Nous avons au fil des chapitres passé en revue les modèles de pluie, captation et infiltration / ruissellement permettant d'intégrer l'essentiel des aspects dynamiques sur parcelle agricole (climat, couvert végétal, travail du sol, battance), leur couplage au modèle de bilan hydrique BILHYNA, ainsi que la détermination de l'ensemble des paramètres. Nous allons maintenant tester le réalisme des modèles développés en confrontant les résultats numériques à nos mesures (ruissellement et humidité du sol), et étudier l'apport de la modélisation de la captation et de l'infiltration / ruissellement sur les résultats du bilan hydrique, et les conséquences sur les transferts hydrologiques (drainage, remontées capillaires, ruissellement).

Nous traiterons tout d'abord de la captation, puis de l'infiltration / ruissellement pour lequel nous confronterons les résultats du modèle à nos mesures de ruissellement. Ces deux premiers volets permettront de dégager les caractéristiques et les conséquences de la captation et du ruissellement. Nous étudierons ensuite plus précisément le bilan hydrique et les impacts de la captation et du ruissellement sur les années 1998, 1999 et 2000, en confrontant les résultats des simulations et des mesures d'humidité du sol (TDR, gravimétrie).

I) Etude de la captation

La captation est un processus simple à calculer dans les grands traits, mais néanmoins largement négligé dans les modèles de bilan hydrique malgré que la bibliographie en rapporte des ordres de grandeur parfois assez conséquents (cf. chapitre introductif). Nous avons donc mené une estimation de la question dans les conditions de couvert de maïs de notre site expérimental, à partir du modèle simple de captation couplé au modèle de bilan hydrique BILHYNA.
Nous n'avons pas directement testé expérimentalement les résultats du modèle de captation, ce qui constitue une lacune importante de notre travail. Néanmoins, la base physique du modèle, ainsi que la mesure précise du LAI et de la capacité de saturation du couvert de maïs, doivent *a priori* permettre d'obtenir des résultats numériques fiables en moyenne.

- ***Eléments d'étude statistique de la captation et de son rôle dans le bilan hydrique***

Nous avons étudié la sensibilité du modèle de captation dans le cas de pluies isolées. Dans le présent paragraphe, nous tentons de mettre en évidence certaines données statistiques caractéristiques de la captation à partir de simulations portant sur de longues périodes.

Nous avons tout d'abord regardé la variabilité du processus en fonction de la saison, sur un couvert constant de maïs (LAI = 3.5m²/m²), sur un sol constamment à la capacité au champ (d'où couvert transpirant à l'ETM), avec le modèle de « pluies instantanées » sur la période 01/10/98 - 31/12/00. Nous obtenons les résultats présentés dans le tableau n°24. Nous précisons que la période étudiée amène à un nombre de jours inégal pour chaque saison, aussi faut-il rapporter les termes de la captation en fonction du cumul saisonnier des pluies.

	Pluie (mm)	**Captation (eau stockée et évaporée) (mm)**	**Abaissement ET végétation (mm)**	**(% de la captation)**	**Bilan de la captation (mm)**	**(% des pluies)**
Printemps (184 jours)	411.1	74.4	28.2	37.9	46.1	11.22
Eté (184 jours)	413.6	54.8	34.4	62.8	20.5	4.95
Automne (263 jours)	683.5	110.7	63.9	57.7	46.9	6.86
Hiver (191 jours)	317.1	70.7	38.7	54.7	32.0	10.09

Tableau n°24 : *résultats de la captation selon la saison sur un couvert de maïs mature et un sol restant à la capacité au champ, à partir des pluies instantanées (01/10/98 – 31/12/00)*

Ces chiffres nous donnent de premiers éléments de la variabilité saisonnière de la captation. La captation apparaît la plus forte au printemps et de loin la plus faible en été. Ceci indique que, à caractéristiques de feuillage - et dans une moindre mesure de transpiration - égales, les cultures d'hiver et de printemps devraient être celles qui génèrent la captation la plus importante. Ceci

indique également qu'un couvert de maïs sénescent laissé sur pied en automne (suite à un retardement de la moisson par exemple) conduira à une captation largement accrue.
Nous voyons également que lorsque le couvert transpire à l'ETM, comme ici, le terme d'abaissement de la transpiration représente la moitié de la quantité captée et évaporée (moyenne 53.3%), avec une certaine variabilité saisonnière (taux le plus faible au printemps avec 37.9%, et le plus fort en automne avec 57.7%) ; ces chiffres sont tout à fait cohérents avec la valeur du coefficient de « transpiration relative » présenté par RUTTER (1975) (cf. fin du chapitre introductif).

Nous étudions maintenant la captation sur couvert de maïs en conditions plus « réalistes » (sol d'humidité variable), avec couplage du modèle de captation au modèle de bilan hydrique BILHYNA, sur la période 1993-2000 (8 années entières), en utilisant les pluies horaires réparties en modèle gaussien (durée effective horaire = 0.55h). Les valeurs de LAI du couvert (cf. chapitre II) sont celles mesurées pour les années 1998, 1999 et 2000, et nous utilisons les valeurs de 1998 (année jugée « moyenne ») pour les autres années. Pour l'année 1997, nous utilisons néanmoins le LAI estimé par PERSONNE (1998) sur une expérimentation voisine de Grignon. Nous supposons une sénescence entre le 1er et le 15 septembre de chaque année (cf. chapitre III). Nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau n°25, dans lesquels nous détaillons la participation du couvert sénescent (entre le 1er septembre et la moisson). Le bilan de captation de la culture de maïs est de l'ordre de 20 à 45mm par an, avec pour valeur moyenne 33mm, ce qui n'est pas négligeable pour l'étude du bilan hydrique annuel. Il est intéressant de noter la très grande variabilité interannuelle du bilan de la captation, dont les 8 années de simulation permettent d'estimer les valeurs minimales et maximales : de 16mm (1996 et 1997) à 36-37mm (1999 et 2000).

La participation du couvert sénescent n'est pas importante chaque année (valeurs de 1.7 à 25.2mm), mais représente une part en moyenne très conséquente du bilan de la captation, ce qui indique la grande importance de sa prise en compte. Le bilan de la captation du couvert sénescent est en moyenne de 12.9mm, soit 48% du bilan de la captation de la culture de maïs, avec de grandes variations du taux selon les années : de 10% en 1997 à 67% en 2000. Ces valeurs sont fortement dépendantes du rythme des pluies et de la date de moisson. En particulier, la moisson est la plus tardive en 2000 (27 octobre), ce qui explique la forte participation du couvert sénescent cette année-là.

Etant donnée la régulation stomatique de la culture durant l'été, l'abaissement de la transpiration de la culture sous l'effet de la captation est assez faible, avec 23.3% du bilan en moyenne. La faiblesse de ce terme est un point important car il détermine un bilan très largement positif de la captation.

	Couvert du semis à la moisson			**Participation du couvert sénescent (01 septembre – moisson)**		
	Eau captée et évaporée (mm)	**Abaissement ET végét. (mm)**	**Bilan captation (mm)**	**Eau captée et évaporée (mm)**	**Abaissement ET végét. (mm)**	**Bilan captation (mm)**
1993	32.07	4.52	**27.55**	14.74	0.31	**14.43**
1994	33.58	6.69	**26.89**	12.00	0.66	**11.34**
1995	30.78	5.55	**25.23**	14.41	0.73	**13.68**
1996	19.43	3.55	**15.88**	4.06	0.00	**4.06**
1997	23.00	6.64	**16.37**	1.73	0.08	**1.65**
1998	38.39	9.63	**28.76**	15.55	2.27	**13.28**
1999	42.72	7.11	**35.61**	19.75	0.26	**19.49**
2000	43.59	6.17	**37.41**	26.68	1.53	**25.16**
MOYENNE	32.94 ± 8.67	6.23 ± 1.82	**26.71 ± 7.79**	13.61 ± 8.01	0.73 ± 0.79	**12.88 ± 7.60**

***Tableau n°25** : résultats « statistiques » de la captation annuelle sur 8 années de simulation en conditions réalistes*

A partir des mêmes 8 années de simulations, le tableau n°26 présente l'impact de la captation sur différents termes du bilan hydrique, avec les valeurs moyennes des écarts entre les simulations sans captation et avec captation. Nous voyons que la captation a un effet notable sur la valeur du stock d'eau du sol, creusant un écart moyen de 14mm, mais l'examen détaillé des résultats montre que cet effet n'est surtout sensible qu'à partir de la sénescence du couvert. L'abaissement de la transpiration de la végétation est assez sensible (14mm), de même que la diminution du drainage (19mm). L'évaporation du sol est quant à elle extrêmement peu affectée (moins de 1mm).

Ecart maximal du stock d'eau du sol sur 1.10m (mm)	ET végétation (mm)	ET sol (mm)	Drainage (mm)	Remontées capillaires (mm)
14.16 ± 5.46	14.31 ± 4.04	0.57 ± 1.61	18.70 ± 7.60	-0.06 ± 0.07

Tableau n°26 : *impact « statistique » de la captation sur différents termes du bilan hydrique annuel à partir de 8 années de simulation en conditions réalistes*

- ***Conclusions***

Nous avons estimé que la captation est un processus relativement faible sur couvert de maïs, mais qui reste toutefois tout à fait non négligeable dans l'étude du bilan hydrique avec en moyenne annuelle près de 27mm et une forte variabilité interannuelle. Le processus a notamment pour effet d'abaisser sensiblement la quantité de drainage profond, de l'ordre de près de 20mm par an en moyenne. Comme nous l'avons déjà discuté auparavant, le modèle devrait être testé par des mesures directes, à la fois pour en appréhender clairement la robustesse et pour chercher à peser les points essentiels d'amélioration.

Nous suggérons également d'étendre notre étude sur maïs à un ensemble varié de types de couverts allant des pâturages aux forêts. Cette étape est indispensable aux objectifs du Laboratoire, notamment l'application à de grands ensembles comme la région de Beauce.

En complément, et en particulier pour la région de Beauce, il serait également fort intéressant d'introduire et de tester les effets de l'irrigation par aspersion sur la captation, cela introduisant probablement des différences importantes (notamment un poids *a priori* plus fort de l'abaissement de la transpiration sous l'effet du mouillage du feuillage). Nous savons en particulier (DE LA SABLONIERE - Agence de l'Eau Loire-Bretagne - , communication personnelle, 1999) que les doses et les dates d'irrigation sont dans cette région calculées très généralement de manière extrêmement empirique, et que la surveillance du niveau de la nappe phréatique impose régulièrement des limites sévères à l'irrigation. Les implications économiques et politiques de ces deux points sont tout à fait considérables. Dans un tel cadre, l'utilisation d'un modèle tel que le nôtre est tout à fait susceptible de fournir des éléments objectifs susceptibles de permettre plus de rigueur dans la pratique de l'irrigation, en liaison avec la gestion raisonnée et durable de la nappe phréatique.

II) Etude de l'infiltration / ruissellement

Nous abordons à présent le test du modèle face aux mesures de ruissellement. L'évaluation face aux mesures d'humidité du sol sera l'objet du paragraphe suivant. Nous abordons également dans le présent paragraphe les aspects plus « statistiques » du ruissellement, à partir de plusieurs années de simulation.

1) Test du modèle d'infiltration / ruissellement face aux mesures

Nous avons simulé le ruissellement en fixant les valeurs des paramètres tel que précédemment estimées pour notre parcelle, en employant le modèle BILHYNA couplé à l'ensemble des modèles (modèle de pluies instantanées, captation, redistribution journalière de l'eau entre couches de sol selon DARCY, infiltration / ruissellement). En particulier, la rugosité (« RR »)

est celle mesurée directement sur les placettes de ruissellement de 1m². Nous présentons et analysons ici les résultats de ces simulations, et les comparons aux mesures.

- ***Comparaison des ruissellements mesuré et simulé***

Sur un total de 21 événements de ruissellement mesuré, 9 sont simulés par le modèle. Le ruissellement cumulé est présenté sur la figure n°120.

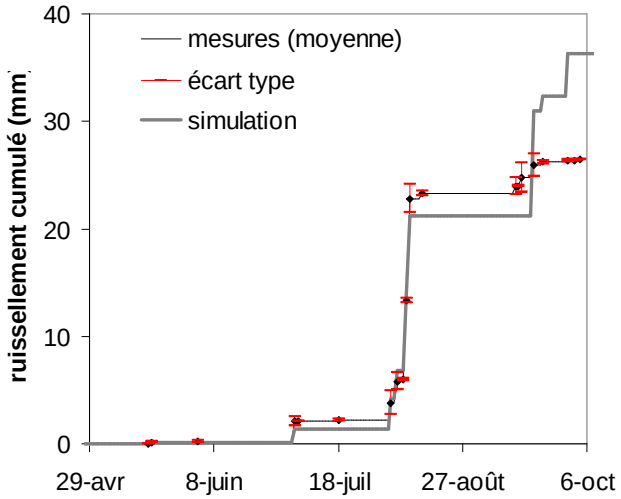


Figure n°120 : *ruissellement cumulé pour la culture de maïs 1999 : simulations et moyenne des mesures*

L'étude comparée événement par événement fournit plus d'indications (figure n°121). Si l'on excepte les trois derniers points (après le 15/9), le modèle de ruissellement est assez conforme à la réalité (r^2 = 0,89), ce qui constitue un résultat extrêmement intéressant. En particulier, le modèle retraduit avec une erreur très raisonnable les valeurs des épisodes importants de ruissellement, qui *a priori* sont ceux potentiellement les plus capables de quitter la parcelle. Les nombreux petits épisodes (< 1mm) mesurés sur le terrain ne sont quant à eux généralement pas prédits par le modèle ; ceci est *a priori* satisfaisant, puisqu'ils constituent probablement une redistribution locale ne participant qu'à la constitution de la capacité maximale de flaquage.

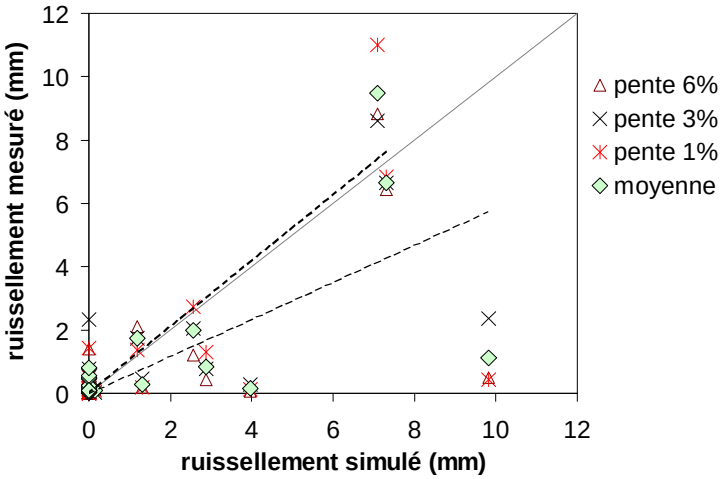


Figure n°121 : *comparaison des valeurs de ruissellement entre les mesures et les calculs, détaillé événement par événement*

Deux droites de régression sur les points moyens :

(1) tous les points (21 points):
y = 0,587.x ; r^2 = 0,448

(2) retrait des 3 derniers points (> 15/9) : y = 1,046.x ; r^2 = 0,887

Néanmoins, le décalage est important entre mesures et simulation à partir de mi-septembre (r^2 = 0,45). Il est difficile d'expliquer cet écart. D'autres études de notre type n'ont pas montré de tels phénomènes bien que portant sur de très longues séries de mesures (notamment ZHANG *et al.*, 1995a, 1995b). Nous pensons que le phénomène de fissuration du sol sous l'effet de la dessiccation sur notre sol très argileux pourrait expliquer en partie ces résultats (voir par exemple BOIFFIN *et al.*, 1988, RUY *et al.*, 1999, NOVAK *et al.*, 2000). Il est tout à fait envisageable également que le système de collecte du ruissellement ait à cause de cela perdu une partie de sa fonctionnalité malgré nos grandes précautions (problème également noté par LE BISSONAIS *et al.*, 1998). Le test du

modèle sur des sols indemnes de gonflement / retrait devrait apporter des résultats complémentaires, et il pourrait être nécessaire de mener une étude sur l'impact de la fissuration sur l'infiltration / ruissellement ainsi que sur les moyens de le modéliser. Dans le cas le moins favorable, si nous considérons que toutes les mesures sont parfaitement justes, le modèle montre alors une surestimation du ruissellement en moyenne de 37.1%, ce qui reste raisonnable.

- ***Utilisation des pluies horaires et conséquences***

La figure n°122 présente les résultats de ruissellement horaire comparé ente le modèle de pluies instantanées et le modèle de pluie horaire gaussienne (durée effective statistique estimée auparavant : 0.55h). Nous ne représentons pas les points correspondant aux pluies d'intensité constante et de durée effective horaire de 0.39h, donnant les mêmes résultats. Le ruissellement cumulé sur la culture du maïs est de 37.53mm avec les pluies horaires gaussiennes, ce qui est un très bon résultat face aux résultats obtenus avec le modèle de pluies instantanées. La figure n°122 montre que l'erreur de calcul du ruissellement est ponctuellement très importante en utilisant les pluies horaires, mais, tantôt positive tantôt négative, cette erreur est en moyenne relativement nulle. Ainsi *a priori*, sur une longue période, une déviation notable du bilan hydrique ne devrait pouvoir se marquer qu'en présence de peu d'événements de ruissellement. Egalement, il faut noter que le système possède une certaine inertie qui devrait limiter un peu les erreurs : un fort ruissellement engendre un abaissement de l'humidité du sol qui à son tour diminue la valeur du ruissellement suivant, et inversement.

Les valeurs des paramètres de durée statistique effective des pluies horaires, précédemment déterminées en conditions pédologiques fixes, donnent de bons résultats dans la simulation présente où les paramètres pédologiques sont tous variables dans le temps. Nous retrouvons également ici la grande incertitude qui caractérise les petits événements de ruissellement. Un point (x = 0.1mm ; y = 3.4mm) semble toutefois indiquer que cette erreur pourrait être importante également pour les événements de ruissellement plus forts, et des études devraient être menées pour préciser ce point.

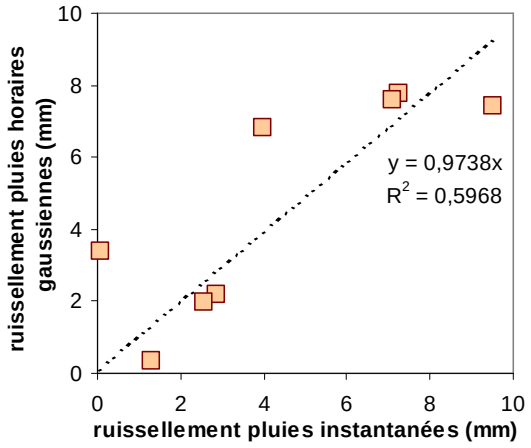


Figure n°122 : *comparaison des valeurs des événements de ruissellement pour le modèle de pluies horaires gaussiennes par rapport aux pluies instantanées*

2) Etude de la variabilité temporelle du ruissellement

Nous savons que le ruissellement est fortement variable selon les années, à cause de la variabilité des caractéristiques climatiques (pluies surtout) et des paramètres hydrodynamiques du sol (travaux agricoles en premier lieu). Nous venons de montrer que le ruissellement en 1999 a été non négligeable, avec *grosso modo* 30mm de cumul (36.3mm selon la simulation et 26.5mm selon les mesures). Afin de préciser l'intérêt de la prise en compte du ruissellement dans notre cas d'étude, nous devions l'étudier sur une série de plusieurs années.

Dans ce paragraphe, nous regardons la variabilité temporelle du ruissellement à partir des mesures météorologiques de la station de Grignon, pour lesquelles le pas de temps horaire est appliqué depuis 1993 : la période étudiée s'étend ainsi du 1er janvier 1993 au 31 décembre 2000, soit 8 années complètes. Nous décrivons l'intensité de chaque pluie horaire avec une courbe de

Gauss de 0.55h de durée (cf. considérations précédentes). Nous utilisons le modèle BILHYNA couplé à l'ensemble des modèles présentés précédemment : captation, infiltration / ruissellement avec travaux agricoles et évolution de la rugosité et de la résistance de la croûte de battance, etc. Les années 1998, 1999 et 2000 utilisent les courbes mesurées de LAI et les dates réelles de travaux agricoles. Pour les années antérieures, nous utilisons les valeurs du LAI et les dates de travaux agricoles de l'année 1998, qui est l'année la plus « moyenne » de notre jeu de données. Pour l'année 1997 toutefois, nous utilisons le LAI estimé par PERSONNE (1998) sur une expérimentation voisine de Grignon.

Nous présentons dans le tableau n°27 les résultats de nos simulations. Le ruissellement s'avère extrêmement variable comme nous le supposions : pratiquement nul certaines années (1.6mm en 1993), il s'élève jusqu'à 40mm (41mm en 1995, 36.4mm en 1999). Nous estimons une valeur moyenne de 23.7mm de ruissellement annuel, avec un écart type de plus de la moitié de ce chiffre (14.4mm). Le ruissellement de l'année 1999 est ainsi supérieur à la moyenne. Néanmoins, la valeur moyenne du ruissellement est assez élevée, bien que notre parcelle ait des caractéristiques favorisant relativement peu le ruissellement, et ceci justifie pleinement sa prise en compte dans un modèle de bilan hydrique.

	Ruissellement (mm)	**Pluie (mm)**	**Coefficient de ruissellement (%)**
1993	1.6	333.0	0.5
1994	10.9	322.0	3.4
1995	41.0	316.5	12.9
1996	11.4	246.0	4.6
1997	29.7	327.0	9.1
1998	23.0	414.0	5.6
1999	36.4	369.5	9.9
2000	35.8	457.0	7.8
Moyenne	*23.7*	*348.2*	*6.7*
Ecart type	*14.4*	*64.8*	*4.0*

Tableau n°27 *: valeurs du ruissellement, de la pluie et du coefficient de ruissellement durant la période de culture du maïs, sur les 8 années de simulation*

La figure n°123 permet de visualiser l'évolution du cumul de ruissellement entre le 1er janvier et le 31 décembre de chaque année. Il apparaît immédiatement que le ruissellement ne concerne que la saison de culture du maïs, entre les mois de mai et de novembre. Le labour d'hiver ne génère jamais de ruissellement. Le nombre d'événements est variable mais toujours faible, et certaines années marquent un ruissellement de plus de 10mm en 1 ou 2 jours (mai et juin 1997, juillet et septembre 1995, juillet 1999). Ceci confirme le caractère très sporadique du ruissellement et la nécessité de disposer de mesures de pluie à pas de temps au minimum horaire.

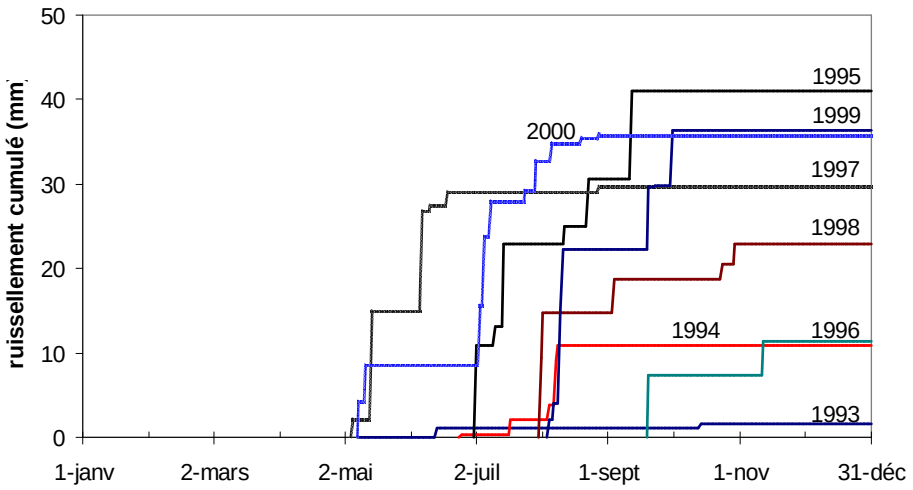


Figure n°123 *: courbes du ruissellement cumulé annuel calculé sur les années 1993 à 2000*

En rapportant le ruissellement au cumul des pluies sur la période de culture du maïs (tableau n°27), nous estimons un coefficient de ruissellement de 6.7% en moyenne. En utilisant le cumul annuel des pluies (612mm en moyenne), ce coefficient s'abaisse à 3.8%. Le ruissellement représente ainsi une part significative des pluies durant la période de culture du maïs, et en présence d'une rugosité plus favorable au ruissellement durant la période hivernale (blé d'hiver ou champ de maïs non labouré par exemple), le ruissellement cumulé sur l'année pourrait être accru.

3) Bilan

Les mesures montrent un assez bon degré de réalisme du modèle et des paramètres choisis. *A priori*, nous pouvions plutôt penser que la perméabilité du sol diminuerait avec le temps, et ici (sauf défaillance du système de mesure) l'inverse semble se passer, probablement en rapport avec la fissuration du sol lors du dessèchement. Néanmoins, nous remarquons que le choix de paramètres constants pour les tranches de sol (mise à part la résistance de la croûte et la capacité de flaquage) est satisfaisant. Nous conservons donc les valeurs de paramètres choisies, et avançons une surestimation moyenne possible de l'ordre de 1/3 du ruissellement mesuré.

Les modèles de pluies horaires, utilisant les valeurs statistiques des paramètres de durée effective horaire, ont montré de bons résultats malgré des erreurs localement fortes, respectant toutefois largement les valeurs des plus forts événements de ruissellement.

Nous avons montré que le ruissellement, de manière « statistique », a dans notre cas d'étude (culture de maïs alternant avec un labour d'hiver) une valeur annuelle de près de 24mm avec un très fort écart type, ce qui indique l'intérêt de modéliser le ruissellement. Cette valeur annuelle pourrait être plus forte si la rugosité du sol entre deux cultures de maïs était plus faible.

Il manque à la présente étude une généralisation à d'autres situations par le biais de comparaison mesures / modèle, et en particulier dans les cas du labour d'hiver, des cultures d'hiver, de différents autres types de semis, et du sol après la moisson. Nous considérerons malgré tout que le modèle d'infiltration / ruissellement est extrapolable à ces différentes situations, à condition de connaître précisément les paramètres de la végétation et de la rugosité, et en particulier pour le labour d'hiver.

Enfin, comme nous le discuterons, nous n'avons pas traité intégré le changement d'échelle pour le calcul du ruissellement entre les petites placettes de 1 m² et la parcelle entière.

III) Etude des remontées capillaires

Les simulations de bilan hydrique que nous avons réalisées sur plusieurs années avec BILHYNA montrent deux choses : le bilan hydrique est très peu sensible au modèle de redistribution lente de l'eau entre couches de sol, et les remontées capillaires sont très faibles. Ceci constitue une donnée intéressante car elle était imprévisible *a priori*. Nous calculons ainsi pour l'année 1999 des remontées capillaires de 3.57mm et 8.61mm pour une profondeur de la couche semi-infinie respectivement de 2m (valeur identique pour 3m) et 1.10m, et pour l'année 2000 les valeurs de 2.21mm et 4.49mm. Puisque nous calculons habituellement le bilan hydrique sur une épaisseur de 1.10m, les remontées capillaires représentent un terme très secondaire du bilan hydrique.

Toutefois, dans certains cas particuliers de nappes proches de la surface, les quantités de remontées capillaires devraient être beaucoup plus fortes. Les remontées capillaires croissent également considérablement avec l'augmentation de l'humidité de la couche semi-infinie. Or, nous ne savons pas véritablement quelle humidité affecter à la couche semi-inifinie, et le choix de la capacité au champ n'est qu'une approche simplificatrice et *a priori*. Notre modèle conserve donc un attrait capital dans le cas particulier des nappes proches de la surface, mais nous insistons sur les limites générales et peut-être fortes posées par la méconnaissance des caractéristiques des couches profondes de sol (paramètres hydrodynamiques, profondeur et humidité de la couche « semi-infinie »).

IV) Etude du bilan hydrique en 1998, 1999 et 2000

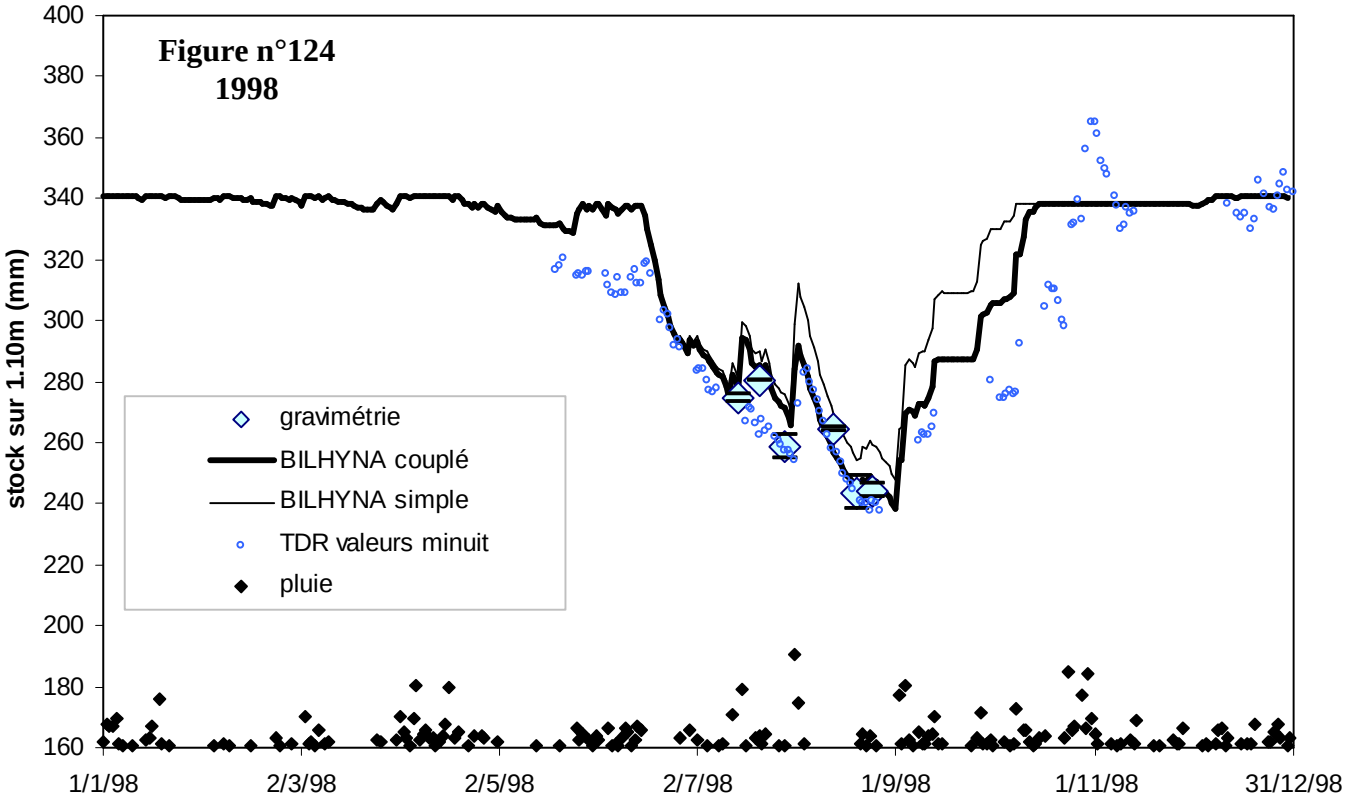
Nous étudions à présent le modèle de bilan hydrique BILHYNA intégrant l'ensemble des sous-modèles présentés, face aux mesures d'humidité du sol (TDR et gravimétrie) réalisées en 1998, 1999 et 2000.

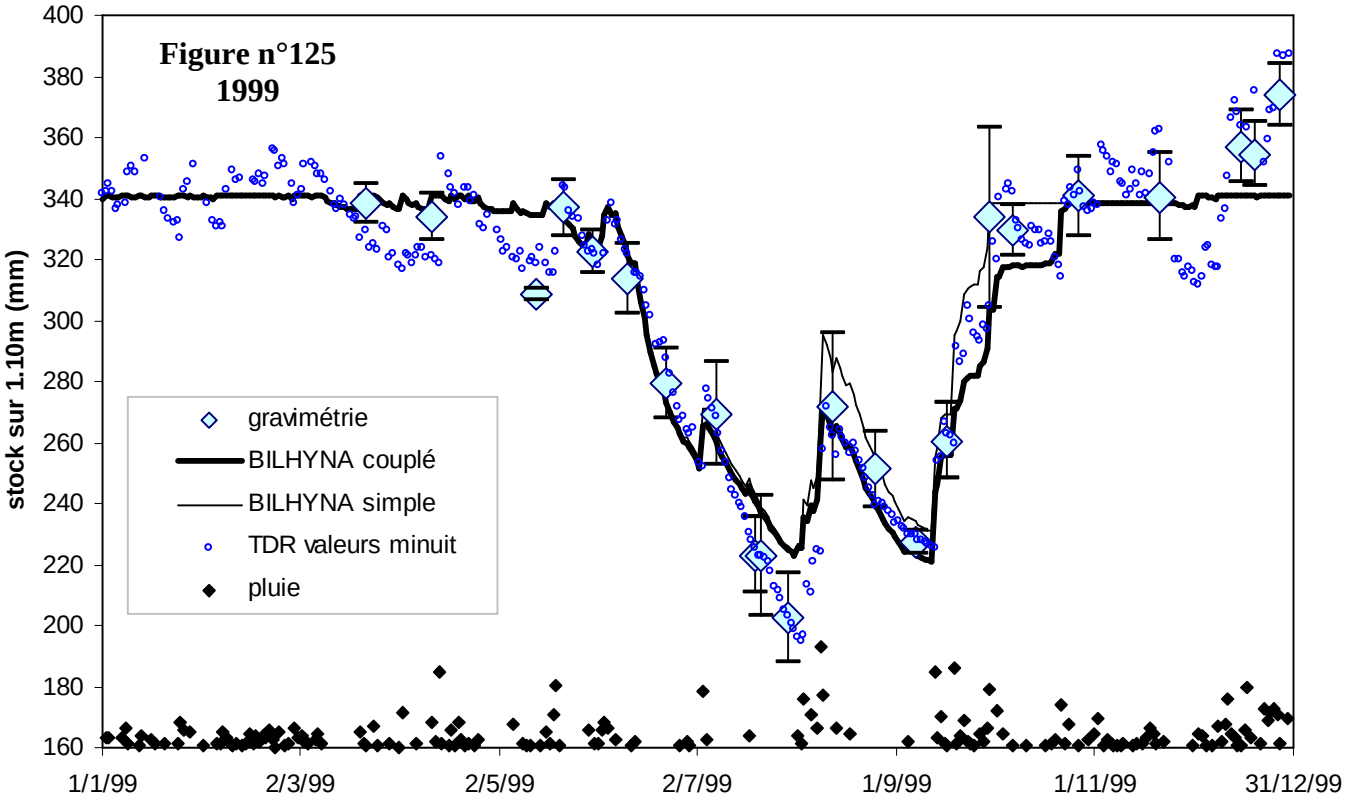
a) Résultats

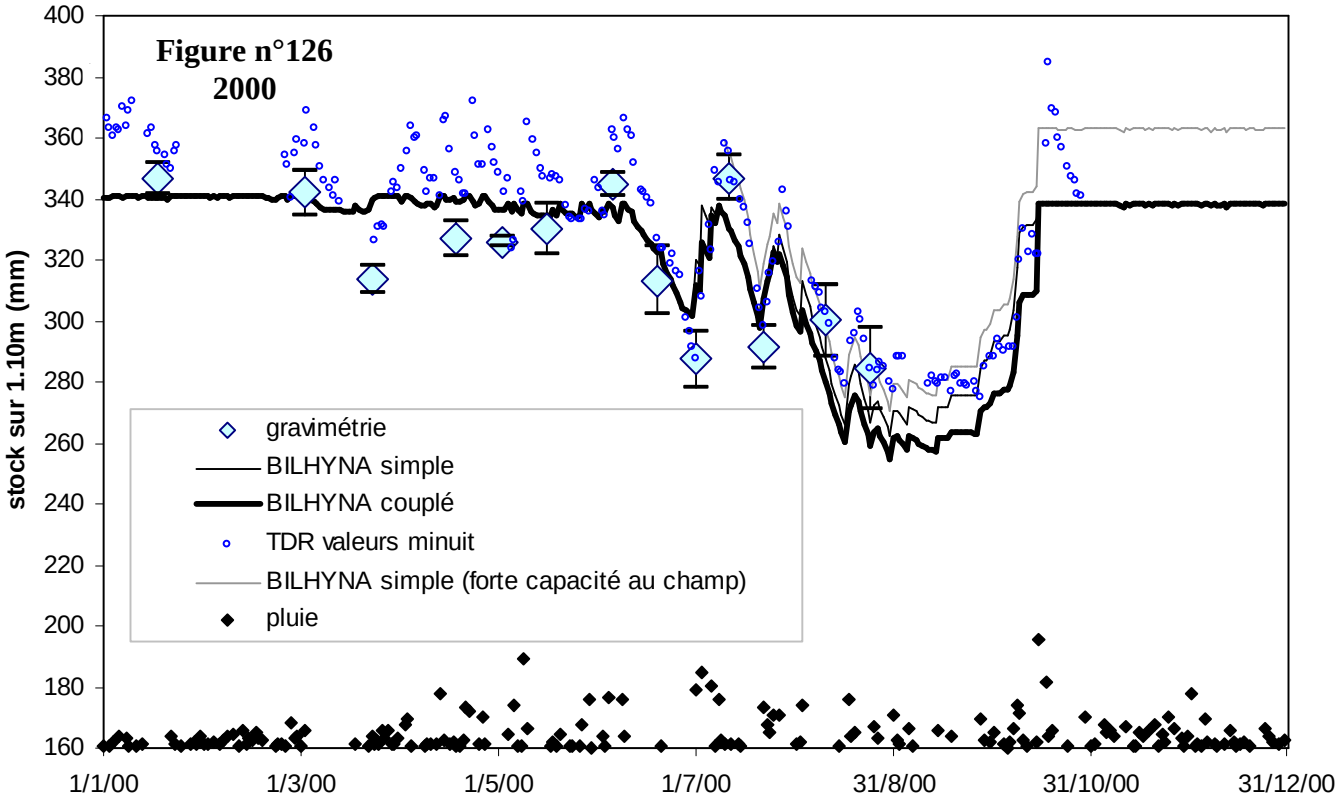
Nous considérons le stock d'eau entre la surface et 1.10m de profondeur, qui constitue la tranche de sol explorée par les racines. La courbe de mesures TDR est la moyenne des trois profils installés. Pour la clarté des graphiques, nous représentons seulement un point de mesure TDR par jour, autour de minuit. Nous noterons que de nombreux trous existent dans la série de mesures TDR (pour recharge du boîtier de mesures, révision de l'appareillage, pannes diverses), l'année 1999 étant celle où les mesures TDR ont le mieux fonctionné. Les points de gravimétrie sont les moyennes de tous les profils mesurés à chaque date, avec les barres d'écart type. Nous étudions les résultats selon deux configurations du modèle : la version de base de BILHYNA, et BILHYNA couplé aux modèles de captation et d'infiltration / ruissellement. Les courbes de simulation indiquent les points de stock d'eau calculés à minuit chaque jour. Nous utilisons le modèle de pluies instantanées en 1999 et 2000, et - faute de mesures instantanées de la pluie - nous employons par défaut en 1998 les pluies horaires réparties en modèle gaussien (cf. chapitre III). Les figures n°124, 125 et 126 ainsi que le tableau n°28 présentent les résultats pour les années 1998, 1999 et 2000. La figure n°128 présente enfin les courbes cumulées des différents termes du bilan hydrique de 1999 intégrant la captation et le ruissellement.

b) Etude des courbes de simulation comparées aux mesures

Nous souhaitons juger ici du réalisme du modèle BILHYNA (car il sert de base à notre étude du bilan hydrique et des transferts hydrologiques) et du couplage des modèles de captation et de ruissellement. Les trois années permettent une étude très large et pertinente de notre modèle, car des situations nettement contrastées y sont représentées : un été très sec en 1999, exceptionnellement humide en 2000 (avec une période de « sursaturation » du sol) et intermédiaire en 1998, avec également un hiver exceptionnellement humide en 1999/2000.







Figures n°124, 125 et 126 : *évolution journalière du stock d'eau du sol comparé entre mesures et simulations pour les années 1998, 1999 et 2000*

Les simulations restituent en moyenne les mesures de manière assez bonne à très bonne selon les années. L'écart maximum entre simulations et mesures du stock d'eau du sol est de moins

de 20mm, un peu plus durant la recharge automnale de 1998 et dans le creux estival de 1999 (autour du 1er août, figure n°125). Les meilleurs résultats sont obtenus pour l'année 1999, où à quelques points près le modèle est particulièrement fidèle aux mesures. Dans la plupart des cas, les phases de dessèchement du sol sont relativement bien traduites, ce qui indique que le modèle calcule une évapotranspiration fiable.

Le ruissellement, apparemment bien restitué en général, est peut-être trop fort après la moisson en 1999 et 2000 (sans doute puisque la rugosité de la surface du sol est alors accrue et que nous ne savions pas prendre ceci en compte) et pas assez fort à la fin de 1998 (période où les exploitants agricoles du site ont pourtant constaté des épisodes de ruissellement inhabituel sur les parcelles). Nous nuançons ces remarques puisque - comme nous l'avons déjà vu - notre modèle, testé avec un certain succès à l'échelle de 1m², pourrait surestimer le ruissellement à l'échelle de la parcelle à cause de la réinfiltration d'une partie de l'eau de ruissellement. D'autre part, nous n'avons néanmoins pas intégré les passages de roues qui sont pourtant susceptibles d'augmenter la capacité de ruissellement à l'échelle de la parcelle.

Les résultats autour des mois de juillet / début août 1999 (figure n°125) sont difficiles à expliquer. Le modèle ne parvient pas à restituer le fort abaissement du stock d'eau du sol, et le ruissellement calculé seul permet aux simulations de coller aux points de mesure après la phase de fortes précipitations. Les mesures semblent pourtant indiquer un ruissellement nul pendant cette période d'assèchement du sol. De nombreuses hypothèses peuvent être émises pour tenter d'expliquer cela, dont nous ne savons véritablement laquelle privilégier. Il semblerait que la valeur du paramètre Hmax ait été fixée trop haute, et un léger ajustement pourrait être nécessaire.

Le modèle ne permet pas de restituer les périodes où le stock d'eau du sol dépasse la valeur de la capacité au champ (hiver 1999/2000, et autour du 15 juillet 2000 - figures n°125 et 126). Cela peut causer une divergence des courbes de simulations et de mesures lorsqu'une importante phase de dessèchement du sol fait suite à l'atteinte d'une humidité dépassant sensiblement la capacité au champ (cf. après le 15 juillet 2000, figure n°126). Nous pouvons supposer que ce cas est rare. Egalement, le modèle ne restitue pas les petites phases de drainage que l'on observe très nettement en de l'automne au printemps (cf. printemps et fin de l'automne 1999, figure n°125), et cet élément suggère que le stock d'eau à la capacité au champ soit plutôt de l'ordre de 320mm sur 1.10m. Remédier aux problèmes liés au drainage et aux très fortes valeurs d'humidité nécessiterait toutefois de programmer un modèle sophistiqué de drainage, qui s'oppose aux concepts actuellement utilisés.

Finalement, le modèle BILHYNA montre de bons résultats, malgré quelques points particuliers qui restent à élucider (drainage, sol au-dessus de la capacité au champ, évapotranspiration à très faible stock d'eau du sol). Il pourrait être pertinent d'utiliser un modèle de type RICHARDS pour calculer tous les transferts d'eau dans tous les cas particuliers, surtout si une précision plus grande des résultats était souhaitée.

c) <u>Sensibilité du modèle à la valeur de la capacité au champ – conséquences</u>

Compte tenu de l'importance du paramètre de capacité au champ, nous analysons plus précisément la sensibilité du modèle à ce paramètre. La figure n°127 montre l'évolution du stock d'eau du sol en 1999 avec trois valeurs différentes de stock à la capacité au champ (de l'ordre de 320mm, 340mm et 360mm). Nous voyons que le modèle actuel s'avère très sensible au paramètre de capacité au champ, et il apparaît nécessaire de le compléter avec un modèle spécifique de drainage. Il semblerait ainsi que nous puissions grandement améliorer le modèle BILHYNA en définissant une valeur d'humidité maximale du sol correspondant à la courbe haute du graphique (ou éventuellement la saturation définie dans le modèle de GREEN-AMPT), et en incorporant un modèle de vidange (« drainage ») permettant de restituer les phases de drainage printanières observées précédemment. Nous pourrions alors restituer le véritable « palier » de stock à la capacité au champ que nous observons autour de 320mm. Il s'agit là d'une proposition intéressante d'orientation des travaux futurs.

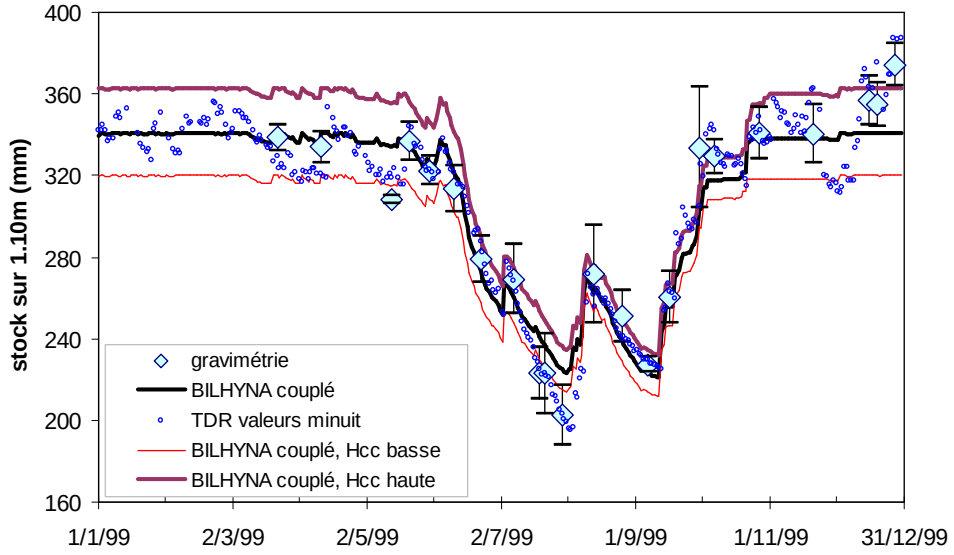


Figure n°127 : *illustration du poids du paramètre de capacité au champ sur l'évolution du stock d'eau du sol, avec 3 valeurs (BILHYNA tous modèles couplés)*

d) Etude des termes du bilan hydrique – conséquences

Nous regardons maintenant plus en détail les différents termes du bilan hydrique, et l'effet de la captation et du ruissellement.

Les différents termes du bilan hydrique cumulés pour chacune des trois années sont donnés dans le tableau n°28, et la figure n°128 montre les courbes cumulées des différents termes du bilan hydrique en 1999. Nous n'indiquons pas les valeurs de remontées capillaires, dont la valeur calculée est négligeable (de 2.8 à 4.3mm par an).

	BILHYNA			**BILHYNA avec captation et ruissellement**		
	1998	**1999**	**2000**	**1998**	**1999**	**2000**
Pluie	718.1	767.0	836.1	718.1	767.0	836.1
ET sol	109.6	106.8	155.6	109.2	107.0	155.3
ET végétation	212.1	245.2	219.1	183.1	214.0	194.3
ET sol + végétation	321.7	352.0	374.7	292.3	321.0	349.6
Captation						
- rétention / évaporation	-	-	-	38.4	40.7	47.0
- abaissement ETvég.	-	-	-	9.5	6.0	9.7
- bilan	-	-	-	28.9	34.7	37.3
Ruissellement						
- sur labour	-	-	-	0.0	0.0	0.0
- sur semis	-	-	-	18.7	34.1	37.4
- sur sol moissonné	-	-	-	4.2	0.0	0.0
- total	-	-	-	22.9	34.1	37.4
Total captation + ruissellement	-	-	-	51.8	68.8	74.7
Drainage	399.6	418.1	466.3	367.4	373.9	406.4

Tableau n°28 *: valeurs (en mm) des cumuls annuels des principaux termes du bilan hydrique sur les années 1998, 1999 et 2000, pour les modèles BILHYNA « simple » et intégrant la captation et le ruissellement*

La figure n°128 permet d'illustrer le lien entre les différents termes du bilan hydrique, pour l'année 1999. Nous constatons en particulier que le drainage ne se produit principalement qu'en dehors de la saison de culture du maïs, où le bilan hydrique se limite dans notre situation aux apports des pluies, et aux pertes par évaporation à la surface du sol et par drainage. Puisque *a priori* l'erreur sur le terme d'évaporation du sol est faible à cette période, nous pouvons considérer que les

valeurs calculées de drainage sont tout à fait fiables, et principalement liées à l'incertitude sur la mesure des pluies. Nos calculs intégrant la captation et le ruissellement (cf. tableau n°28) montrent un cumul annuel du drainage de 367mm à 406mm.

La captation et le ruissellement sont du même ordre de grandeur (34mm en 1999) et se limitent dans le temps à la période de culture du maïs. Leur effet se manifeste donc par un abaissement de la recharge en eau du sol, qui abaisse à son tour la valeur de l'évapotranspiration et la quantité de drainage annuelle.

Les valeurs cumulées annuelles des différents termes du bilan hydrique, comparées entre le modèle BILHYNA intégrant et n'intégrant pas la captation et le ruissellement (tableau n°28), permettent de préciser l'effet de la captation et du ruissellement. Tout d'abord, nous remarquons que la captation et le ruissellement entraînent une perte d'eau de pluie tout à fait conséquente, de 52mm à 75mm par an. L'évaporation du sol n'est absolument pas affectée, tandis que la transpiration de la végétation est largement abaissée (près de 30mm en moyenne) sous l'effet double du mouillage du feuillage lors de la captation et de l'abaissement de l'humidité du sol par la captation et le ruissellement, entraînant une régulation stomatique accrue. Le drainage également est notablement abaissé, avec 40mm par an en moyenne, ce qui a un impact sur la dynamique des nappes phréatiques (à pondérer selon la part du ruissellement qui se pourra éventuellement se réinfiltrer en un autre point).

Au contraire de la végétation de maïs étudiée, des cultures d'hiver pourraient par contre montrer des résultats bien différents, en particulier par des caractéristiques différentes du ruissellement et de la captation.

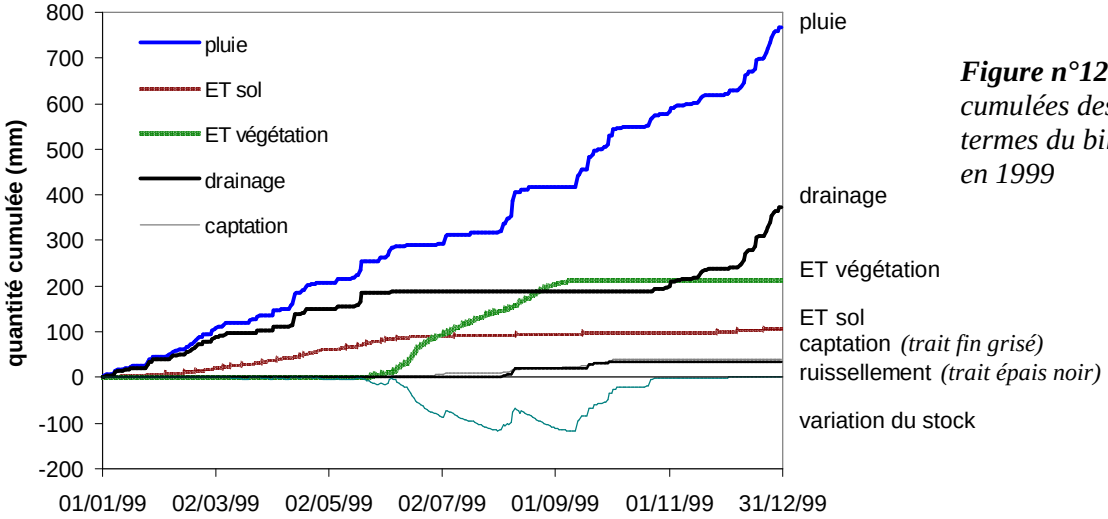


Figure n°128 : *courbes cumulées des différents termes du bilan hydrique en 1999*

V) Conclusions

Nous avons développé des compléments au modèle BILHYNA selon des approches originales, notamment de combinaisons de pas de temps différents, et le résultat paraît tout à fait probant. Le modèle a été testé avec de bons résultats en moyenne, face aux mesures de ruissellement et d'humidité du sol.

Nous avons pu calculer les valeurs annuelles moyennes ainsi que la variabilité de la captation et du ruissellement sur notre culture de maïs, avec respectivement 26.7mm ± 7.79mm et 23.7mm ± 14.4mm, représentant des valeurs non négligeables pour le bilan hydrique. Les remontées capillaires sont par ailleurs apparues négligeables selon notre modèle, et n'ont pas été discutées.

La captation et le ruissellement ont des effets relativement faibles mais néanmoins tout à fait tangibles sur l'évolution du stock d'eau du sol. L'impact sur les différents termes du bilan hydrique est par contre marqué, avec notamment un abaissement moyen de 40mm du drainage annuel.

Le modèle proposé a l'intérêt de pouvoir être assez facilement extrapolé à différentes situations, et notamment à des cas où ruissellement et/ou captation seront beaucoup plus marqués que dans le cas étudié (fortes pentes, sol battant, combinaisons de couverts et de climats favorisant la captation), offrant d'intéressantes perspectives d'étude.

Les résultats des trois années de mesures apportent par ailleurs des indications très intéressantes d'amélioration du modèle, et en particulier concernant l'intégration de la sénescence du couvert végétal, ainsi que le drainage et la fixation du paramètre d'humidité à la capacité au champ. Ces éléments comportent un grand intérêt pour les applications envisagées à court terme par le Laboratoire sur les bilans de nappes phréatiques.