< 2,5 µm	2,5 - 25 µm	> 25 µm	> 40 µm	> 200 µm
130281-34	25,5	21,2	52,5	50,9	30,0
130281-35	17,7	37,8	44,4	40,7	11,8
130281-36	19,0	26,6	54,2	51,7	11,0
130281-37	33,0	40,0	26,9	24,2	5,3
130281-38	30,5	62,2	7,2	3,9	0,4
130281-43	6,7	15,9	77,3	74,8	48,5
130281-44	10,5	7,0	82,6	81,6	63,3
130281-45	40,2	54,5	5,3	4,6	1,6
130281-46	33,0	53,9	13,1	11,5	5,6
130281-47	11,0	34,5	54,5	51,2	38,1
130281-49	28,7	13,4	57,8	56,8	48,4
130281-50	12,2	21,5	66,2	63,7	45,2
130281-51	10,1	18,4	71,3	69,8	54,8

Les systèmes côtiers

Le Pertuis Breton et les bassins versants associés

Echantillon	< 2,5 µm	2,5 - 25 µm	> 25 µm	> 40 µm	> 200 µm
130281-2	68,6	29,0	2,4	1,7	0,1
130281-3	59,9	38,5	1,5	1,4	0,7
130281-4	57,7	40,1	2,3	1,3	0,2
130281-5	60,7	32,4	6,8	5,6	0,4
130281-6	48,4	32,9	18,7	16,7	1,4
130281-27	34,1	40,2	25,5	22,0	12,8
130281-28	60,9	37,9	1,2	1,1	0,6
130281-29	57,6	41,0	1,4	0,8	0,8

Le Pertuis d'Antioche et les bassins versants associés

Echantillon	< 2,5 µm	2,5 - 25 µm	> 25 µm	> 40 µm	> 200 µm
130281-32	61,0	33,6	5,2	3,5	0,8
130281-33	55,0	41,5	3,5	1,4	0,0
130281-39	6,7	12,8	80,6	78,9	53,0
130281-40	8,7	13,1	78,1	76,2	62,6
130281-41	9,3	14,8	75,9	74,0	57,3
130281-42	15,1	23,7	61,3	59,0	29,0

Le bassin d'Arcachon

Echantillon	< 2,5 µm	2,5 - 25 µm	> 25 µm	> 40 µm	> 200 µm
130281-30	4,8	8,8	86,4	85,4	72,8
130281-31	28,8	38,7	32,5	29,8	16,8

La côte Manche (baie du Mont-Saint-Michel - baie de Somme - estuaire de la Rance)

Echantillon	< 2,5 µm	2,5 - 25 µm	> 25 µm	> 40 µm	> 200 µm
130281-52	15,5	20,2	64,2	61,6	24,1
130281-54	15,3	20,9	63,5	57,5	0,3
130281-55	13,6	16,4	68,9	59,7	0,8
130281-56	44,9	51,1	3,9	2,0	0,6

Annexe 7. Les essais matériaux

Façonnage

L'ensemble des échantillons prélevés dans les sites pilotes choisis sont séchés à l'étuve à 105 °C, puis broyés pour être stockés prêts à être utilisés. Nous avons choisi de stocker le matériel sec, contrairement aux pratiques de l'industrie de la terre cuite qui maintient sa matière première avec son humidité, car cela nous permet de maîtriser la quantité d'eau nécessaire au façonnage.

La première étape de caractérisation par les essais matériaux est la fabrication des éprouvettes d'essais, c'est-à-dire leur façonnage. Cette étape est divisée en deux sous-étapes : le malaxage et l'étirage.

Le malaxage consiste à mettre la (ou les) matière(s) première(s) dans le malaxeur afin d'homogénéiser le mélange et d'ajouter l'eau de façonnage nécessaire pour obtenir un pâte argileuse suffisamment plastique. Cette plasticité est à l'appréciation de l'opérateur. On utilise environ 4 kg d'échantillon, ce qui nous permet de réaliser l'ensemble des analyses. Généralement, la teneur en eau de façonnage est au moins de 20 % par rapport à la masse sèche de l'échantillon.

Une fois la pâte argileuse obtenue et bien malaxée, l'étirage est réalisé avec une extrudeuse de laboratoire NETZSCH (Figure 4-22).

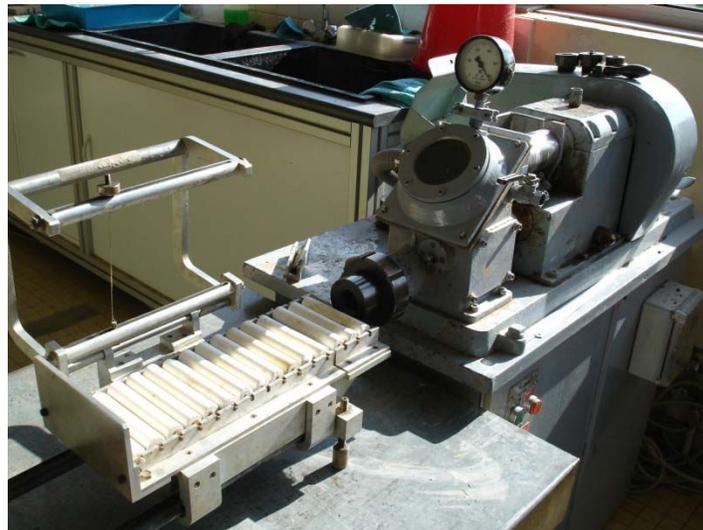


Figure 4-22 : Photographie de la petite extrudeuse de laboratoire du CTMNC à Clamart

Plusieurs formes et tailles de barrettes sont façonnées notamment par changement de la filière afin de réaliser les différents essais déterminant :

- le comportement au séchage (courbe de Bigot) ;
- le comportement à la cuisson (cuissons mesures, absorption d'eau, ATD/ATG, thermodynamométrie) ;
- les caractéristiques du produit fini (résistance mécanique par flexion 3 points).

Une évaluation de la plasticité de la pâte argileuse après étirage est effectuée à l'aide d'un pénétromètre. Les quantités d'eau de malaxage et de façonnage sont déterminés par pesées avant et après séchage à l'étuve à 105 °C, température à laquelle nous considérons que ces eaux sont évaporées.

Après étirage, les éprouvettes sèchent à l'air ambiant pendant une semaine sauf celles destinées à la courbe de Bigot.

Le comportement au séchage - la courbe de Bigot

Afin d'évaluer le comportement au séchage d'un mélange, on réalise le test de la courbe de Bigot est à l'aide d'un barrélatographe ADAMEL dans une enceinte fermée (Figure 4-23). Elle permet de quantifier le retrait des éprouvettes et le départ de l'eau colloïdale et d'interposition au cours du séchage en mesurant la perte d'humidité en pourcentage du poids en fonction du retrait en pourcentage de la longueur sèche.

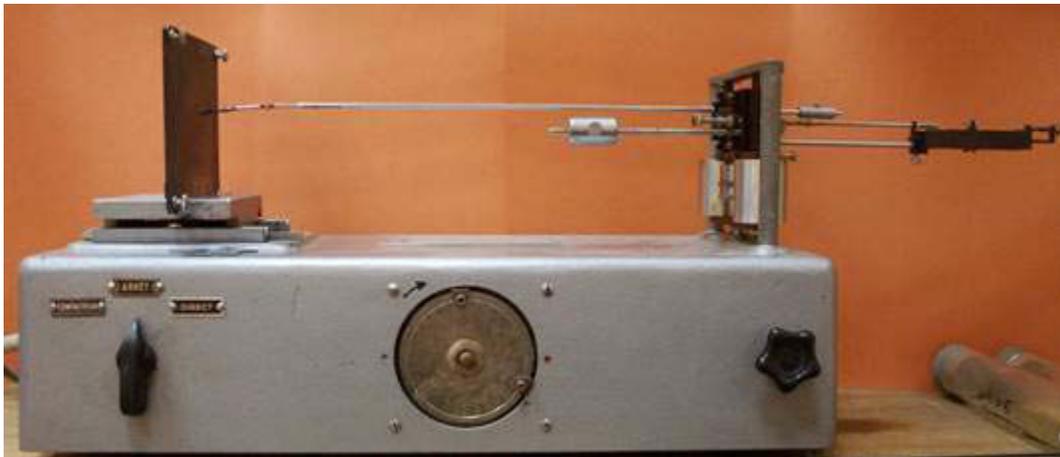


Figure 4-23 : Photographie d'un barrélatographe ADAMEL du CTMNC

Ce test est effectué 24 h après le façonnage pour relâcher les contraintes entre les feuillets des minéraux argileux. Les éprouvettes sont stockés dans un tube hermétique permettant de maintenir le taux d'humidité. Deux éprouvettes de petites tailles sont installées sur le dispositif (à droite, sur la photo - Figure 4-23). Le système de balancier est remis en équilibre ce qui permet à la plume de trouver sa position de départ. Le panneau à gauche (Figure 4-23) avance et recule de façon régulière pour marquer la position avec la plume, dont la position dépend du retrait et du taux d'humidité des éprouvettes au cours du temps. Au bout d'environ 24h, la courbe de Bigot est complète.

Les phases du séchage sont décrites dans le chapitre 3 partie 3.2 et présentées schématiquement en Figure 4-24. L'aptitude au séchage en fonction de l'allure de la courbe de Bigot est présentée dans la Figure 4-25. Une bonne aptitude au séchage correspond à un retrait court, une pente forte et un retrait lors du départ de l'eau d'interposition (phase 2) très court. Une mauvaise aptitude au séchage correspond au contraire, à un retrait important, une pente faible et une phase intermédiaire longue qui ne marque pas bien la différence entre le départ de l'eau colloïdale et celui de l'eau d'interposition.

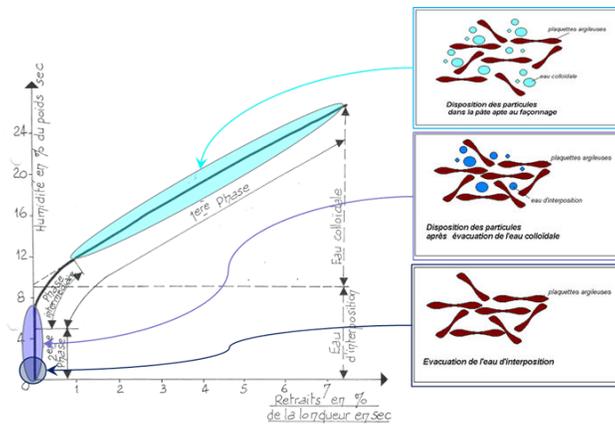


Figure 4-24 : Description schématique des phases du séchage

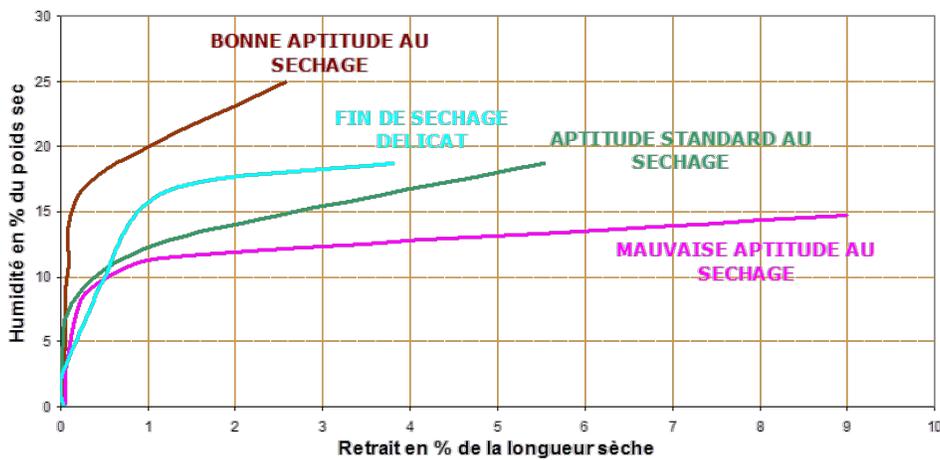


Figure 4-25 : Aptitude au séchage selon l'allure de la courbe de Bigot

Le comportement à la cuisson

Les mesures de retrait et d'absorption d'eau

Une fois séchées à l'air ambiant, les éprouvettes destinées aux essais de cuisson mesure sont séchées à l'étuve à 105 °C pendant 48h. Elles sont ensuite cuites dans des fours électriques programmables. Chaque série de 3 éprouvettes est cuites à une seule température. Les températures choisies correspondent à celles utilisées pour la cuisson des briques et des tuiles dans l'industrie (850 - 900 - 950 - 1000 - 1050 - 1100 - 1150 °C). La vitesse de cuisson est de 100°C/h avec un palier de 2 h à la température programmée. Lors de cette dernière étape, l'eau et les matières organiques sont éliminées.

Les éprouvettes sont pesées et mesurées avant et après cuisson afin de déterminer le retrait à la cuisson à chaque température. Pour déterminer leur capacité à absorber l'eau et estimer leur porosité aux différentes températures de cuisson, un test d'absorption d'eau est réalisé sur l'une des éprouvettes par température de cuisson.

Le test d'absorption d'eau consiste à mesurer la quantité d'eau qui peut être absorbée dans le produit. Les éprouvettes cuites sont d'abord positionnées à la verticale dans un bac d'eau en immergeant 1 cm d'une de ses extrémités pour favoriser la montée de l'eau par capillarité. Puis, au bout de 4 h, les éprouvettes sont complètement plongées dans l'eau. Les barrettes sont ensuite pesées après 48 h d'immersion. Les éprouvettes sont ensuite pesées. La différence de masse entre les éprouvettes imbibées d'eau et les éprouvettes sèches cuites correspond au pourcentage d'absorption d'eau.

Les mesures ATD/ATG

L'analyse thermique différentielle (ATD) consiste à mesurer la variation de température entre l'échantillon à analyser et un matériau de référence inerte (ici, le kaolin) en fonction du temps ou de la température. De nombreuses transformations peuvent se produire au cours du chauffage. Ces réactions peuvent être endothermique ou exothermique. Les phénomènes de fusion ou de cristallisation sont mis en valeur par cette méthode. L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de déterminer les 15 pertes de masse de l'échantillon étudié en fonction de la température ou du temps. Ces deux techniques complémentaires sont souvent couplées, ce qui permet de déterminer s'il s'agit par exemple d'un changement de phase minéralogique d'un minéral qui se produit sans perte de masse ou d'une réaction destructurant provoquant une perte de masse. Les analyses sont réalisées sur l'ATD-ATG NETZSCH STA 449 F3.

Les échantillons sont broyés dans un mortier puis tamisés à 200 μm . La poudre récupérée est mise à l'étuve à 40°C pendant 24 h. Elle est ensuite disposée dans un creuset en alumine, pesée et analysée. La vitesse de chauffe est de 500°C/h avec un balayage de température allant jusqu'à 1100°C. Les analyses ont été réalisées sous atmosphère contrôlée d'azote.

Les mesures de thermo-dilatométrie

La thermo-dilatométrie est utilisée pour mesurer les variations dimensionnelles de l'éprouvette d'argile en fonction de la température. Chaque éprouvette est préparée de façon à ce qu'elle soit parallélépipédique et mesure 4 cm de longueur. Elle est placée dans le four du dilatomètre et chauffée à une température donnée. Un système d'acquisition enregistre les signaux reçus par le capteur de déplacement pour ainsi déterminer les changements de dimensions au cours du chauffage. La vitesse de chauffe est de 50°C/h avec un balayage de température allant jusqu'à 1100°C.

La courbe obtenue par thermo-dilatométrie est spécifique d'un type d'argile donné. Elle donne des informations sur le retrait du tesson lors de la cuisson et sur les transformations allotropiques qui peuvent avoir lieu. Cette technique permet également d'optimiser les températures de cuisson pour obtenir des produits avec les performances recherchées.

La résistance à la flexion

Les essais de flexion 3 points, réalisés avec une presse LLOYD, consistent à caractériser la résistance du matériau argileux à la rupture. La presse de flexion (cf Figure 8) exerce une force progressive au centre de l'éprouvette qui est posée sur deux appuis jusqu'à ce que la barrette se brise.

Pour un même échantillon, le test de flexion est mis en œuvre sur des séries d'éprouvettes « cru », c'est-à-dire séchées de l'étuve à 105°C et cuites à 950°C et à 1100°C en fonction de l'aptitude à la cuisson de l'échantillon.

Annexe 8. Résultats des analyses classiques par systèmes pilotes

Systèmes fluviatiles

Le bassin versant de la Durance

Analyses chimique et granulométrique

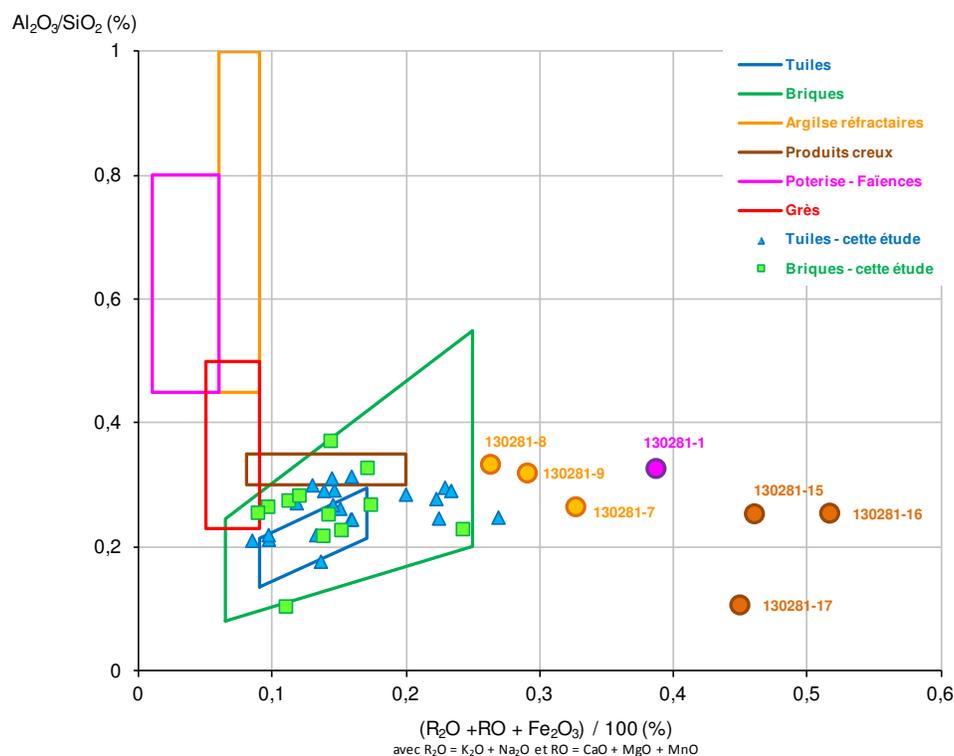


Figure 4-26 : Diagramme Augustinik des sédiments du bassin versant de la Durance

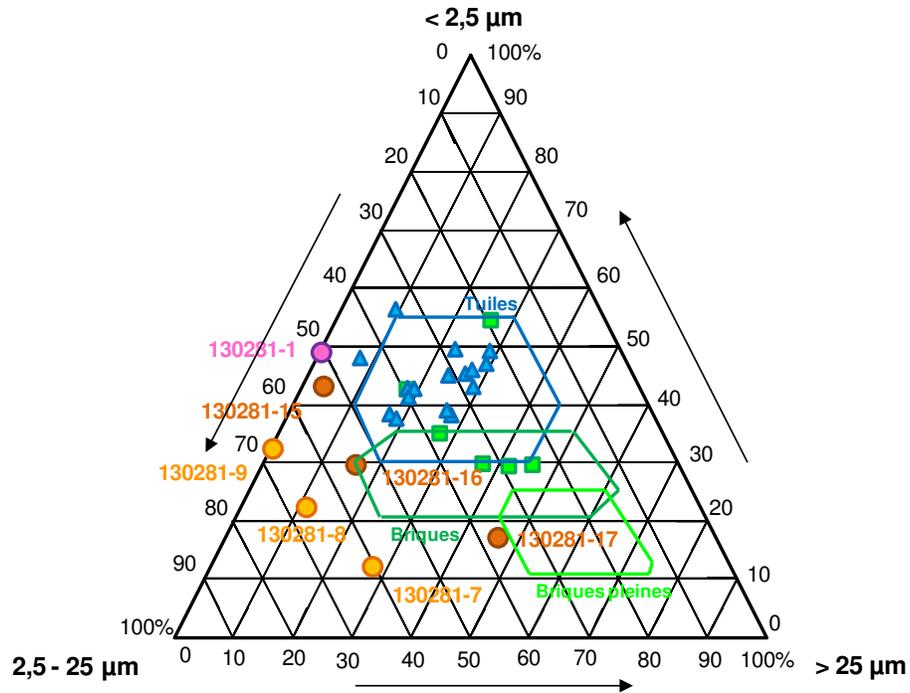


Figure 4-27 : Diagramme de Winkler des sédiments du bassin versant de la Durance

Liste des échantillons

Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Désignation	Extrusion
130281-1	NATUREL	Cadarache	Oui
130281-7	NATUREL	SP Vachères - Boscodon	Impossible
130281-8	NATUREL	SP Vachères - Boscodon	Impossible
130281-9	NATUREL	SP Vachères - Boscodon	Impossible
130281-15	NATUREL	Verdon St André les Alpes	Oui
130281-16	NATUREL	Verdon Chaudanne	Non
130281-17	NATUREL	Verdon Ste Croix pont	Non
130281-25	MELANGE	80% 130281-1 20% sable	Oui
130281-26	MELANGE	70% 130281-1 30% sable	Oui
130281-57	MELANGE	80% 130281-1 20% chamotte	Oui
130281-58	MELANGE	50% 130281-1 42% 130281-8 8% chamotte	Oui

Photographie des éprouvettes

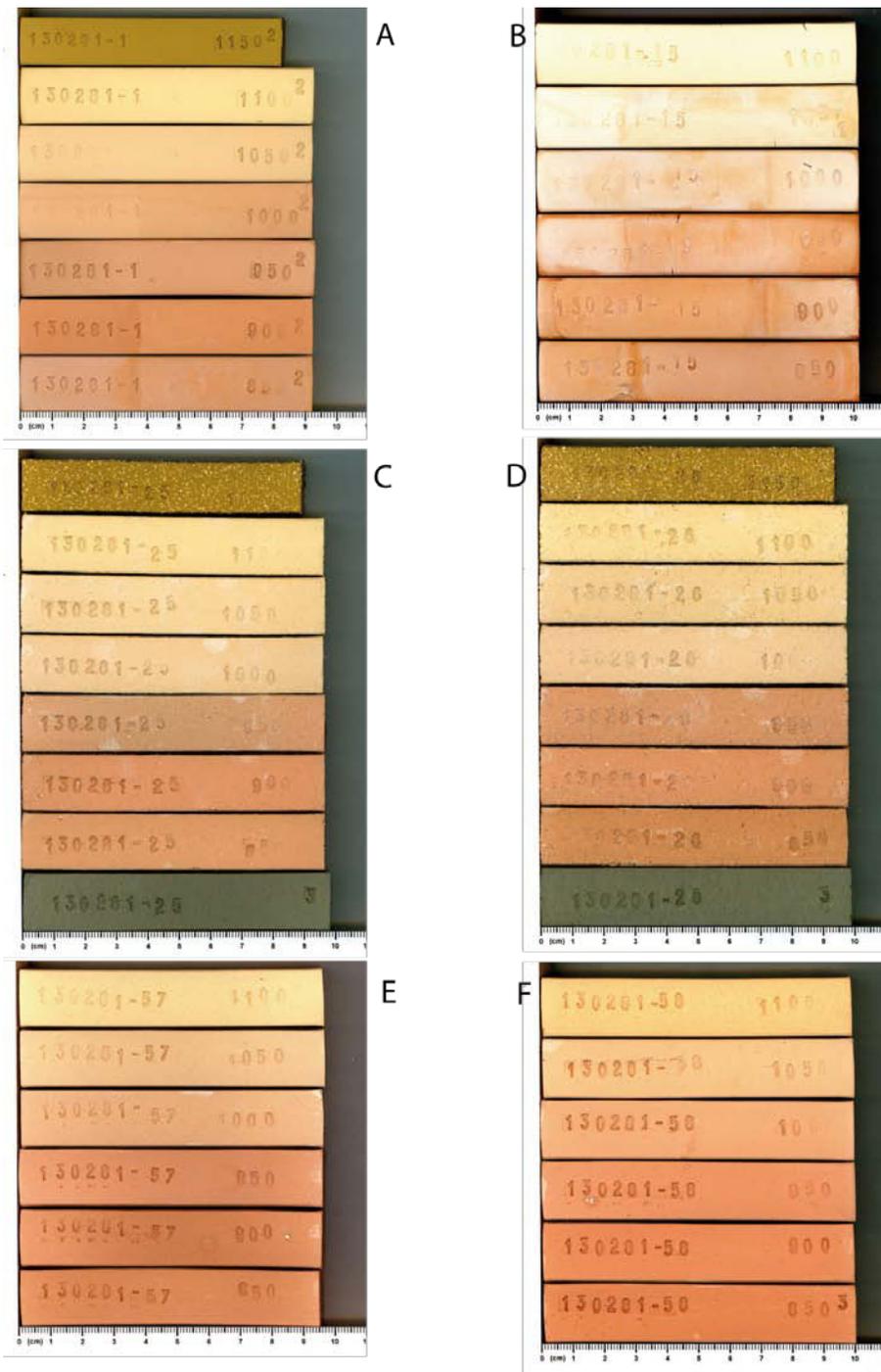


Figure 4-28: Photographie des éprouvettes Cuissons Mesures du bassin versant de la Durance A) 130281-1 B) 130281-15 C) 130281-25 D) 130281-26 E) 130281-57 F) 130281-58

Comportement au séchage

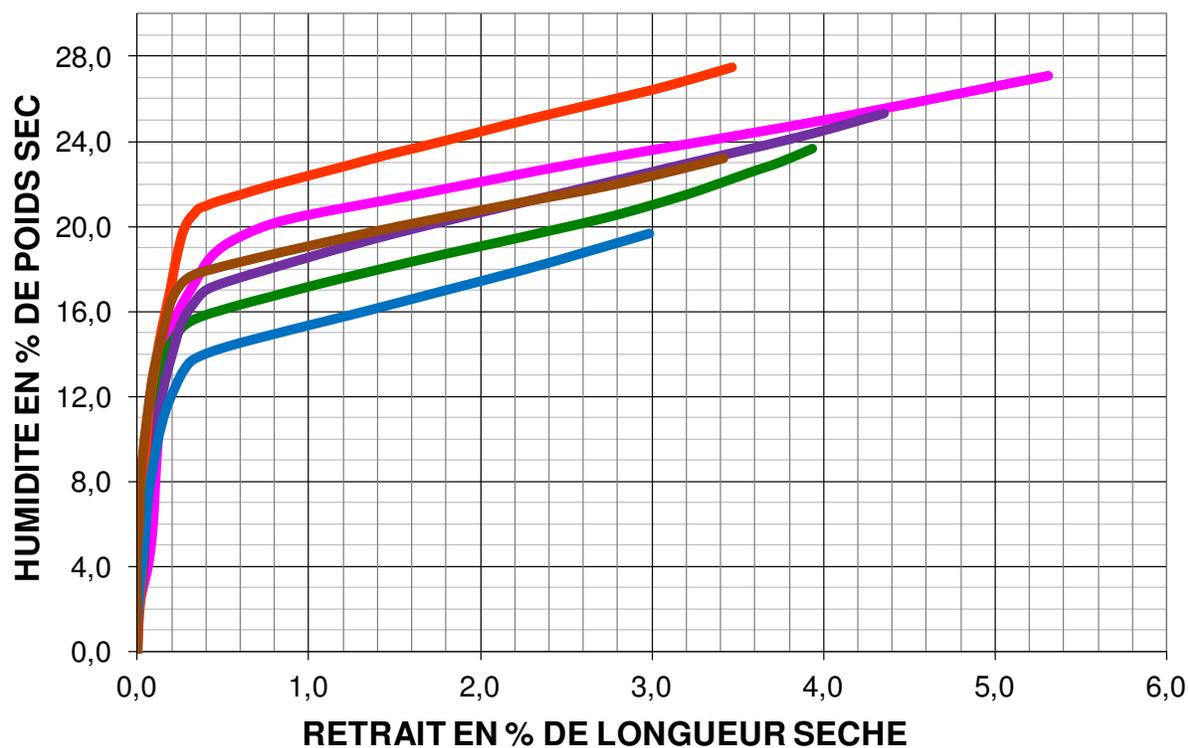


Figure 4-29 : Courbes de Bigot du bassin versant de la Durance. (en rose : 130281-1 ; en marron : 130281-15 ; en vert : 130281-25 ; en bleu : 130281-26 ; en violet : 130281-57 ; en rouge : 130281-58).

130281 -	1	15	25	26	57	58
Retrait de séchage (en % de la longueur sèche)	5,3	3,4	3,9	3,0	4,4	3,5
Eau en fin de retrait (en % de la masse sèche)	1,5	1,3	1,4	1,2	1,6	1,0

Comportement à la cuisson

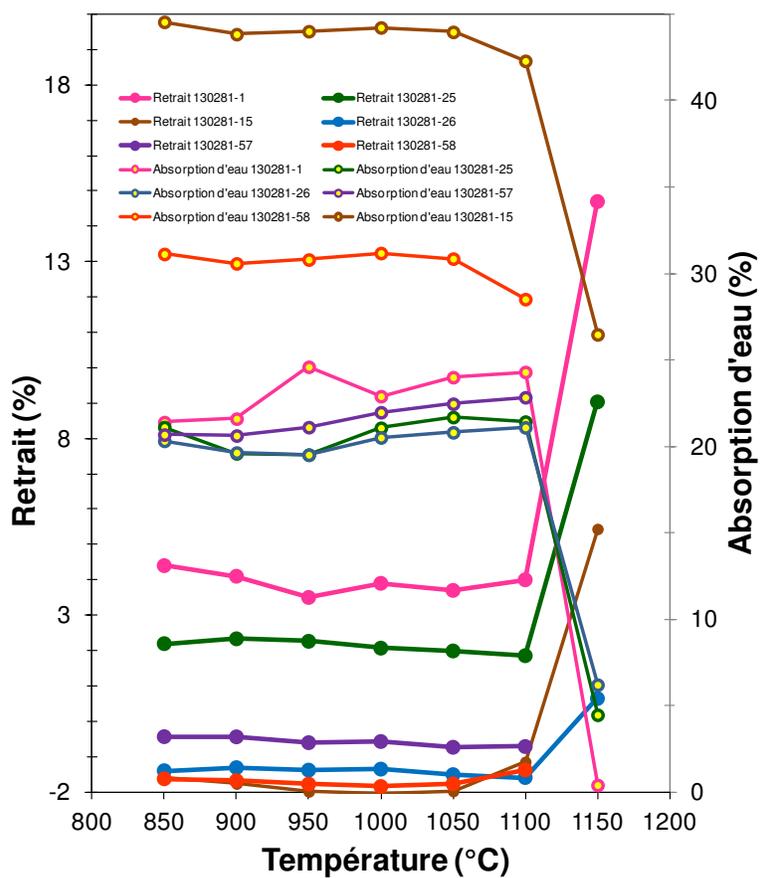


Figure 4-30 : Courbes de retrait et d'absorption d'eau à la cuisson du bassin versant de la Durance

Analyses ATD/ATG

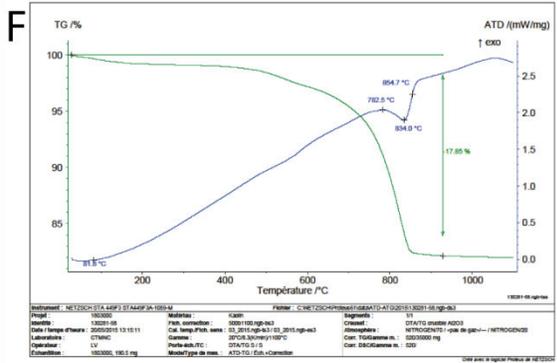
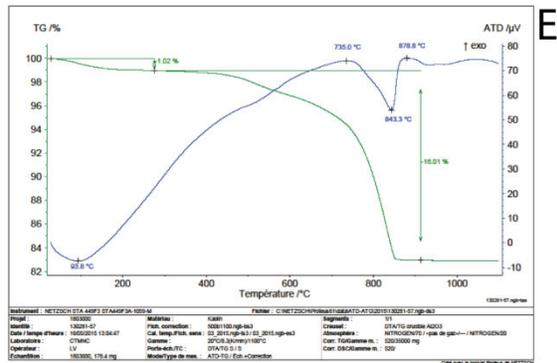
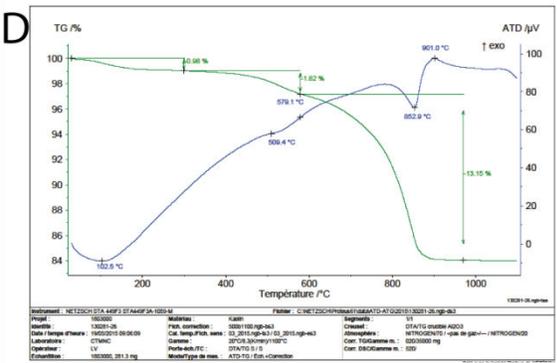
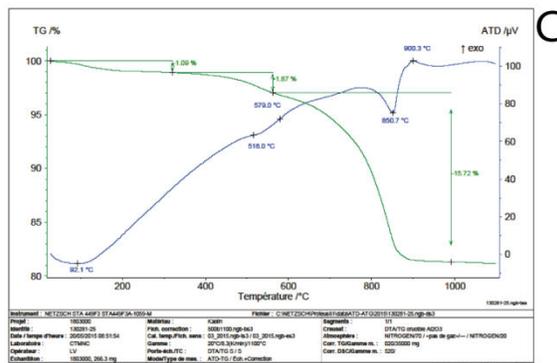
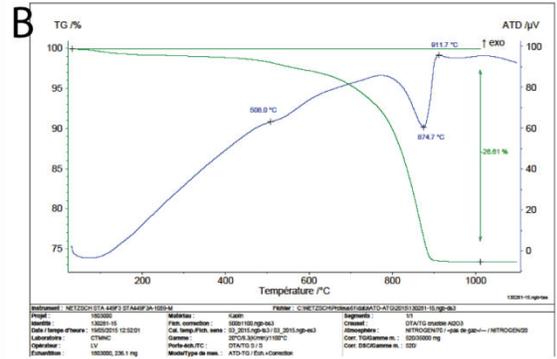
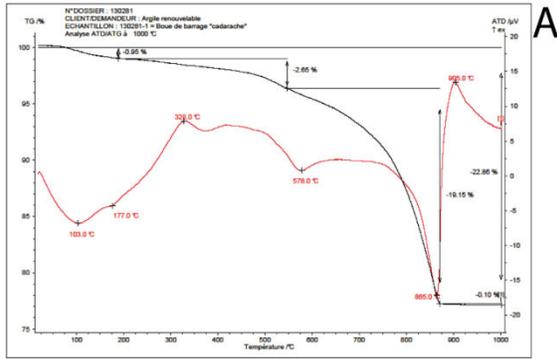


Figure 4-31 : Analyses ATD/ATG du bassin versant de la Durance (A) 130281-1 ; B) 130281-15 ; C) 130281-25 ; D) 130281-26 ; E) 130281-57 ; F) 130281-58).

Analyse thermo-dilatométrique

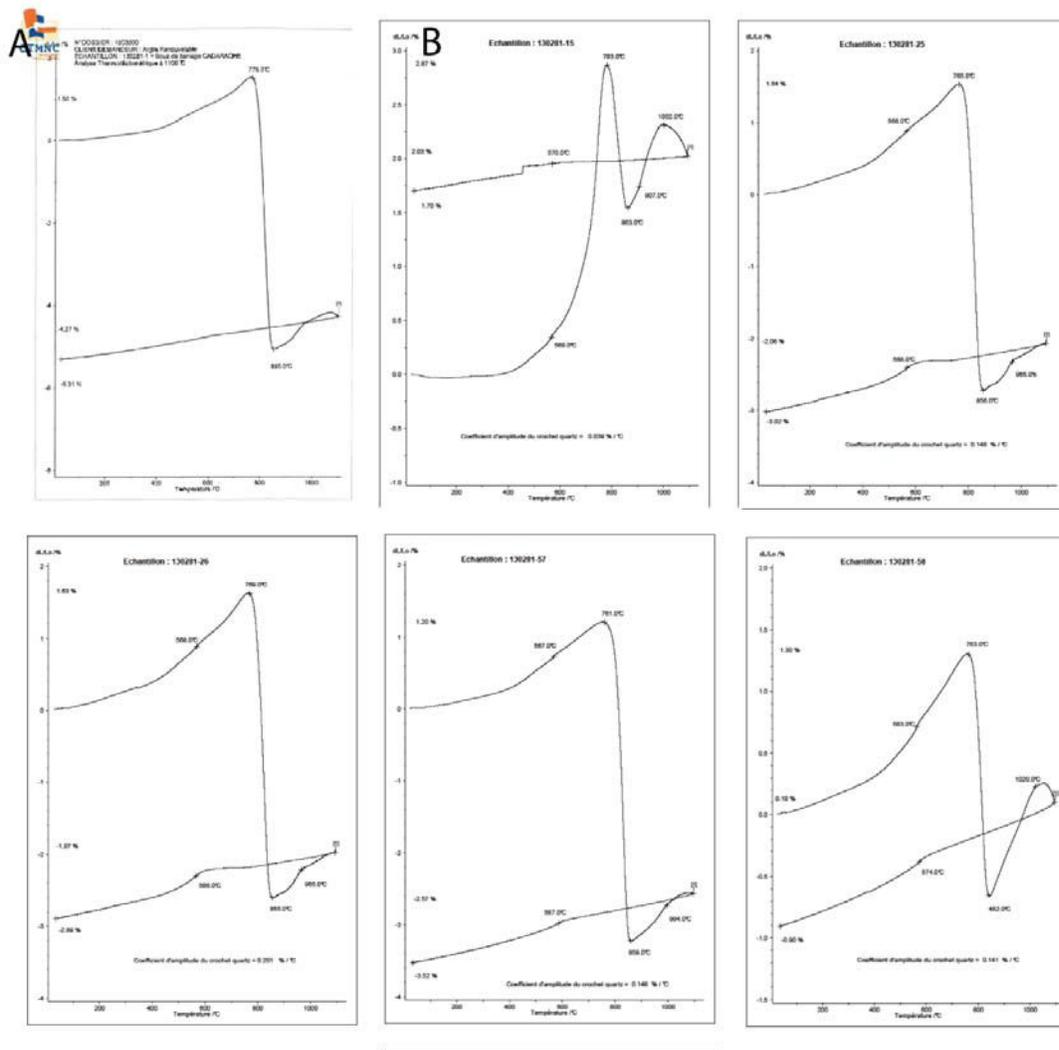


Figure 4-32 : Analyses thermo-dilatométrique du bassin versant de la Durance (A) 130281-1 ; B) 130281-15 ; C) 130281-25 ; D) 130281-26 ; E) 130281-57)

Résistance mécanique

Tableau 19 : Récapitulatif de la résistance (en MPa) à la flexion 3 points des mélanges du bassin versant de la Durance

Température de cuisson	130281-1	130281-25	130281-26	130281-57	130281-58
cru	5,2	4,4	2	2,7	2,2
950°C	29,7	8	5,1	21,3	12,5
1100°C	29,3	5,2	3,8	16,3	15,1

Il est à noter que l'échantillon 130281-15 n'a pas pu être analysé.

Le bassin versant de la Seine

Analyses chimique et granulométrique

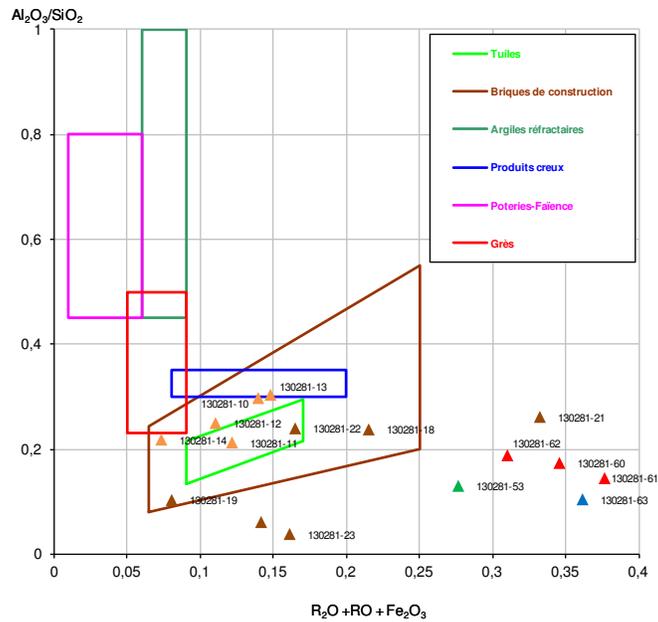


Figure 4-33 : Diagramme Augustinik des sédiments du bassin versant de la Seine

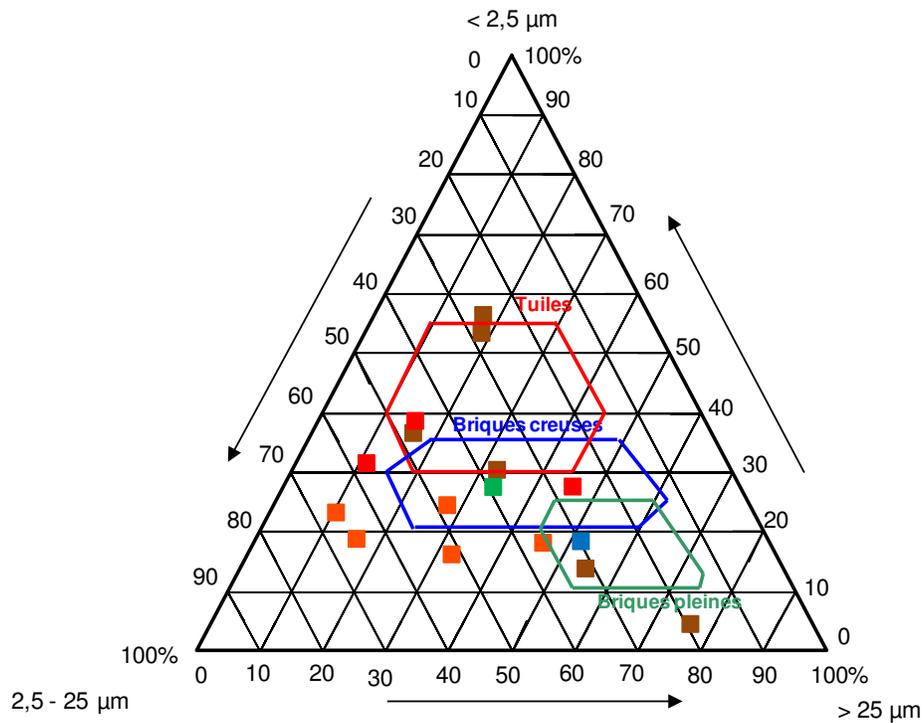


Figure 4-34 : Diagramme de Winkler des sédiments du bassin versant de la Seine

Liste des échantillons

Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Désignation	Extrusion
130281-10	NATUREL	Crescent Cure	Non
130281-11	NATUREL	Crescent Chaux	Non
130281-12	NATUREL	Chaumeçon pont de la Bruyère	Non
130281-13	NATUREL	Pannecièrè pont Yonne	Impossible
130281-14	NATUREL	Pannecièrè pont Ourcille	Impossible
130281-18	NATUREL	Orient plage Géraudot	Oui
130281-19	NATUREL	Auzon Temple	Non
130281-20	NATUREL	Der base nautique Champeaubert	Non
130281-21	NATUREL	Der base nautique Nuisement	Mélange 130281-24
130281-22	NATUREL	Der presqu'île Nemours	Mélange 130281-24
130281-23	NATUREL	Orient Mesnil St Père	Non
130281-24	MELANGE	130281-21/130281-22	Oui
130281-53	NATUREL	Marais Vernier - Quilleboeuf	Oui
130281-60	NATUREL	Port du Havre - sédiments clapables	Oui
130281-61	NATUREL	Port du Havre - sédiments contaminés	Non
130281-62	NATUREL	Port du Havre - Chambre de stockage	Oui
130281-63	NATUREL	Port de Rouen	Non

Photographie des éprouvettes

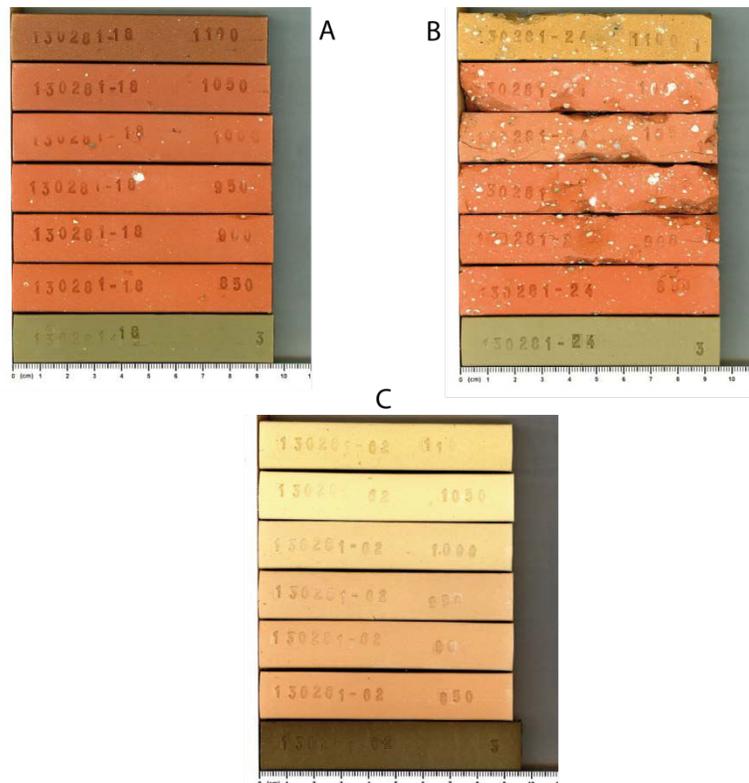


Figure 4-35 : Photographie des éprouvettes Cuissons Mesures du bassin versant de la Garonne A) 130281-18 B) 130281-24 C) 130281-62.

Comportement au séchage

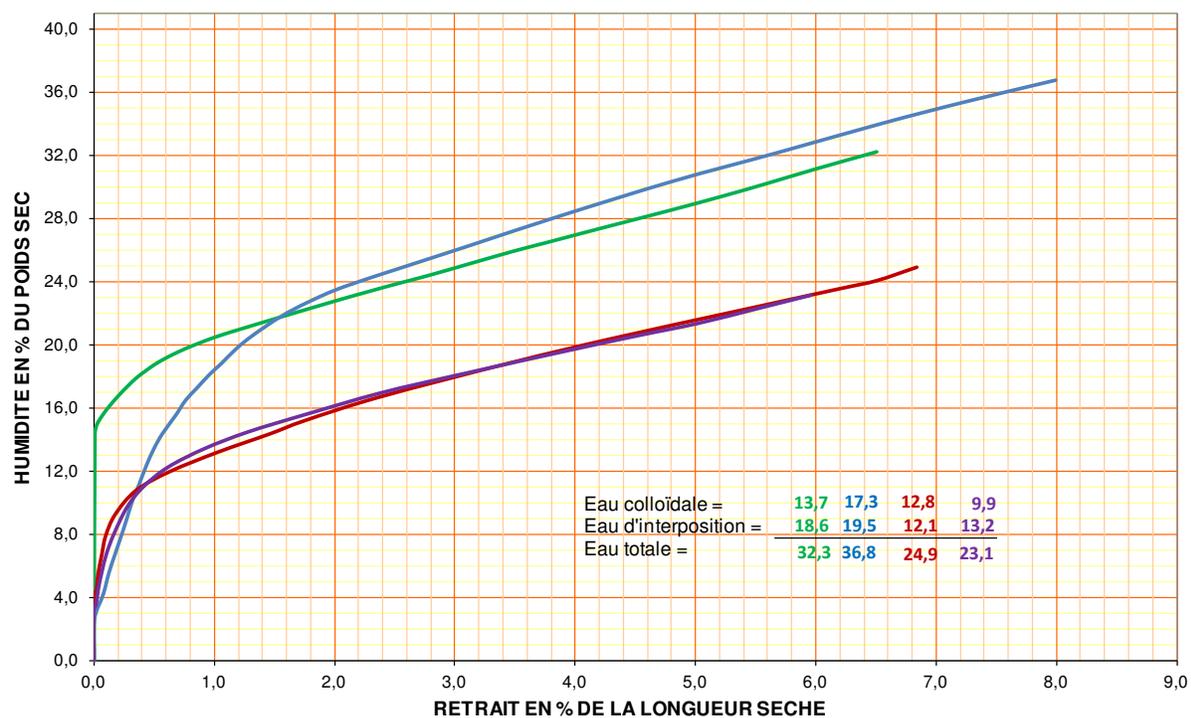


Figure 4-36 : Courbes de Bigot du bassin versant de la Seine (en rouge : 130281-18 ; en violet : 130281-24 ; en vert : 130281-60 ; en bleu : 130281-62)

	130281 - 18	24	60	62
Retrait de séchage (en % de la longueur sèche)	6,8	6,0	14,4	8,0
Eau en fin de retrait (en % de la masse sèche)	3,8	3,0	6,5	2,6

Comportement à la cuisson

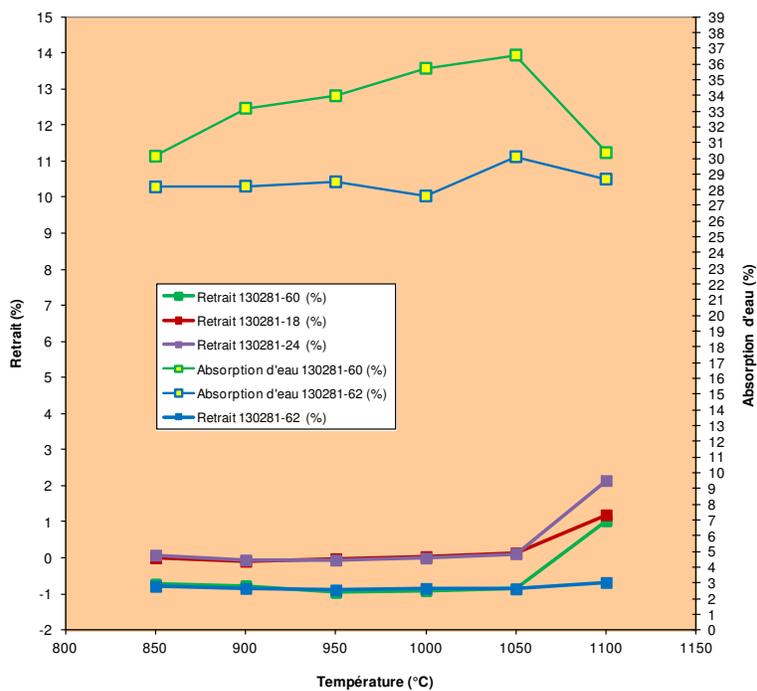


Figure 4-37 : Courbes de retrait et d'absorption d'eau à la cuisson des du bassin versant de la Seine (en rouge : 130281-18 ; en violet : 130281-24 ; en vert : 130281-60 ; en bleu : 130281-62)

Il est à noter que les mesures d'absorption d'eau n'ont pas pu être réalisées sur les échantillons 130281-18 et 130281-24 à cause de leur écaillage.

Analyses ATD/ATG

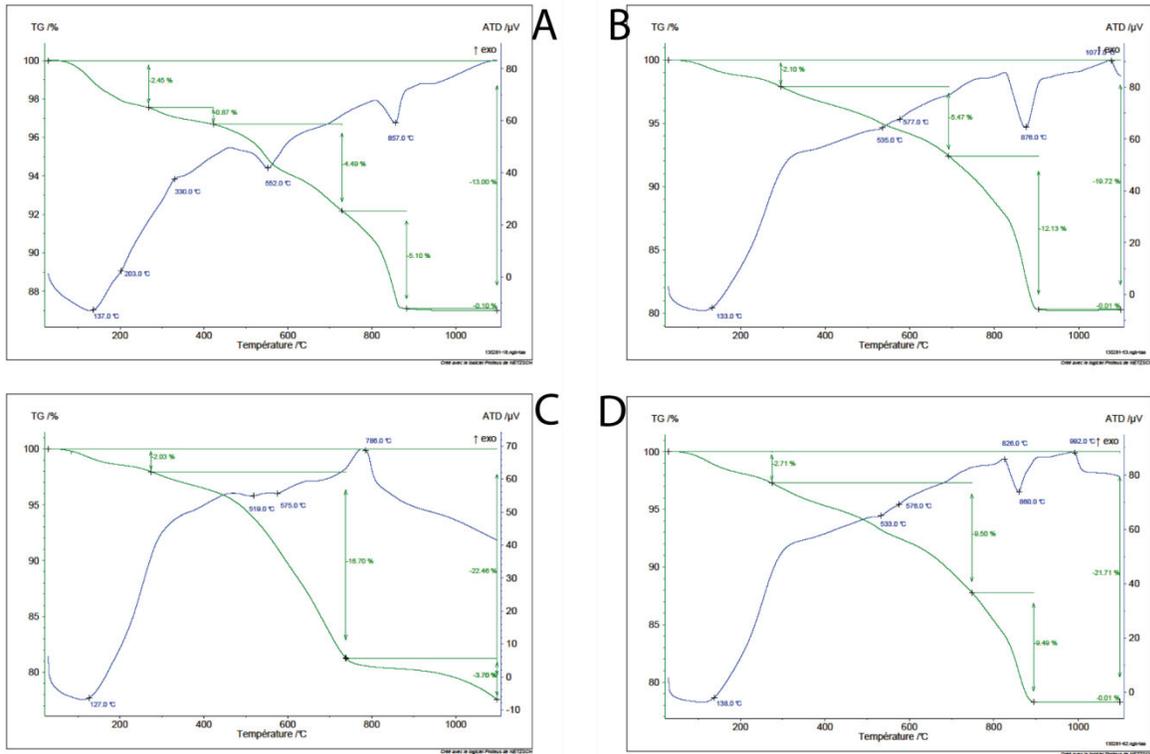


Figure 4-38 : Analyses ATD/ATG du bassin versant de la Seine (A) 130281-18 ; B) 130281-24 ; C) 130281-60 ; D) 130281-62).

Il est à noter que l'analyse n'a pas pu être réalisé sur l'échantillon 130281-24 à cause de son écaillage.

Résistance mécanique

Tableau 20 : Récapitulatif de la résistance (en MPa) à la flexion 3 points des mélanges du bassin versant de la Seine

Température de cuisson	130281-18	130281-24	130281-53	130281-60	130281-62
cru	9,4	5,2	3,8	2,9	4,2
950°C	17,5	-	5,8	2,6	10,3
1100°C	22,6	-	-	5,9	15,2

Bassin versant de la Garonne

Analyses chimique et granulométrique

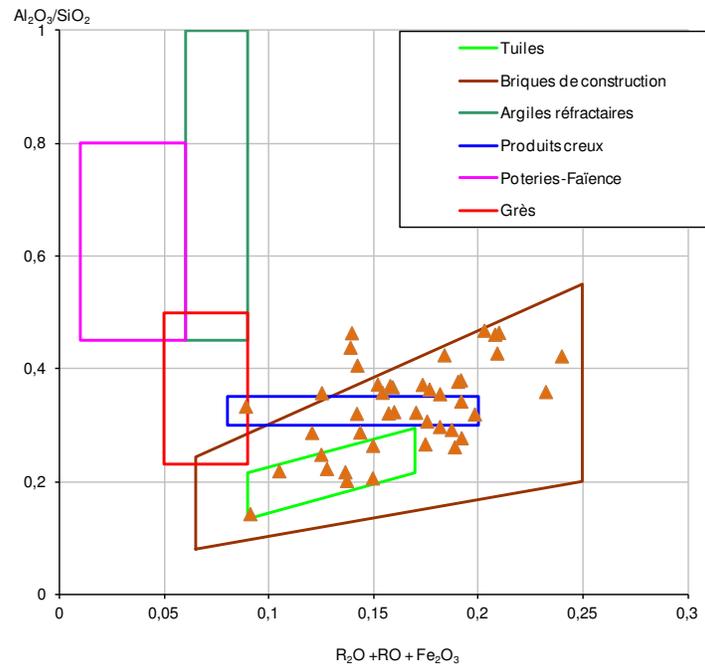


Figure 4-39 : Diagramme Augustinik des sédiments du bassin versant de la Garonne

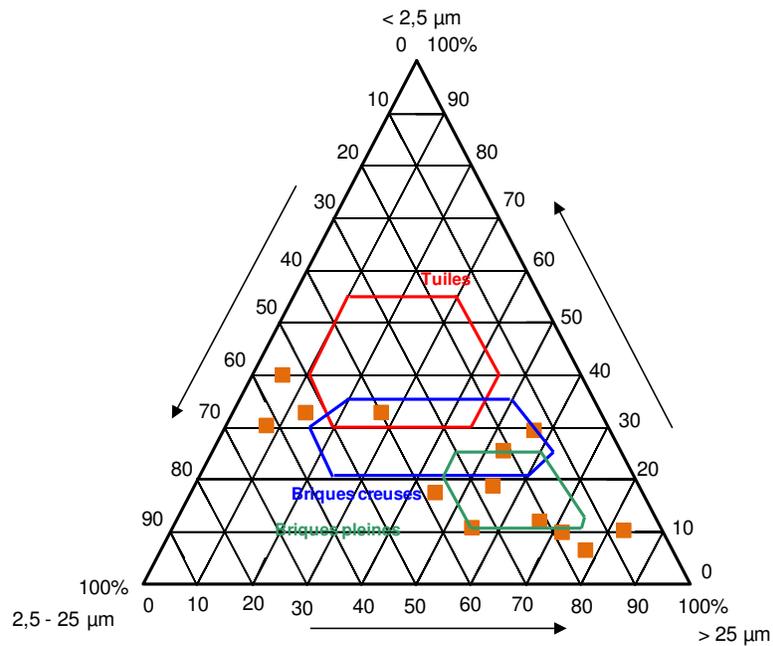


Figure 4-40 : Diagramme de Winkler des sédiments du bassin versant de la Garonne

Liste des échantillons

Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Désignation	Extrusion
130281-34	NATUREL	Grandval - Terre mouillade	Oui
130281-35	NATUREL	Grandval - Chateau Alleuze	Oui
130281-36	NATUREL	Grandval barrage	Impossible
130281-37	NATUREL	Grandval - plage de Mallet	Oui
130281-38	NATUREL	Grandval - Garabit	Oui
130281-43	NATUREL	Bort les Orgues - Monestier	Impossible
130281-44	NATUREL	St Etienne Cantalès	Impossible
130281-45	NATUREL	Sarrans	Oui
130281-46	NATUREL	Sarrans - Pont de Treboul	Oui
130281-47	NATUREL	Montezic	Impossible
130281-49	NATUREL	Lac de Pareloup	Oui
130281-50	NATUREL	Lac de Villefranche	Impossible
130281-51	NATUREL	Lac de Ravièges	Impossible

Photographie des éprouvettes

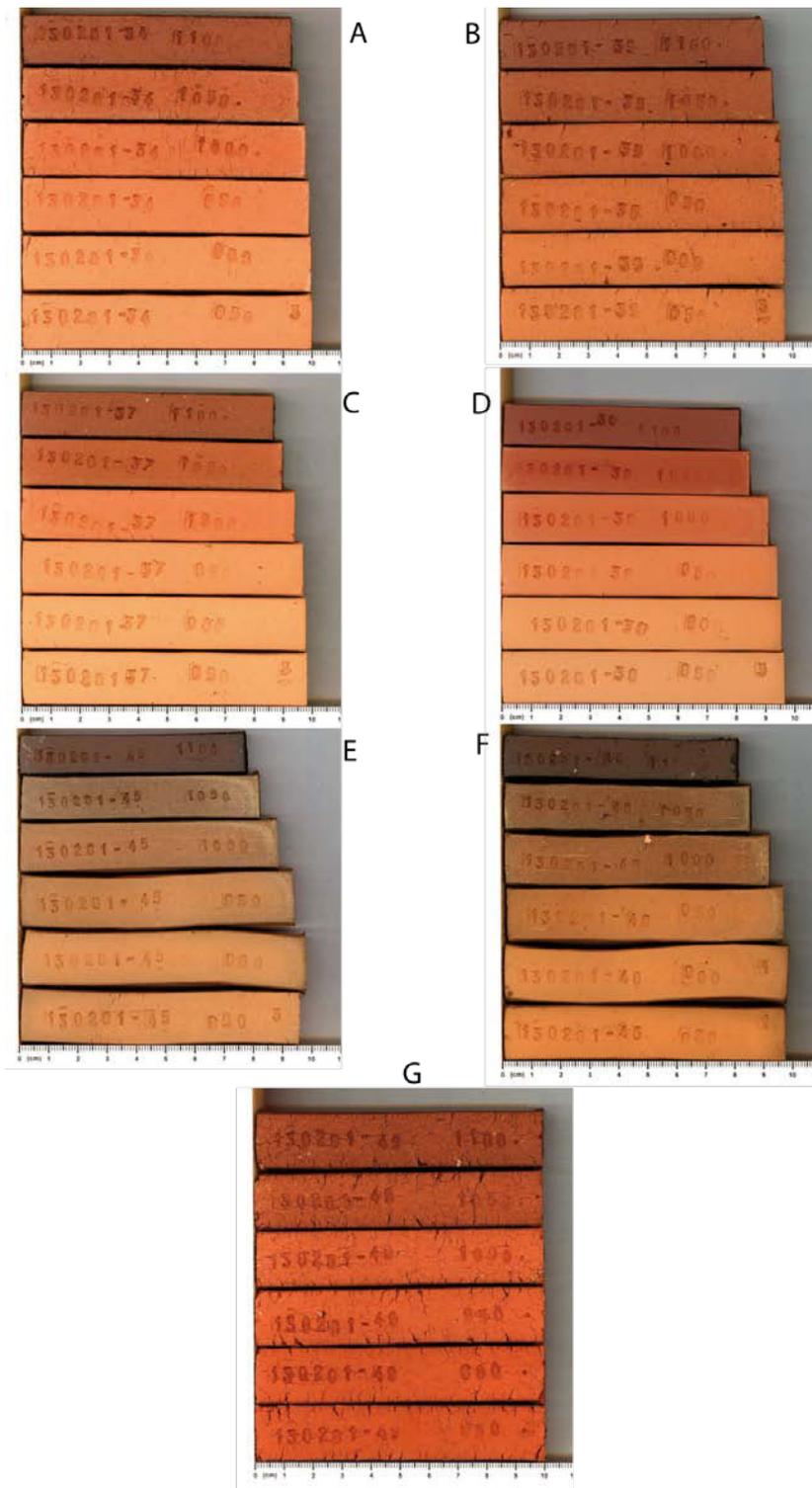


Figure 4-41 : Photographie des éprouvettes Cuissons Mesures du bassin versant de la Garonne A) 130281-34 B) 130281-35 C) 130281-37 D) 130281-38 E) 130281-45 F) 130281-46 G) 130281-49

Comportement au séchage

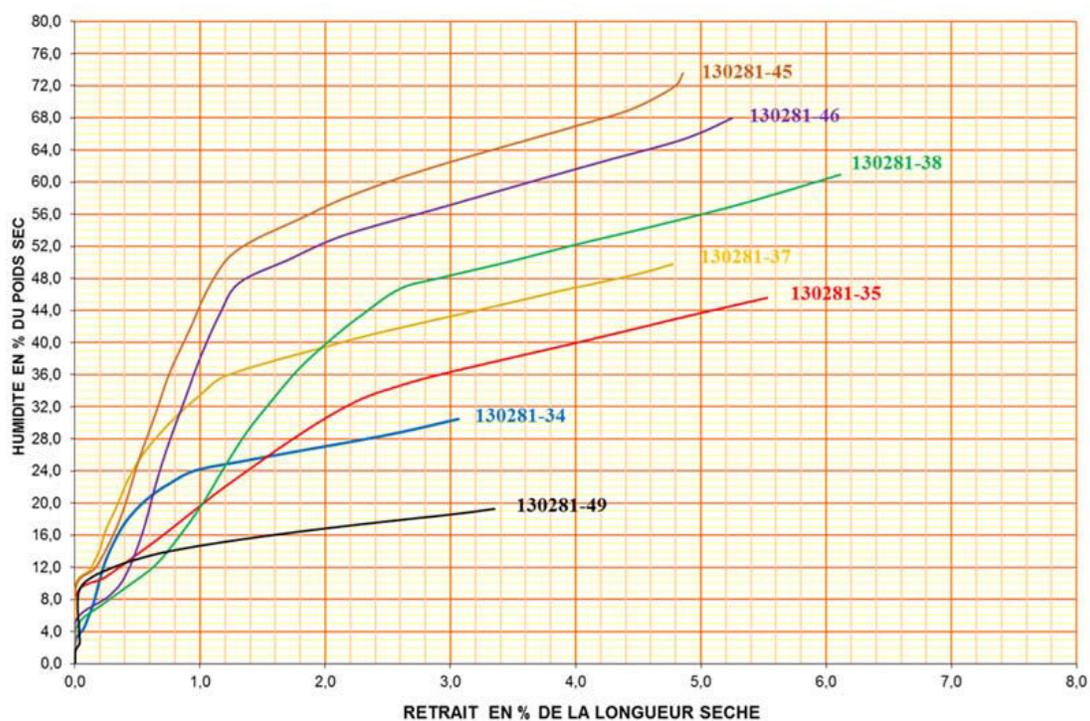


Figure 4-42 : Courbes de Bigot du bassin versant de la Garonne. (en bleu : 130281-34 ; en rouge : 130281-35 ; en jaune : 130281-37 ; en vert : 130281-38 ; en marron : 130281-45 ; en violet : 130281-46 ; en noir : 130281-49).

130281 -	34	35	37	38	45	46	49
Retrait de séchage (en % de la longueur sèche)	3,3	5,5	4,8	6,1	4,9	5,2	3,3
Eau en fin de retrait (en % de la masse sèche)	3,0	8,5	9,9	4,7	9,5	5,5	1,6

Comportement à la cuisson

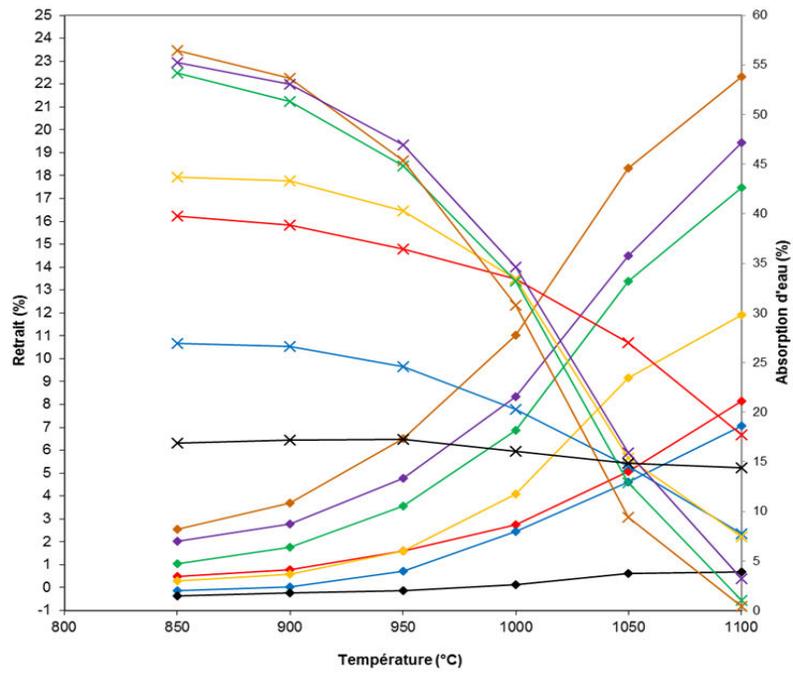


Figure 4-43 : Courbes de retrait et d'absorption d'eau à la cuisson du bassin versant de la Garonne

Analyses ATD/ATG

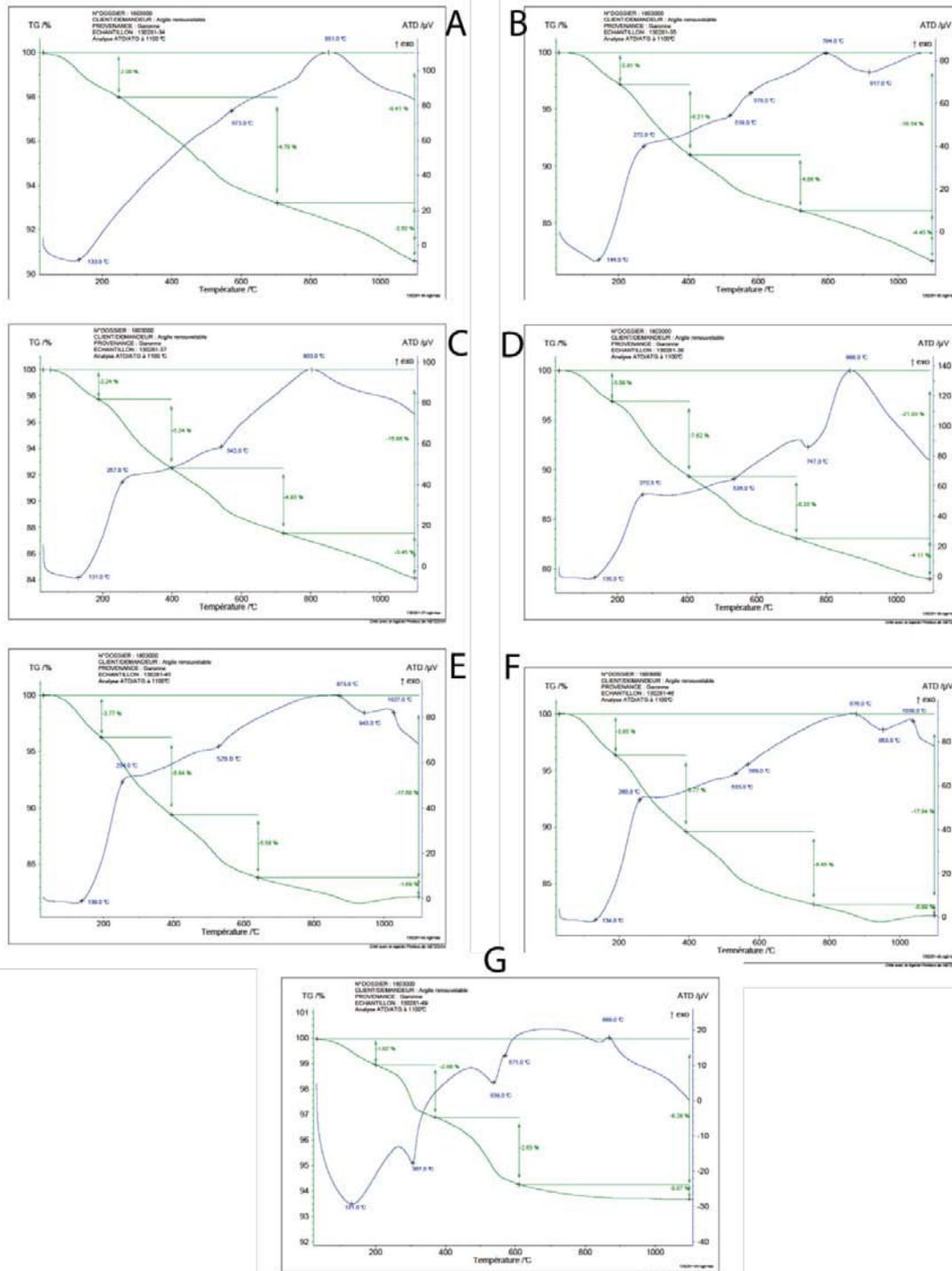


Figure 4-44 : Analyses ATD/ATG du bassin versant de la Garonne (A) 130281-34 ; B) 130281-35 ; C) 130281-37 ; D) 130281-38 ; E) 130281-45 ; F) 130281-46 ; G) 130281-49).

Analyse thermo-dilatométrique

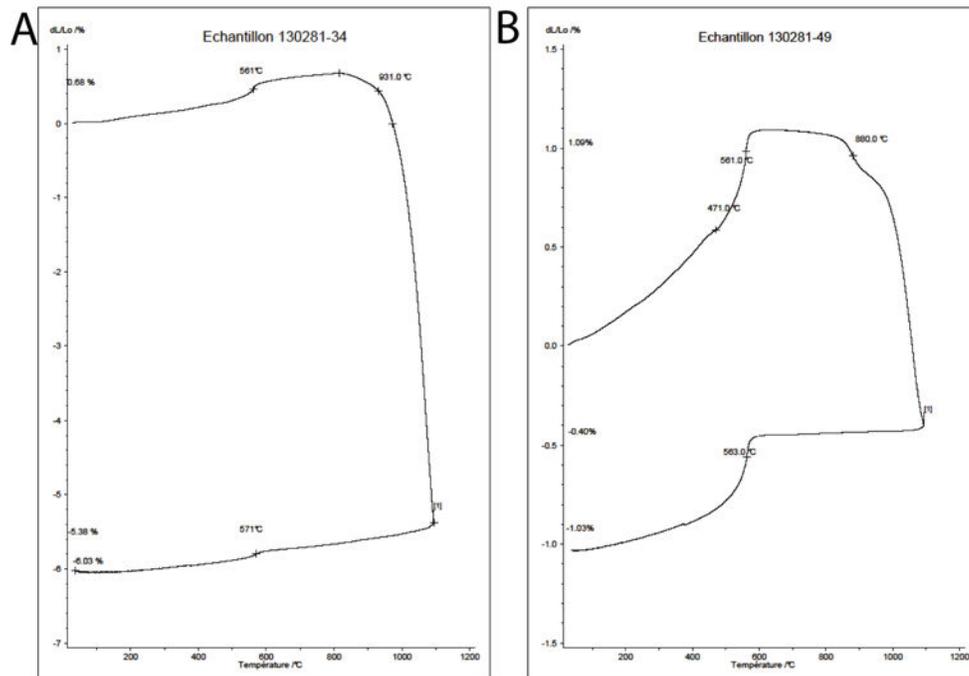


Figure 4-45 : Analyses thermo-dilatométrique du bassin versant de la Garonne (A) 130281-34 ; B) 130281-49

Il est à noter que nous avons choisi de réaliser ces analyses que sur deux échantillons en considérant qu'ils peuvent être représentatifs de la retenue où ils ont été prélevé.

Résistance mécanique

Tableau 21 : Récapitulatif de la résistance (en MPa) à la flexion 3 points des mélanges du bassin versant de la Garonne

Température de cuisson	130281-34	130281-35	130281-37	130281-38	130281-45	130281-46	130281-49
cru	1,5	2,3	1,9	3,2	1,7	2,0	0,7
950°C	2,5	1,4	2,9	5,1	5,7	3,1	0,8
1100°C	7,7	5,9	15,5	22	-	-	1,1

Estuaire de la Rance

Analyses chimique et granulométrique

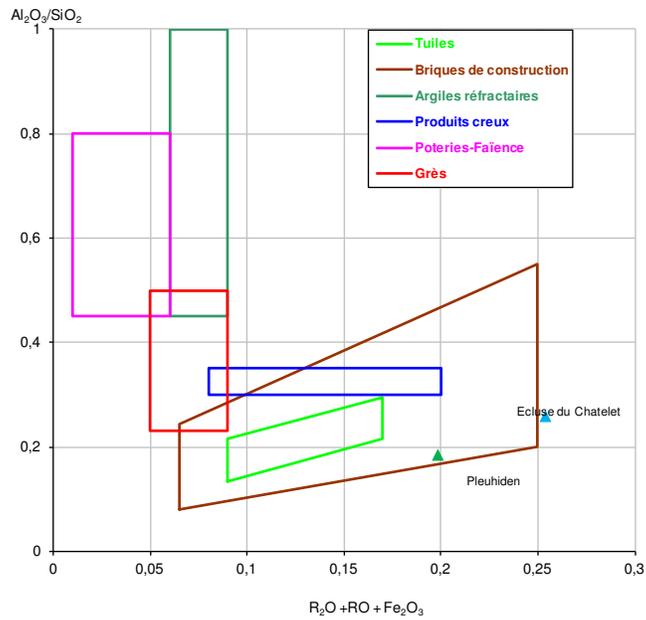


Figure 4-46 : Diagramme Augustinik des sédiments d'estuaire de la Rance

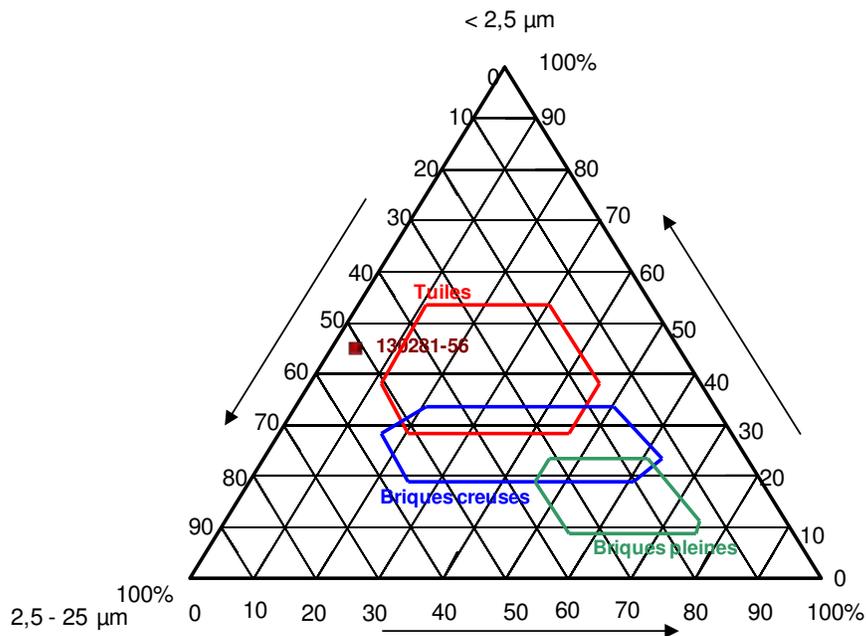


Figure 4-47 : Diagramme de Winkler des sédiments de l'estuaire de la Rance

Photographie des éprouvettes



Figure 4-48 : Photographie des éprouvettes Cuissons Mesures de l'estuaire de la Rance (130281-56)

Comportement au séchage

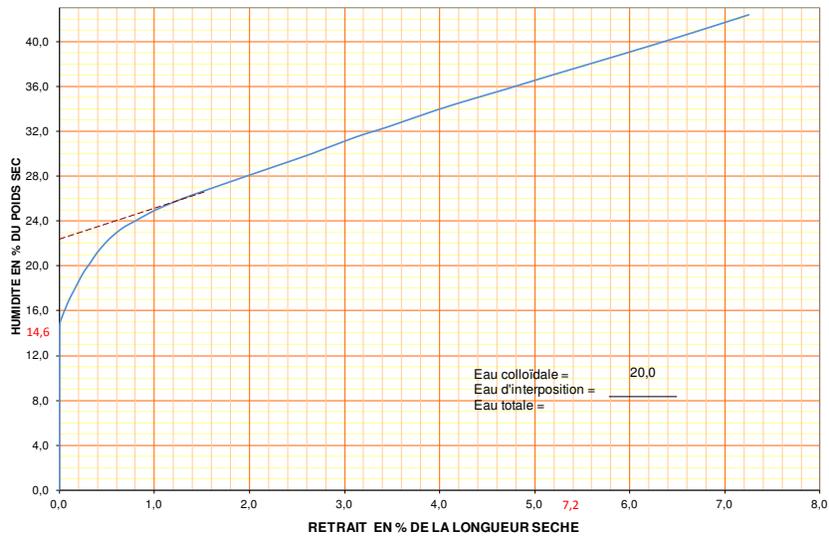


Figure 4-49 : Courbes de Bigot de l'estuaire de la Rance

Retrait de séchage (en % de la longueur sèche)	7,2
Eau en fin de retrait (en % de la masse sèche)	14,6

Comportement à la cuisson

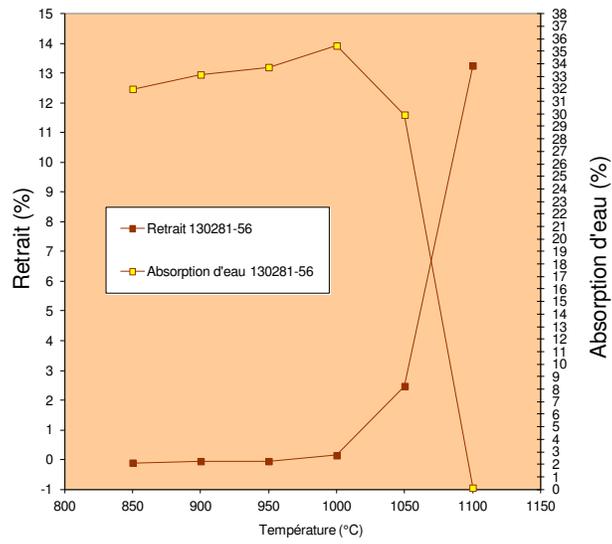


Figure 4-50 : Courbes de retrait et d'absorption d'eau à la cuisson de l'estuaire de la Rance

Analyses ATD/ATG

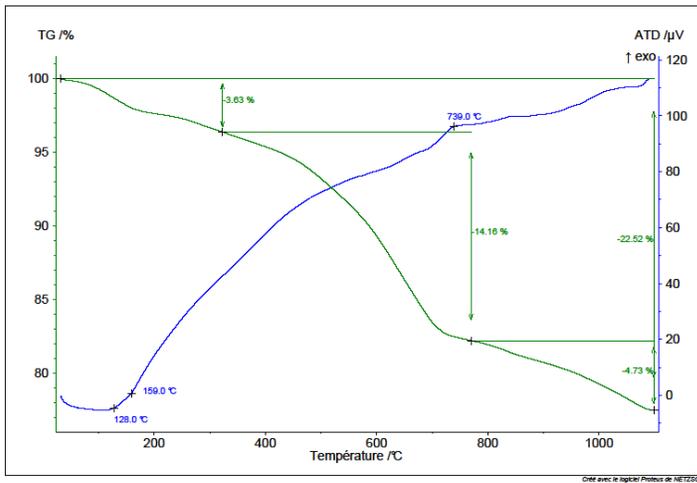


Figure 4-51

Résistance mécanique

Température de cuisson	130281-56
cru	5,3
950°C	5,1
1100°C	45,2

Systemes côtiers

Le pertuis Breton

Analyses chimique et granulométrique

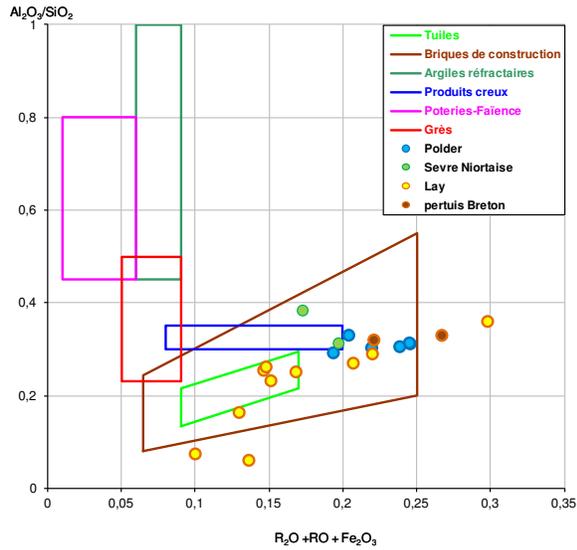


Figure 4-52 : Diagramme Augustinik des sédiments du pertuis Breton et des bassins versants associés

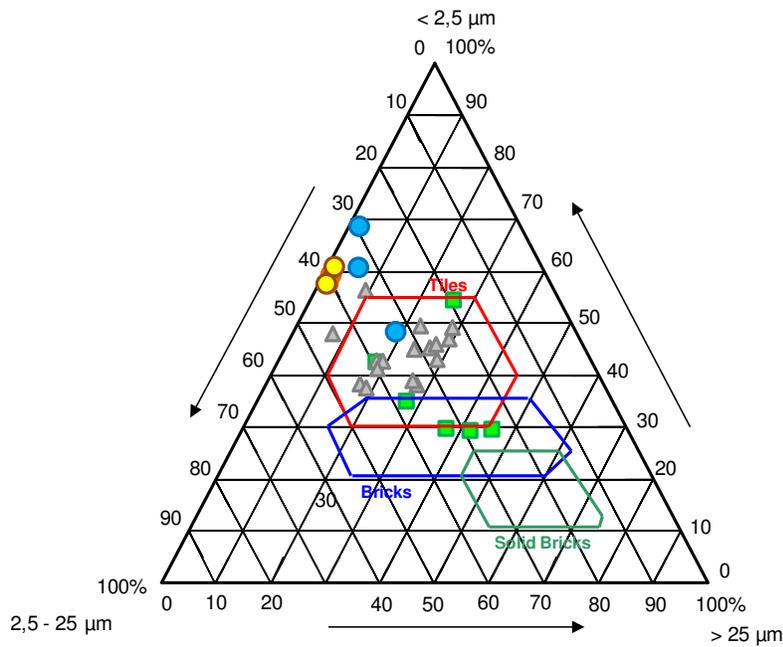


Figure 4-53 : Diagramme de Winkler des sédiments du pertuis Breton et des bassins versants associés

Liste des échantillons

Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Désignation	Extrusion
130281-2	NATUREL	Moricq - Lay	Oui
130281-3	NATUREL	Sortie estuaire - Lay	Oui
130281-4	NATUREL	Port Aiguillon - Lay	Oui
130281-5	NATUREL	Les Mothes - Lay	Oui
130281-6	NATUREL	Barrage Braud - Lay	Oui
130281-27	NATUREL	Marillet	Oui
130281-28	NATUREL	Champagné les Marais - Route pointe aux herbes	Oui
130281-29	NATUREL	Observatoire de l'Aiguillon - digues 1965/12	Oui
130281-64	MELANGE	80% 130281-4 20% chamotte	Oui

Photographie des éprouvettes

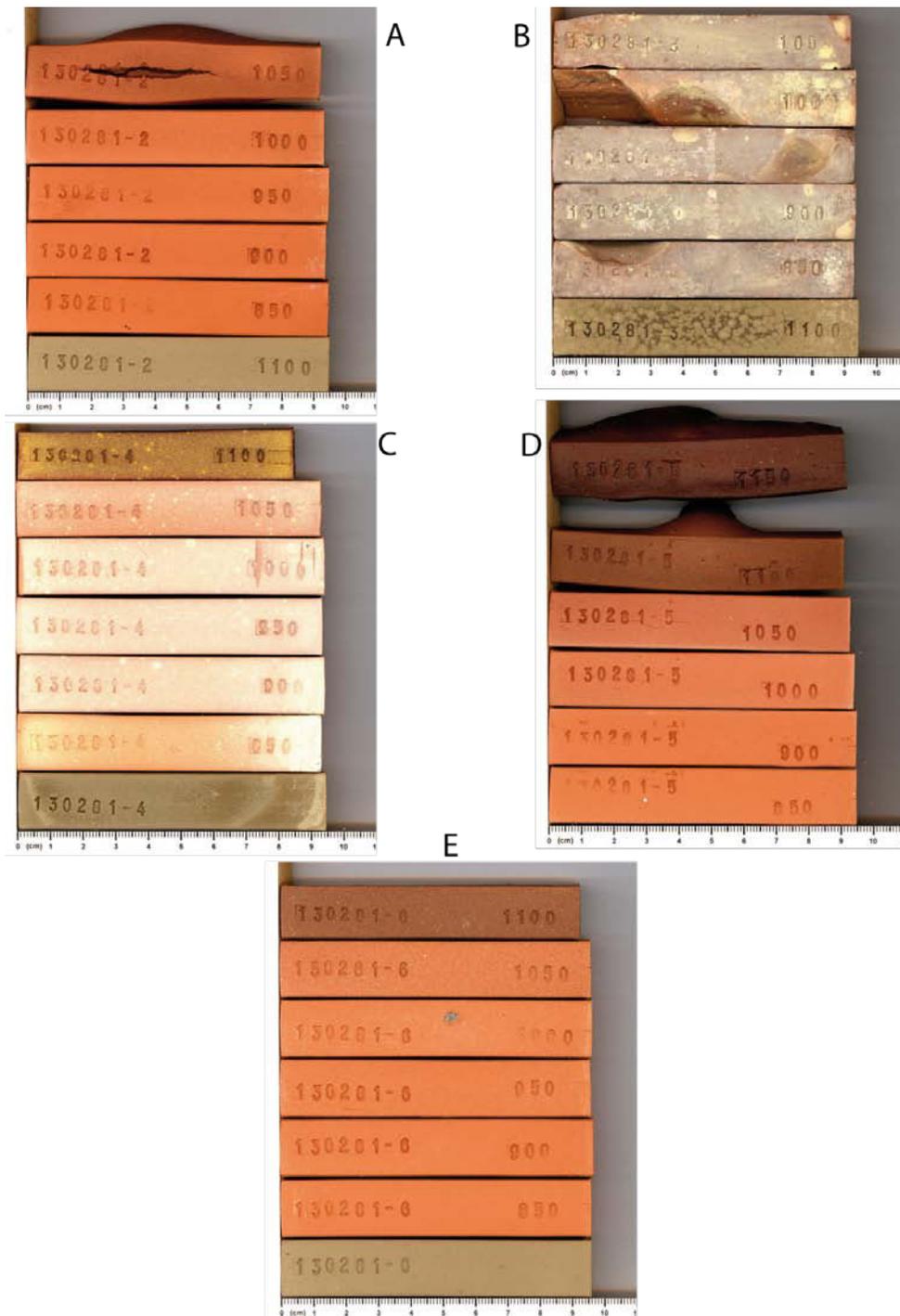


Figure 4-54 : Première partie des photographie des éprouvettes Cuissons Mesures du pertuis Breton (A) 130281-2 ; B) 130281-3 ; C) 130281-4 ; D) 130281-5 ; E) 130281-6).

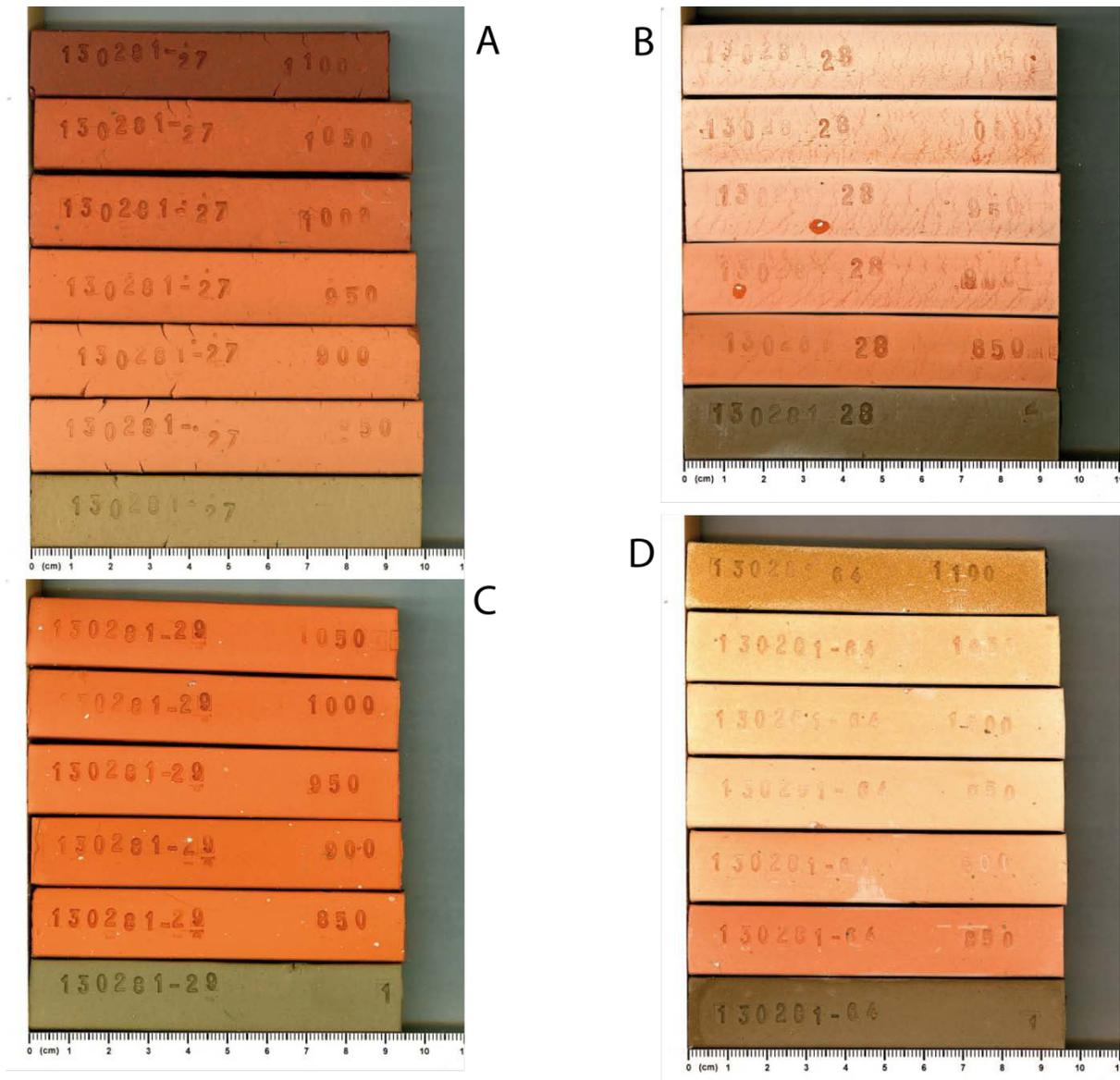


Figure 4-55 : Deuxième partie des photographie des éprouvettes Cuissons Mesures du pertuis Breton (A) 130281-27 ; B) 130281-28 ; C) 130281-29 ; D) 130281-64).

Comportement au séchage

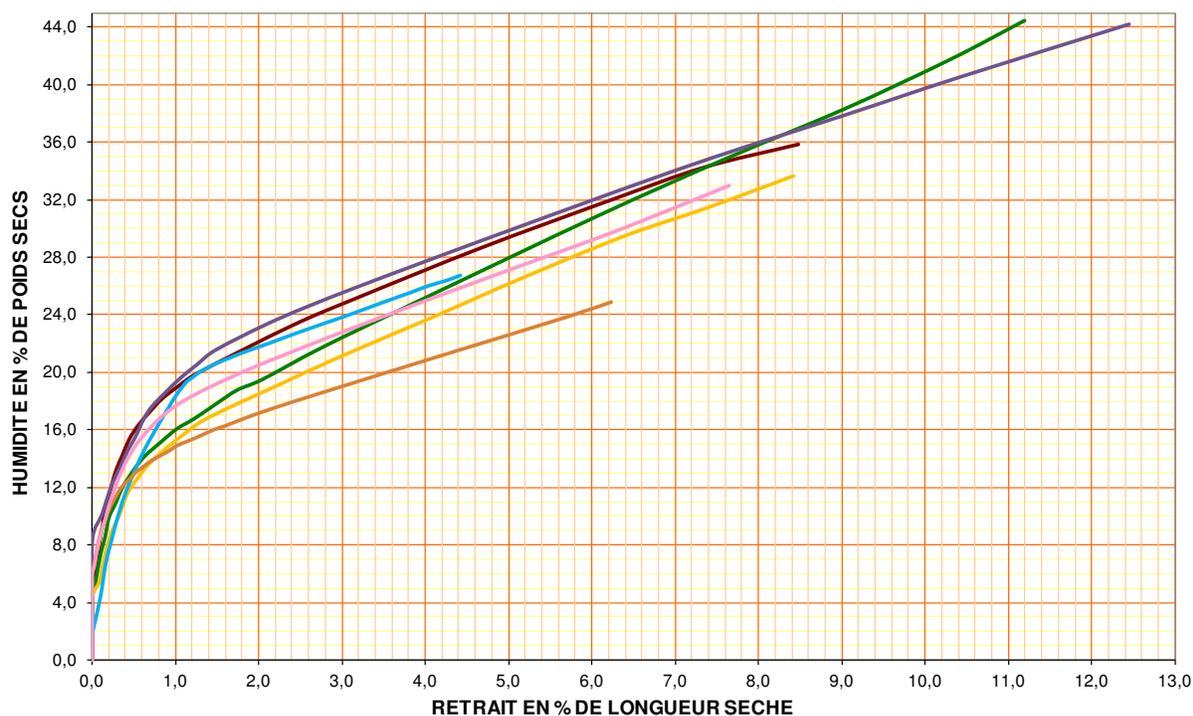


Figure 4-56: Courbes de Bigot du pertuis Breton. (en rouge : 130281-2 ; en vert : 130281-3 ; en violet : 130281-4 ; en jaune : 130281-5 ; en bleu : 130281-27 ; en orange : 130281-28 ; en rose : 130281-29)

130281 -	2	3	4	5	6	27	28	29	64
Retrait de séchage (en % de la longueur sèche)									
Eau en fin de retrait (en % de la masse sèche)									

Comportement à la cuisson

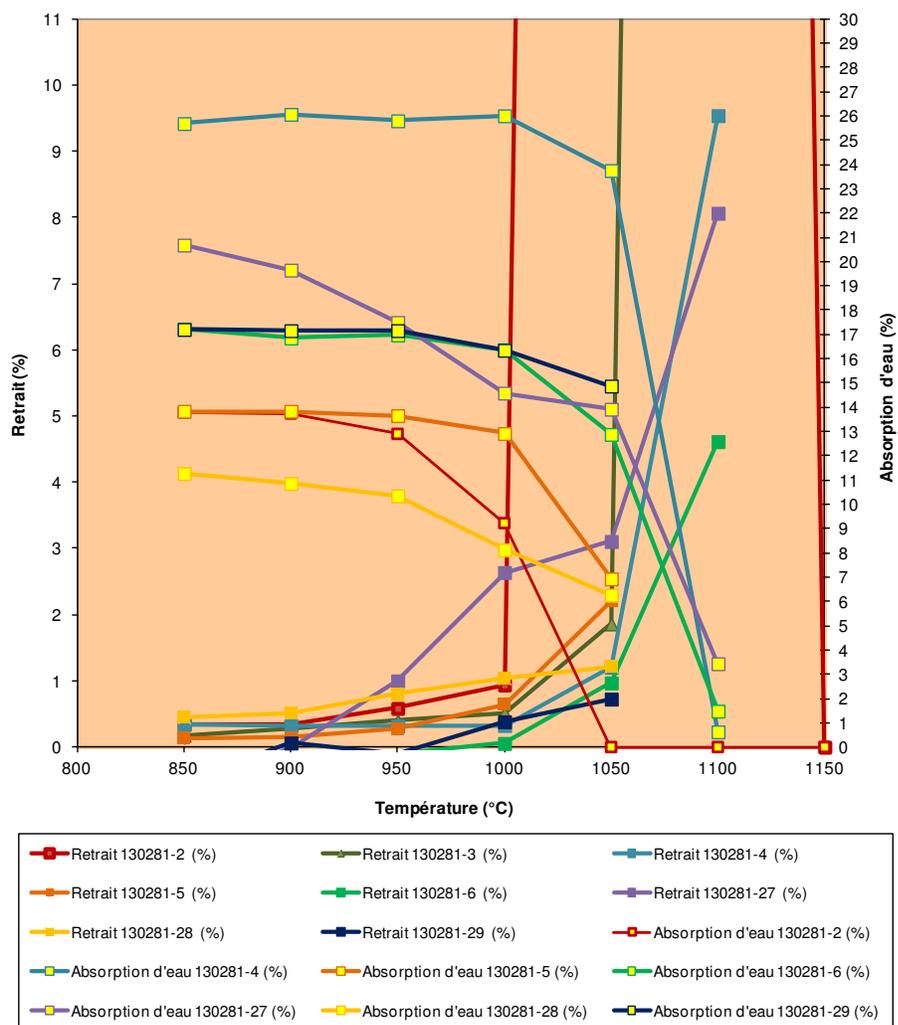


Figure 4-57 : Courbes de retrait et d'absorption d'eau à la cuisson du pertuis Breton

Analyses ATD/ATG

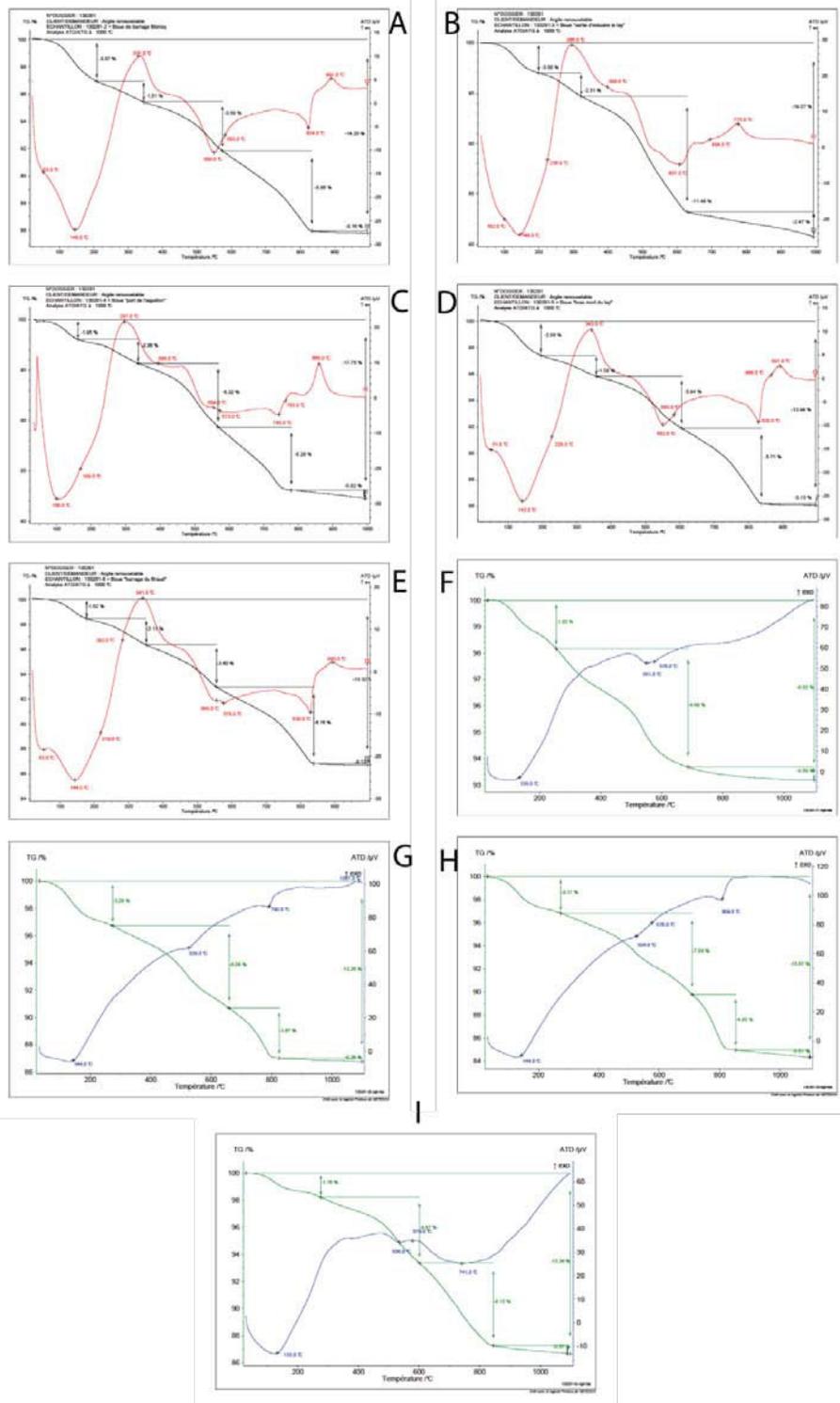


Figure 4-58 : Analyses ATD/ATG du pertuis Breton (A) 130281-2 ; B) 130281-3 ; C) 130281-4 ; D) 130281-5 ; E) 130281-6 ; F) 130281-27 ; G) 130281-28 ; H) 130281-29 ; I) 130281-64).

Résistance mécanique

Température de cuisson	130281-2	130281-3	130281-4	130281-5	130281-6	130281-27	130281-28	130281-29	130281-64
cru	9,7	4,5	9,7	8,9	10,6	4,4	4,8	10,7	5,6
950°C	24,1		16,9	24,1	16,8	4,9	8,6	22,1	14,5
1100°C			50,8		29,3	15,9			26,9

Le pertuis d'Antioche

Analyses chimique et granulométrique

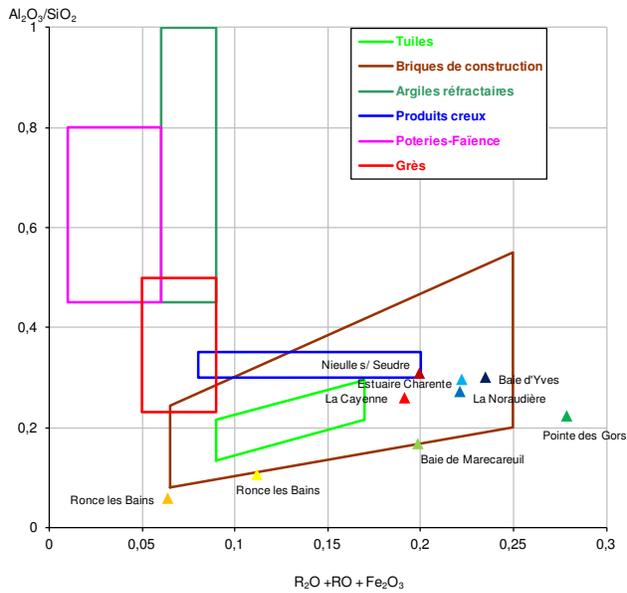


Figure 4-59 : Diagramme Augustinik des sédiments du pertuis d'Antioche et des bassins versants associés

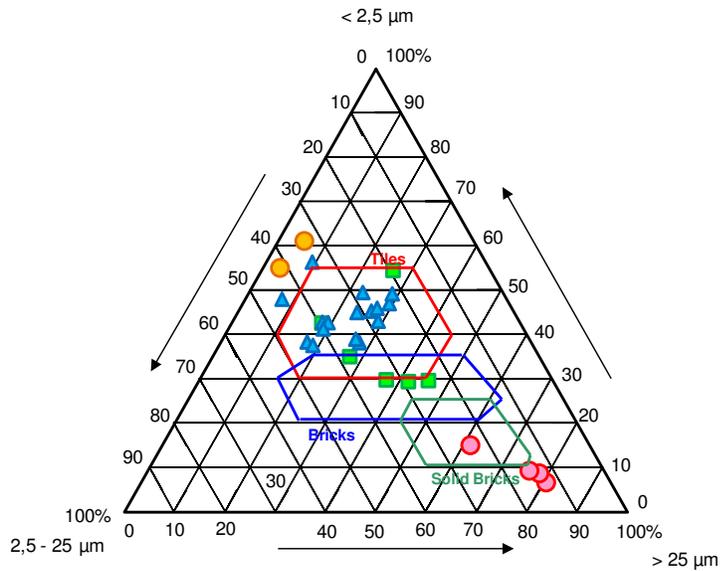


Figure 4-60 : Diagramme de Winkler des sédiments du pertuis d'Antioche et des bassins versants associés

Liste des échantillons

Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Localisation	Extrusion
130281-32	NATUREL	Nieulle sur Seudre	Oui
130281-33	NATUREL	Noraudière	Oui
130281-39	NATUREL	Mas Chaban - barrage	Non
130281-40	NATUREL	Mas Chaban - amont	Non
130281-41	NATUREL	Lavaud - la Gerlie	Non
130281-42	NATUREL	Lavaud - barrage	Non

Photographie des éprouvettes

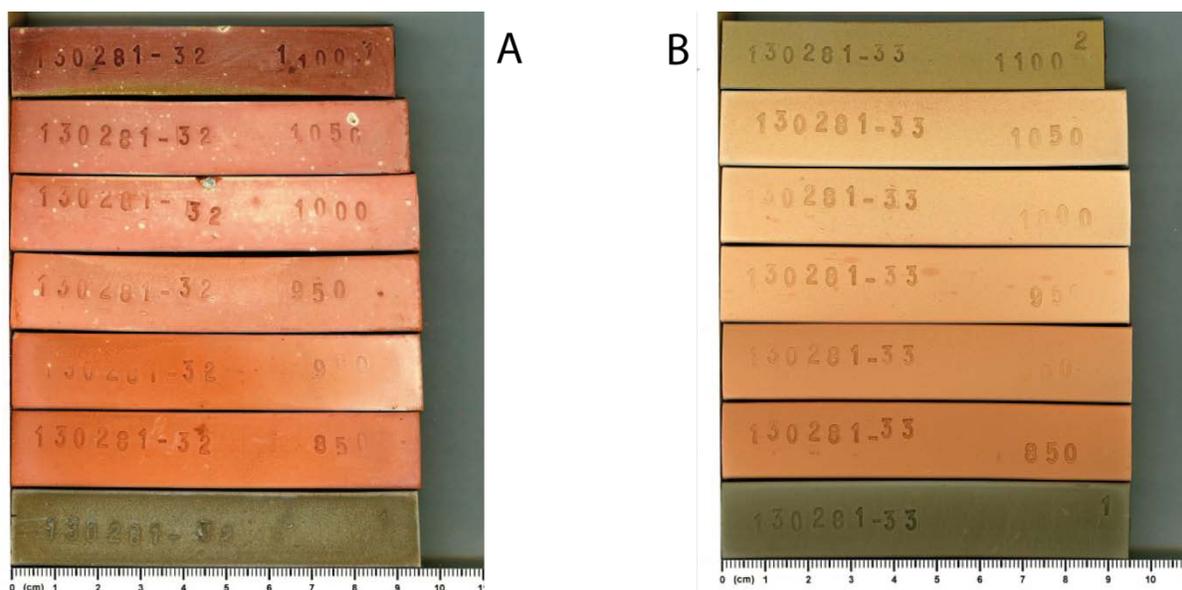


Figure 4-61 : Photographie des éprouvettes Cuissons Mesures du pertuis d'Antioche (A) 130281-32 ; (B) 130281-33)

Comportement au séchage

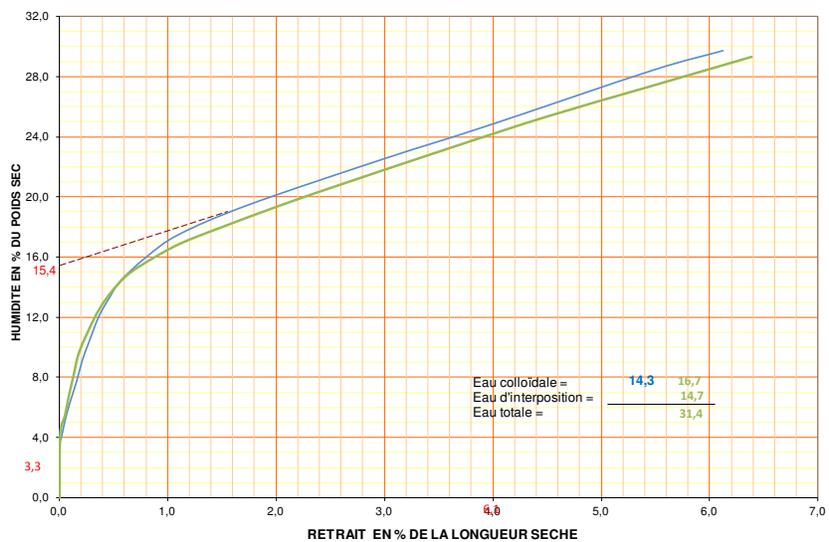


Figure 4-62 : Courbes de Bigot du pertuis d'Antioche. (en vert : 130281-32 ; en bleu : 130281-33)

130281 -	32	33
Retrait de séchage (en % de la longueur sèche)	7,3	6,1
Eau en fin de retrait (en % de la masse sèche)	4,3	3,3

Comportement à la cuisson

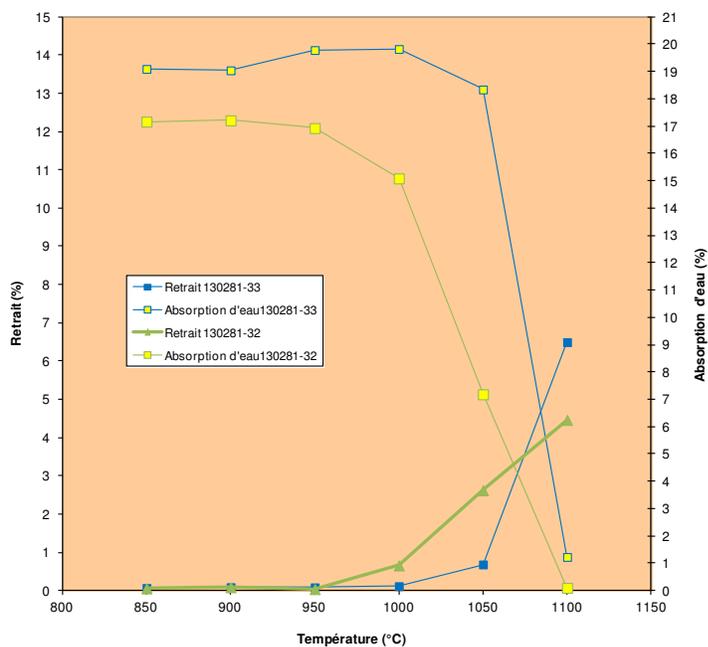


Figure 4-63 : Courbes de retrait et d'absorption d'eau à la cuisson du pertuis d'Antioche

Analyses ATD/ATG

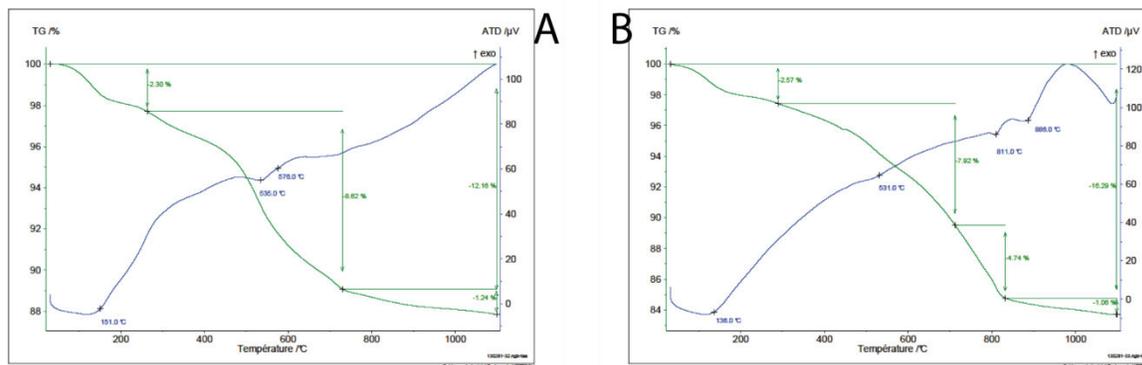


Figure 4-64 : Analyses ATD/ATG du pertuis d'Antioche (A) 130281-32 ; B) 130281-33

Résistance mécanique

Température de cuisson	130281-32	130281-33
cru	6,6	10,5
950°C	13,8	26,7
1100°C	39,5	57,2

Le bassin d'Arcachon

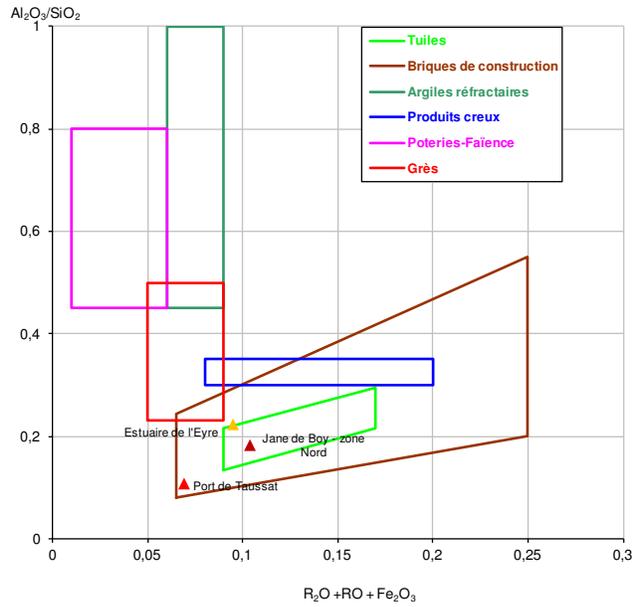


Figure 4-65 : Diagramme Augustinik des sédiments du bassin d'Arcachon

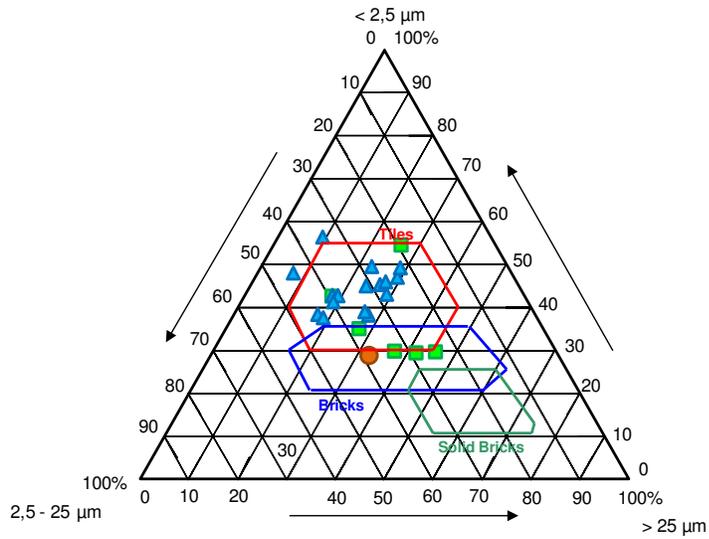


Figure 4-66 : Diagramme de Winkler des sédiments du bassin d'Arcachon

La baie du Mont Saint Michel

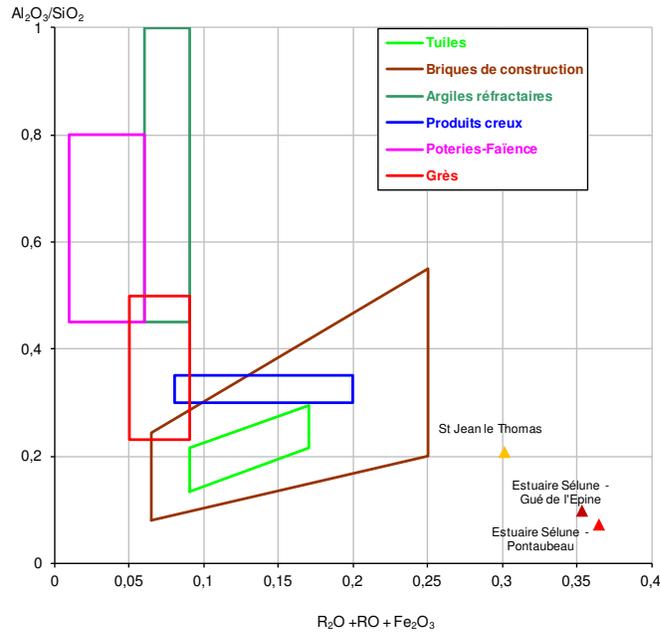


Figure 4-67 : Diagramme Augustinik des sédiments de la baie du Mont Saint Michel

Caractérisation d'atterrissements d'argiles récents sur le territoire français, en vue de leur valorisation dans l'industrie des matériaux de construction en terre cuite

RESUME : La préservation des ressources naturelles prend une part de plus en plus importante dans nos sociétés. Les matières premières de l'industrie de la terre cuite sont considérées comme non-renouvelables car prélevées dans des formations géologiques fossiles. Dans ce contexte, les atterrissements d'argiles actuels des systèmes fluviaux et côtiers constituent des alternatives à l'exploitation de ces séries. L'objectif de cette thèse est d'évaluer d'une part le renouvellement de la ressource en matériaux fins en France; et d'autre part, de développer des méthodes permettant une utilisation de ces sédiments pour réduire le volume de matériaux fossiles.

Une première évaluation sur le territoire français a permis de mettre en évidence que le renouvellement de la source de matériaux fins est assuré par les dépôts fluvio-lacustres et ceux des baies côtières estuariennes avec l'accumulation de plus de 20 Mm³/an; en particulier dans les atterrissements créés par l'homme.

Le développement d'un Cadre Minéralogique de Référence (CMR) à partir de mélanges de production a permis l'évaluation des sites en prenant en compte la composition des sédiments fins. Ce CMR constitue une méthode rapide d'évaluation d'un site à la place de l'approche classique qui nécessite de nombreux essais. Celle-ci est réservée aux sites dont le potentiel a été validé par le CMR. Suite à l'évaluation par le CMR, seule une partie de la source, environ 5 Mm³/an, remplit les critères de l'industrie de la terre cuite qui consomme environ 3,5 Mm³/an. La ressource en matériaux fins paraît donc renouvelable.

Enfin, la réalisation de mélanges, avec des dégraissants ou des sédiments fins aux propriétés complémentaires, permet d'envisager la valorisation d'atterrissements écartés par manque de compatibilité minéralogique.

Mots clés : sédiments fins, valorisation, ressources, briques, tuiles

Characterization of modern fine-grained deposits in France in order to investigate their potential as building material

ABSTRACT : Preservation of natural resources becomes an important issue in our societies. Raw materials of the fired-clay industry are considered as non-renewable because there are extracted from fossil geologic formations. In this context, current fine-grained deposits of fluvial and coastal systems constitute alternatives to the quarrying of geologic formations. The aim of this thesis is firstly to assess, within France, the renewal of the resource for such materials; and secondly, to seek alternative methods to enhance the use of such sediments to reduce the yearly volume of fossil sediments consumed by fired-clay industry.

A first evaluation allowed highlighting that the renewal of the source of fine sediments is provided by the fluvial and coastal deposits with more than 20 Mm³/yr especially in relation to hydraulic management.

Development of a Mineralogical Reference Framework (MRF) from industrial mixtures allowed the evaluation of sites taking into account the sediment composition. This MRF constitutes a rapid screening of a site compared to the classic method that necessitates several experiments. This is to be applied to sites which potential has been validated by the MRF.

Only a part of the source, about 5 Mm³, can be used by the fired-clay industry which consumes 3,5 Mm³/yr. Fine material resource seems to be renewable.

Finally, the realization of mixtures with shortening agents or other sediments with complementary properties allows valuing a larger number of fine-grained deposits.

Keywords : fine sediments, valorization, resources, bricks, tiles