Nous allons à présent fixer les valeurs des paramètres du modèle d'infiltration / ruissellement. Nous avons vu dans le chapitre I que certains de ces paramètres connaissaient une forte variabilité temporelle sur parcelle cultivée, que nous allons ici également tenter de restituer : évolution de la croûte, de la rugosité et du flaquage, des caractéristiques des couches de sol travaillé. Nous étudierons enfin la sensibilité du modèle d'infiltration / ruissellement aux paramètres importants de notre sujet d'étude.

Nous avons également inclus dans le présent chapitre la paramétrisation du modèle de redistribution lente de l'eau entre couches de sol, qui est, comme l'équation de GREEN-AMPT, basée sur la loi de DARCY, et constitue un terme correctif pour calculer le profil d'humidité initiale journalier du sol.

Nous ne reviendrons pas sur la description précise du programme d'infiltration / ruissellement et sur le schéma de couplage au modèle BILHYNA, pour lesquels nous pourrons nous reporter respectivement à l'organigramme présenté en annexe (n°3) et à la figure n°12 du chapitre I (et commentaires dans le texte).

Le chapitre suivant montrera ensuite l'évaluation finale du bilan hydrique intégrant captation et infiltration / ruissellement, avec des tests face aux mesures de ruissellement et d'humidité du sol, et étudiera les termes propres à la captation et à l'infiltration / ruissellement.

I) Fixation des paramètres d'infiltration

L'équation d'infiltration / ruissellement nécessite de déterminer un certain nombre de paramètres. Nous caractériserons d'abord la croûte de battance (résistance hydraulique) selon une méthode simple, puis les trois paramètres hydrodynamiques du sol sous la croûte (conductivité hydraulique à saturation, succion effective au front d'humectation, humidité volumique à saturation) sur la base d'éléments théoriques et empiriques précis. Notre analyse fait appel notamment à un paramètre de « potentiel effectif d'infiltration », que nous développerons. Afin de pouvoir intégrer la variabilité des pratiques agricoles, nous caractériserons les effets du travail du sol (semis et de labour d'hiver) sur les paramètres hydrodynamiques. Nous préciserons également les valeurs des paramètres de résolution de l'équation de calcul de l'infiltrabilité du sol à partir de la forme intégrée de l'équation de GREEN-AMPT.

Les paramètres pluviométriques ont été fixés dans le chapitre précédent (paragraphe II), et nous n'y reviendrons donc pas. Le paramètre d'épaisseur des différentes couches de sol est par ailleurs fixé *a priori* par le modèle BILHYNA (voir annexe n°1), et ne sera pas étudié.

Enfin, le dernier terme de l'équation de GREEN-AMPT, la hauteur de flaque (Ho), sera abordé dans le paragraphe suivant (II) à travers l'évaluation de la dynamique temporelle de la capacité maximale de flaquage de la surface du sol.

1) Détermination de la résistance hydraulique de la croûte de battance

Nous avons vu que le modèle d'infiltration nécessitait de connaître la valeur de la résistance hydraulique de la croûte. L'étude des caractéristiques des croûtes de battance constitue un sujet extrêmement complexe, pour lequel nous ne disposions pas de moyens expérimentaux suffisants. Nous avons ainsi utilisé les résultats de la bibliographie. La modélisation de l'évolution de la croûte sera analysée ensuite.

De manière simple, il existe un critère de risque de battance (REMY et MARIN LAFLECHE, 1974 – tableau n°12 ci-dessous) :

$$R = \frac{1{,}5.Lf + 0{,}75.Lg}{A + 10.MO}$$

Lf = taux de limons fins
Lg = taux de limons grossiers
A = taux d'argiles
MO = taux de matières organiques

R	>2	très battant
	1.8 – 2	battant
	1.6 – 1.8	assez battant
	1.4 – 1.6	peu battant
	< 1.4	non battant

Ce modèle empirique permet de considérer que la sensibilité à la battance est proportionnelle à la teneur en limons (surtout les limons fins) et inversement proportionnelle aux taux d'argiles et de

matières organiques (notons l'importance toute particulière attribuée à ce dernier terme). Ce paramètre nous semble cohérent, et il restitue notamment bien les caractères respectivement assez battant (R = 1.74) et non battant (R = 1.24) des sols de Blosseville et de Villamblain expérimentés par FOX *et al.* (1998a, 1998b).

Nous avons pu estimer précisément ce critère à partir de cinq analyses menées sur le sol de surface de notre site expérimental, classant notre sol dans la catégorie des « non battants » (R moyen = 0.98), à cause de sa teneur élevée en argiles (autour de 30%). Compte-tenu de ces résultats, nous retenons l'hypothèse que les caractéristiques des croûtes de battance sur notre site expérimental seront comparables à celles du sol de Villamblain de l'étude de FOX *et al*. (1998a, 1998b).

FOX *et al.* (1998a, 1998b) montrent très clairement que la croûte de battance à la surface d'un sol est en fait tout à fait hétérogène tant en épaisseur qu'en caractéristiques hydrodynamiques, et il nous faut donc pouvoir définir une « croûte moyenne équivalente ». Nous pouvons considérer qu'il existe deux types de croûtes, dont la disposition spatiale et l'importance quantitative sont directement fonction de la microtopographie. Les croûtes dites « structurales » se forment au niveau des monticules, tandis que celles dites « sédimentaires » sont constituées dans les zones de dépression. Ainsi, puisque les deux types de croûtes ont une valeur de résistance différente, l'infiltrabilité dépendra parfois largement de la hauteur de flaquage, comme l'ont montré FOX *et al*. (1998a, 1998b).

Pour rester cohérent avec le niveau de simplification de notre modèle, nous avons simplement recherché la valeur de la résistance moyenne de la croûte en fonction d'un coefficient de recouvrement du sol par chacun des deux types de croûtes.
La fraction maximale de sol flaqué est donnée par la formule de HANSEN (2000) :

$$SF = 0{,}17.MDS^{0{,}64} \qquad MDS = \textit{capacité maximale de flaquage (mm)}$$

En utilisant cette formule avec nos calculs de valeur de la capacité de flaquage (cf. paragraphe II-1), nous estimons pour le lit de semence en fin d'évolution que les dépressions ont un taux de présence de 15.3%, 17.1% et 18.2% respectivement pour une pente de 6%, 3% et 1% (valeurs des pentes pour les trois placettes de mesure du ruissellement), soit une valeur de résistance moyenne de la croûte de 0.97h, 1.02h et 1.05h. Nous retiendrons simplement l'ordre de grandeur : 1.0h. Dans le cas du labour d'hiver, la pente de la parcelle étant proche de 1%, les mêmes considérations nous amènent à une valeur de 2.5h. Le tableau n°13 résume ces résultats, indiquant également à titre comparatif ceux pour le sol de Blosseville.

		Résistance (h)	
		Villamblain, Grignon	***Blosseville***
Selon type de croûte *(FOX et al., 1998a)*	Croûte structurale	0.53 (±0.05)	5.90 (±0.23)
	Croûte sédimentaire	3.40 (±0.71)	33.20 (±5.50)
Croûte moyenne	Lit de semence (et sol moissonné)	≈1.0	≈10.0
	Labour d'hiver	≈2.5	≈25.0

Tableau n°13 : *valeurs de résistance hydraulique de la croûte*

La précision de ces résultats est faible puisque non validée directement à partir de mesures sur notre site expérimental. Toutefois, compte tenu de la faible valeur de la résistance de la croûte dans notre cas, nous considérons que cette précision est suffisante.

2) Fixation des paramètres pour le sol travaillé et non travaillé

De nombreuses erreurs sont souvent commises lorsqu'il s'agit de fixer les valeurs des paramètres du modèle de GREEN-AMPT, et en premier lieu le paramètre clé de conductivité hydraulique à saturation. Nous analysons ici cette problématique et proposons une solution empirique simple et raisonnée.

a) Considérations empiriques (bibliographie)

L'analyse des résultats d'infiltration / ruissellement sur le terrain amène certaines considérations essentielles.

Tout d'abord, la pluie a un rôle clé dans le processus d'infiltration. Les mesures d'infiltrométrie révèlent en effet notamment que les valeurs de Ks sont largement plus fortes sous lame d'eau que sous pluie artificielle (le plus souvent d'un ordre 4 à 10, avec quelques centaines contre quelques dizaines de mm/h - voir notamment SIDARAS et ROTH, 1987), et ceci de surcroît pour des sols dont la croûte de battance est déjà formée. Nous pouvons expliquer cette différence par l'augmentation du processus de colmatage des pores (« pore clogging ») (voir notamment MORIN et BENYAMINI, 1977, PANINI *et al.*, 1997) par les particules mobilisées sous l'action de battance des gouttes de pluie, et la non mise en fonctionnement des gros macropores. Les valeurs de conductivité hydraulique mesurées sous pluie artificielle sont également plus élevées qu'en conditions réelles, car l'expérimentation provoque une submersion accrue de la surface du sol (cf. FOX *et al*., 1998).

Type de sol	Conductivité hydraulique effective moyenne à « saturation » (mm/h)	Echelle (m^2)	Référence
Loamy sand	77.4	100	ESTEVES *et al*., 2000
Sandy loam	7.78 (+) (#)	136	RISSE *et al*., 1995
	5.0-8.0 (avec croûte)	4	MORIN et BENYAMINI, 1977
	56.0 (protection par un mulch)	4	MORIN et BENYAMINI, 1977
Fine sandy loam	6.19 (+) (#)	136	RISSE *et al*., 199
	18.22 (+) (-)	136	ZHANG *et al*., 1995
Loam	2.27-7.68 (+) (#)	136	RISSE et al., 1995
	0.87-2.02 (*) avec croûte	-	MOORE, 1981
	2.90-5.30 (*) sans croûte	-	MOORE, 1981
	5.31-17.65 (+) (-)	136	ZHANG et al., 1995
Gravely silt	2.38 (+) (#)	136	RISSE *et al*., 1995
Silty loam	0.31-2.04 (+) (#)	136	RISSE *et al*., 1995
	4.36-5.66 (*)	0.25	FOX *et al*., 1998
	1.34-5.26 (*) avec croûte	-	MOORE, 1981
	5.30 (*) sans croûte	-	MOORE, 1981
	0.47-3.48 (+) (-)	136	ZHANG *et al*., 1995
Silty clay loam	**1.80-4.41 (+)** (#)	**136**	**RISSE *et al*., 1995**
	6.60-25.40 (*) (**)(***)	**0.25**	**FOX *et al*., 1998**
	0.40-2.83 (*) avec croûte	**-**	**MOORE, 1981**
	2.64-5.30 (*) sans croûte	**-**	**MOORE, 1981**
	19.75 (+) (-)	**136**	**ZHANG *et al*., 1995**
	14.6-38.0 (@) croûte partielle	**33**	**MAHMOUD, 1991**
	5.9-2.17 (@) avec croûte	**33**	**MAHMOUD, 1991**
Clay loam	1.06-1.07 (*)	-	MOORE, 1981
	5.90 (*)	-	MOORE, 1981

(+) modèle WEPP (-) cultures pérennes (prairies) (*) infiltrabilité après 1h de pluie (**) lit de semence reconstitué en laboratoire (***) la deuxième valeur correspond à un flaquage important de la surface du sol (#) jachère cultivée (@) sol travaillé avec débris de végétation en surface avec taux de couverture 30-50%

Tableau n°14 : *valeurs estimées de la conductivité hydraulique à saturation, Ks, à partir de meures d'infiltration sur différents types de sols*

Nous devons nous reporter à des mesures d'infiltration et/ou de ruissellement en conditions réelles pour en définir l'ordre de grandeur effectif de la conductivité hydraulique à saturation. Le tableau n°14 présente des valeurs classiques pour différents types de sols cultivés avec croûte de battance et sous pluie. A la vue de ces données, nous devrions obtenir une valeur de conductivité hydraulique effective moyenne pour le sol de Grignon (« silty clay loam ») avec une culture de blé ou de maïs (« row crop ») de l'ordre de quelques mm/h (prenons pour référence les valeurs de *RISSE et al., 1995* : 1.80 à 4.41 mm/h). Nous verrons que cet ordre de grandeur est important.

- ***Le « potentiel effectif d'infiltration » (signification, caractéristiques et détermination)***

Il existe un énorme décalage, d'ordre 100, entre les valeurs effectives (sur le terrain) et les valeurs mesurées (à un potentiel hydrique nul ou positif) de la conductivité hydraulique à saturation. La croûte, à travers le paramètre de résistance hydraulique intégrée dans l'équation de GREEN-AMPT, n'explique *a priori* que partiellement cette différence. Le concept de « potentiel effectif d'infiltration » en apporte une explication supplémentaire. Il s'agit du potentiel hydrique capillaire du sol dans la tranche de sol humecté au cours de l'infiltration. Celui-ci semble directement lié à la battance, aux caractéristiques hydrodynamiques du sol sous la croûte et à l'intensité de la pluie. Le processus de « pore clogging » aurait une action importante.

La valeur du potentiel effectif d'infiltration est négative dans le cas de l'infiltration sous une pluie, traduisant la saturation partielle du sol sous la croûte de battance. Aussi par conséquent, nous pouvons entendre par « saturation » un état « proche de la saturation » ou un état de « saturation effective ».

L'expression de coefficients de réduction de la conductivité hydraulique du sol sous la croûte (voir notamment RAWLS *et al*., 1990, RISSE *et al*., 1995, ZHANG *et al*., 1995, VANDERVAERE *et al*., 1998) est ainsi directement liée à ce principe.

Le processus a été démontré pour divers sols, sous pluie simulée ou non. Le potentiel effectif d'infiltration au cours de l'infiltration est supposé constant et homogène sur la zone de transmission (sauf au niveau du front d'humectation qui en toute rigueur s'étend sur une certaine épaisseur de sol), ce qui est relativement confirmé par diverses études mais semble néanmoins devoir encore être testé de manière plus complète (voir notamment TAKAGI, 1960, ZASLAVSKI, 1964, SHARMA *et al*., 1981, FORHER *et al*., 1999, ESTEVES *et al*., 2000). SHARMA *et al*. (1981) trouvent ainsi par exemple une constance assez bonne du potentiel sur tout le profil d'échantillons remaniés de 12 sols cultivés en cylindres de 7.6cm x 35cm. DIEKRÜGER et BORK (1994) suggèrent par contre des résultats plus nuancés sur des échantillons de sols non remaniés. Sur un sol cultivé, les différences de caractéristiques du sol selon la profondeur pourraient ainsi imposer une certaine variabilité verticale du paramètre de potentiel effectif d'infiltration. Par ailleurs, GIMENEZ *et al*. (1992) estiment que le potentiel sous une croûte est indépendant de la variation des intensités de la pluie. Finalement, malgré certaines limites possibles mais que nous ne pouvons pas modéliser, nous conserverons l'hypothèse d'un potentiel hydrique constant du sol humecté lors de l'infiltration, qui semble en moyenne bien démontré.

	Potentiel effectif (cm, valeur absolue)			**Potentiel effectif (cm, valeur absolue)**	
Texture	Moyenne (1)	Quelques mesures (2)	**Texture**	Moyenne (1)	Quelques mesures (2)
Sand	2		Clay loam	8	7.4 ± 0.7 - 8.7 ± 4.9
Loamy sand	3		**Silty clay loam**	**10**	**8.8 ±1.2 - 11.9 ±0.1/1.8**
Sandy loam	6		Sandy clay	6	
Loam	7	7.6 ±1.6	Silty clay	11	
Silt loam	10	8.8 ±1.2 - 14.2 ±2.4	Clay	9	8.9 ±0.5
Sandy clay loam	5				

(1) BRAKENSIEK et RAWLS, 1983 *(2) SHARMA et al., 1981*

Tableau n°15: *valeurs mesurées du potentiel hydrique effectif d'infiltration sur différents types de sols*

Le tableau n°15 présente les valeurs classiques par grandes catégories de sols. Ces données indiquent clairement que l'effet a tendance à être d'autant plus fort que le sol est argileux. FOX *et al*. (1998a, 1998b) trouvent les valeurs de 8.36cm (flaquage faible) à 9.96cm (flaquage fort) pour le sol de Villamblain (lit de semence reconstitué en laboratoire), très semblable à celui de Grignon comme nous l'avons déjà vu. Nous prenons donc pour le sol de Grignon une valeur de potentiel

effectif d'infiltration de 10cm (en valeur absolue). Compte tenu des éléments présentés, nous supposons ce paramètre homogène et constant sur toute la tranche de sol humectée lors de l'infiltration, et négligeons ainsi différentes questions de variabilité spatiale et temporelle (stem-flow, fissuration de la croûte, etc.).

b) Description des caractéristiques hydrodynamiques et utilisation pour calculer les paramètres de l'équation de GREEN-AMPT

Une donnée essentielle, et qui n'apparaît que très rarement dans la bibliographie du modèle de GREEN-AMPT, est la liaison théorique entre les trois paramètres de l'infiltration à travers le paramètre de « potentiel effectif d'infiltration ». Nous allons voir que ce dernier paramètre permet, en connaissant les courbes complètes K(Ψ) et θ(Ψ) des différentes couches de sol, de déterminer assez rigoureusement les valeurs des trois paramètres de GREEN-AMPT.

- ***Techniques classiques d'estimation des paramètres hydrodynamiques du sol***

La conductivité hydraulique à saturation est le paramètre le plus essentiel de calibration du modèle d'infiltration de GREEN-AMPT, et pourtant sur un sol cultivé, celui-ci varie de deux ordres de magnitude entre les potentiels de -10cm et de 0cm (voir notamment JARVIS et MESSING, 1995, ROSS et SMETTEM, 1993, MOHANTY, 1999, COPPOLA, 2000). Cet élément capital nous a amené à rechercher un bon réalisme dans la description de la conductivité hydraulique à proximité de la saturation en eau du sol.

Quelques études proposent différentes techniques de détermination des paramètres du sol pour l'équation de GREEN-AMPT, notamment BRIDGE and SILBURN (1995). Les trois paramètres du modèle de GREEN-AMPT pour le sol sous la croûte (conductivité hydraulique à saturation, succion effective au front d'humectation, humidité volumique à saturation) peuvent *grosso modo* être déterminés de trois manières : mesure directe par des expérimentations d'infiltration, utilisation des lois K(ψ) et θ(ψ) déterminées sur des échantillons de sol en laboratoire, ou encore inversion d'un modèle d'infiltration à partir de mesures d'infiltration et/ou de ruissellement. Dans beaucoup d'études de la bibliographie, la liaison entre les trois paramètres de GREEN-AMPT reste largement incohérente, et tributaire de la méthode de détermination. Lorsque les différentes relations K(ψ) et ψ(θ) sont utilisées, le sol lors de l'infiltration est supposé saturé pour le potentiel hydrique nul (modèle de VAN GENUCHTEN) ou le potentiel d'entrée ou d'expulsion d'air (modèles de CAMPBELL ou BROOKS-COREY). La succion effective au front d'humectation est calculée le plus souvent à partir de formules empiriques ou par ajustement sur des mesures d'infiltration et/ou de ruissellement. La conductivité hydraulique à saturation est quant à elle calibrée à partir de résultats expérimentaux, ou assimilé directement à la valeur définie dans les relations K(ψ) ou K(θ). L'humidité volumique à saturation est déterminée soit par la mesure, soit selon la relation ψ(θ). Souvent, l'un ou les deux paramètres de succion effective au front d'humectation et d'humidité à saturation sont pris en simple ordre de grandeur, tandis que le fonctionnement du modèle de GREEN-AMPT est maîtrisé en ajustant seulement la valeur de la conductivité hydraulique à saturation.

Nous avons jugé *a priori* que les relations K(ψ) et ψ (θ) étaient susceptibles de nous fournir les éléments les plus complets pour déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'équation de GREEN-AMPT. Les deux modèles K(ψ) / ψ (θ) les plus employés sont ceux de CAMPBELL (ou BROOKS et COREY), et de VAN GENUCHTEN. Ce dernier est *a priori* le plus précis, et généralement déterminé sur des échantillons de sol généralement non remanié (cylindres de 15cm de diamètre et 7cm de haut) entre les potentiels de -10 cm et -1 000 cm lors d'une expérimentation de dessiccation (méthode de WIND, détaillée dans QUETIN *et al*., 1998). Le modèle de VAN GENUCHTEN est donc en toute rigueur invalide entre les potentiels de 0 et -10cm, et au-delà de -1000 cm, ce qui comme nous le verrons ne pose pas de problème dans notre cas. Le modèle de CAMPBELL est plus simplifié et très généralement calibré avec moins de précision, et de plus limité aux potentiels plus bas que le potentiel d'entrée d'air (généralement de quelques dizaines à

une centaine de centimètres de potentiel hydrique négatif). Ces deux modèles se basent sur l'hypothèse essentielle, vérifiée de façon expérimentale, que les paramètres décrivant la relation $\psi(\theta)$ sont directement utilisables pour décrire la relation $K(\psi)$ lorsque l'on connaît la valeur de Ks. A l'instar de l'essentiel des autres études sur l'infiltration, nous supposons que l'effet d'hystérèse entre dessiccation et humectation est négligeable.

Nous avons estimé pour notre part que l'utilisation des relations hydrodynamiques des différentes couches de sol, couplée à une valeur donnée du paramètre de « potentiel effectif d'infiltration », était la méthode la plus rigoureuse pour estimer les paramètres de GREEN-AMPT.

- ***Relations $K(\psi)$ et $\psi(\theta)$ de VAN GENUCHTEN pour le sol de Grignon***

Nous avons pu obtenir les valeurs des paramètres du modèle de VAN GENUCHTEN pour le sol de Grignon, données dans le tableau n°16 (COQUET et COUTADEUR, 2001, communication personnelle, selon les mesures de QUETIN, INRA d'Orléans, utilisant la méthode de WIND avec un échantillon par couche de sol). Ces données nous permettre d'étudier trois couches de sol et d'appréhender l'impact de deux types de travail du sol (semis et labour) sur les paramètres hydrodynamiques du sol, par rapport au sol non travaillé. Nous supposerons que chacune des couches possède des caractéristiques homogènes, bien que cela ne soit pas réaliste dans tous les cas (labour notamment, cf. COUTADEUR *et al.*, 2001), mais ce niveau de complexité dépassant toutefois le cadre de la présente étude.

Le modèle de VAN GENUCHTEN s'exprime comme suit :

$-10cm \geq \Psi \geq -1000cm$ *(à l'extérieur du domaine, relations $K(\theta)$ et $\psi(\theta)$ extrapolées)*

$$Se = \frac{\theta - \theta r}{\theta s - \theta r} = \left[1 + |\alpha.\psi|^n\right]^{-m}$$

$$K(\theta) = Ks.Se^p.\left\{1 - \left[1 - Se^{1/m}\right]^m\right\}^2$$

$$m = 1 - 1/n$$

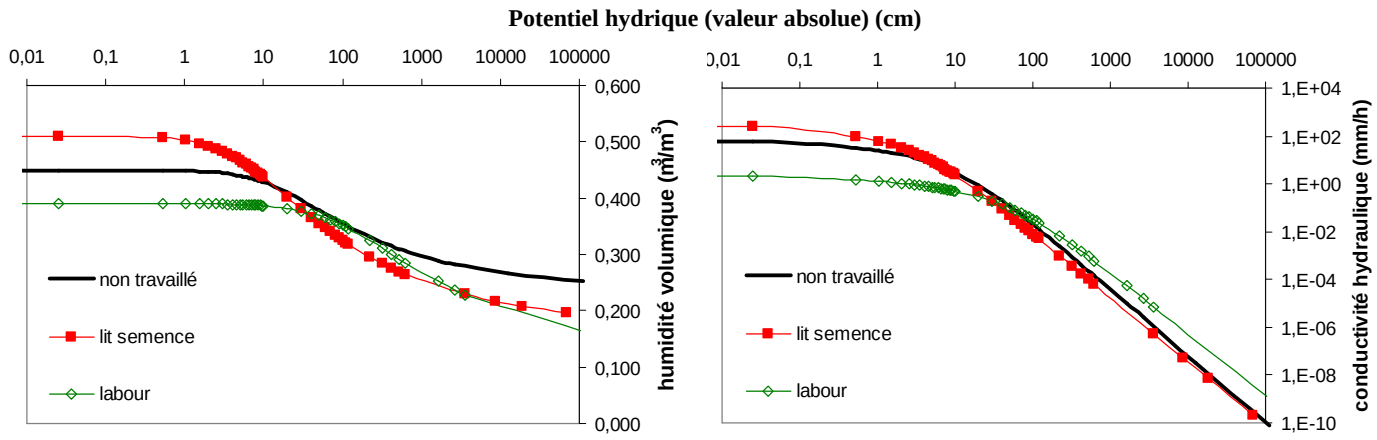
θ = humidité volumique (m^3/m^3)
θs = humidité volumique du sol à saturation (m^3/m^3)
Ψ = potentiel hydrique (m)
K = conductivité hydraulique (m/s)
Ks = conductivité hydraulique à saturation (m/s)
α, m, n, p = paramètres (sans unités, sauf α en m^{-1})
$p = 0.5$

Couche de sol	θs (m^3/m^3)	θr (m^3/m^3)	n	α (m^{-1})	Ks (m/s)
Non travaillé (prof. > 30cm)	0,450	0,240	1,31	6,6	$2{,}10.10^{-5}$
Lit de semence (prof. 0-10cm)	0.510	0.170	1.27	18.17	$1{,}18.10^{-4}$
Labour (prof. 10-22cm) (*)	0.390	0.110	1.23	1.16	$8.7.10^{-7}$

(*) Il s'agit ici d'une mesure sur la partie « terre fine » ou « gamma » du labour. D'autres paramètres étaient disponibles pour la partie « mottes delta » mais cela constituait a priori un cas trop extrême en terme d'infiltrabilité. En outre, les mesures par la méthode TRIMS semblent montrer que le labour « terre fine » a les caractéristiques de conductivité du labour « moyen »

Tableau n°16 : *valeurs des paramètres de VAN GENUCHTEN pour le sol de Grignon*

Les figures n°96 et 97 en montrent la représentation. Nous observons quelques particularités. Tout d'abord, la fabrication d'un lit de semence augmente la conductivité du sol seulement dans la partie très proche de la saturation, et diminue un peu la perméabilité du sol sur le reste du domaine de potentiel ; le labour engendre le processus exactement contraire. Dans le domaine de l'infiltration finalement, à un potentiel de quelques centimètres, le lit de semence est plus conducteur que le sol non travaillé, lui-même beaucoup plus conducteur que le labour.



Figures n°96 et 97 : *relations de VAN GENUCHTEN ψ(θ) et K(ψ) pour le sol de Grignon*

- ***Estimation du réalisme des relations K(ψ) et ψ (θ) du sol de Grignon pour calculer l'infiltration***

Pour définir le fonctionnement du sol très proche de la saturation, nous avons étudié les mesures d'infiltrométrie sous succion menées *in situ* (COUTADEUR *et al.*, 2001, par la méthode de TRIMS entre les potentiels 0cm et -10cm), en complément des précédentes mesures de WIND (valeurs détaillées dans l'annexe n°15). Ces derniers points, constituant ce que nous appellerons de manière étendue le « domaine de macroporosité », peuvent être intégrées par le modèle de JARVIS et MESSING (1995) qui est l'une des rares approches simples et validées qui décrivent la relation K(ψ) aux potentiels proches de la saturation :

$$K = K_*.\exp\left[\alpha_1.\left|\Psi - \Psi_*\right|\right]$$
$$(0 \le \Psi \le \Psi_*)$$
$$K = K_*.\exp\left[\alpha_2.\left|\Psi - \Psi_*\right|\right]$$
$$(\Psi_* \le \Psi \le \Psi i)$$

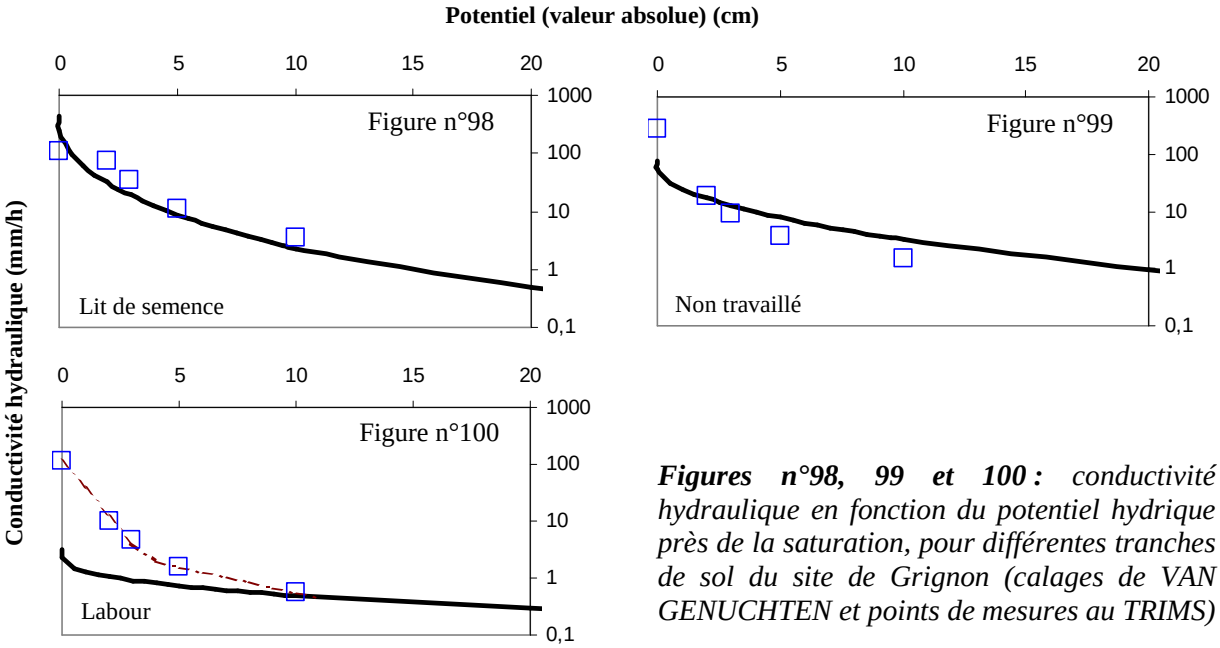
Ψ_* = potentiel caractéristique de la macroporosité (m)
K_* = conductivité hydraulique au potentiel caractéristique de la macroporosité (m/h)
$\alpha 1$, $\alpha 2$ = paramètres (m^{-1})

Nous définissons Ψi le potentiel à l'intersection avec la courbe K(ψ) de CAMPBELL ou VAN GENUCHTEN. Le potentiel caractéristique Ψ_* définit la limite entre la macroporosité et la porosité de gamme inférieure, et se manifeste par un changement de pente dans la courbe K(ψ) avec une représentation de K en échelle logarithmique. Ce point est situé autour de –2.5 à –6.0 cm en général, et -4.2 / -4.8 cm pour un sol de type « silty clay loam » avec environ 45% d'argiles (JARVIS et MESSING, 1995). MOHANTY, 1999, trouve la valeur de -3cm pour un sol de la même classe granulométrique que celui de Grignon. Ainsi, la valeur de -4cm semble constituer l'ordre de grandeur pour le sol de Grignon, comme nous allons le confirmer.

Les figures n°98, 99 et 100, comparant les relations de VAN GENUCHTEN et les mesures d'infiltrométrie près de la saturation, montrent que les paramètres du modèle de VAN GENUCHTEN, tout au moins pour la partie K(ψ), présentent une image très réaliste de la conductivité proche de la saturation, chose remarquable compte tenu de l'habituel flou ressortant de la bibliographie sur ce point. Au potentiel de -10cm, équivalant au potentiel effectif d'infiltration dans notre cas, nous voyons que la macroporosité n'a pas d'effet sur la conductivité hydraulique, et les valeurs de conductivité prévues par les courbes de VAN GENUCHTEN apparaissent très raisonnables. Compte tenu de ce réalisme, nous utiliserons directement les courbes de VAN GENUCHTEN pour estimer les paramètres d'infiltration de GREEN-AMPT, sans tenir compte de la macroporosité.

Nous étudierons néanmoins en partie l'impact de la macroporosité sur l'estimation des paramètres de GREEN-AMPT. Aussi, dans le cas seul du labour, la modélisation de la

macroporosité nécessite l'emploi du modèle de JARVIS et MESSING pour lequel nous trouvons les paramètres donnés dans le tableau n°17 (courbe représentée sur la figure n°100).



Figures n°98, 99 et 100 : *conductivité hydraulique en fonction du potentiel hydrique près de la saturation, pour différentes tranches de sol du site de Grignon (calages de VAN GENUCHTEN et points de mesures au TRIMS)*

	α1	α2	Ψ_* (cm)	Ψ_i (cm)	K_* (mm/h)	K(Ψ=0) (mm/h)
Labour	-1.0963	-0.2072	-3.6	-11.0	2.15	111.25

Tableau n°17 : *paramètres du modèle de macroporosité de JARVIS et MESSING pour la tranche labourée*

c) Etude du paramètre de « succion effective au front d'humectation »

La succion effective au front d'humectation, Hf, est le terme le plus compliqué de l'équation de GREEN-AMPT, et dont l'étude est généralement négligée.

Plusieurs études se sont néanmoins attachées à calculer et étudier les variations du paramètre de succion effective au front d'humectation, selon un certain nombre de modèles (citons MEIN et LARSON, 1973, AGGELIDES et YOUNG, 1978, MEIN et FARRELL, 1974, BRAKENSIEK, 1977, NEUMAN, 1976, RAWLS *et al.*, 1983 cités par RISSE *et al.*, 1995). Deux types d'approches sont généralement employées : des formules analytiques basées sur les courbes hydrodynamiques du sol et des approches entièrement empiriques.

Les approches les plus simples (notamment BOUWER, 1966, 1969 ; BRAKENSIEK, 1977 ; AGGELIDES et YOUNG, 1978), considèrent généralement que la succion effective au front d'humectation est égale à une certaine proportion (coefficient de 0.5 à 1.0) du potentiel d'entrée d'air (ou d'expulsion d'air, selon qu'on considère ou non l'hystérèse - voir notamment FALLOW et ELRICK, 1996). Ces modèles nous semblent trop simplistes, et de surcroît le coefficient de proportion est très variable selon les auteurs. Nous retiendrons néanmoins que ce type d'approche fournit des valeurs de la succion effective au front d'humectation de l'ordre de 30mm à 600mm selon le type de sol, et dévoile une sensibilité importante au phénomène d'hystérèse, que nous négligerons.

On trouve diverses expressions mathématiques plus complètes de Hf, dont la suivante nous a paru solide car démontrée à partir de l'équation de RICHARDS par YOUNGS (1974) :

$$Hf = \frac{1}{Ks}.\int_{\psi i}^{\psi s} K(\psi).d\psi$$

K(ψ) = conductivité hydraulique (mm/h)
Ks = conductivité hydraulique à saturation (mm/h)
ψ = potentiel hydrique (mm)

L'intégration est faite entre l'état initial (Ki, Ψi) et saturé (Ks, Ψs) du sol.
Nous noterons également l'approche de VANDERVAERE *et al.* (1998) qui calculent Hf en fonction du potentiel hydrique à l'interface croûte / sol sous-jacent, avec une approximation de l'équation de YOUNGS (1974).

Il apparaît dès lors clairement que la succion effective au front d'humectation, Hf, d'une part diminue lorsque l'humidité initiale du sol s'approche de la saturation (valeur nulle pour un sol saturé), et est d'autant plus faible que la variation de K(Ψ) est rapide près de la saturation. De ce fait, le paramètre Hf est fonction de l'humidité initiale et du potentiel effectif d'infiltration. Nous aurons donc besoin d'un modèle d'évolution de la succion effective au front d'humectation en fonction de l'humidité initiale du sol. Ces points n'ont semble-t'il pas été véritablement étudiés dans la bibliographie, et les auteurs pour la plupart déterminent une valeur constante de Hf quelle que soit l'humidité initiale du sol, ce qui peut conduire à des résultats aberrants pour un sol très humide (ROSNOBLET, 1998).

Des études expérimentales (AGGELIDES et YOUNG, 1978) indiquent par ailleurs que les formules analytiques donnent des estimations biaisées de la valeur du paramètre (25% de surestimation moyenne avec le modèle de YOUNGS, 1974), et que les meilleurs résultats seraient obtenus avec une valeur constante de succion effective au front d'humectation calculée à partir de la formule empirique grossière de BOUWER, 1969.

Le passage par les courbes hydrodynamiques était néanmoins nécessaire pour étudier la valeur et la variabilité du paramètre Hf, et nous avons donc utilisé les relations de VAN GENUCHTEN pour le sol de Grignon, calculant Hf avec la formule de YOUNGS (1974). La figure n°101 montre les valeurs calculées de Hf sur sol sec en fonction du potentiel effectif d'infiltration, pour les différentes couches. Pour tester plus de données, nous considérons également les relations de VAN GENUCHTEN estimées pour le sol « non travaillé » utilisé par PERSONNE (1998). Nous voyons bien que Hf est largement sensible au potentiel effectif d'infiltration. A la saturation totale (potentiel nul), Hf prend des valeurs basses, mais qui restent néanmoins cohérentes avec les données de la bibliographie. Il semble aussi que le travail du sol augmente la valeur de Hf, particulièrement avec un labour.

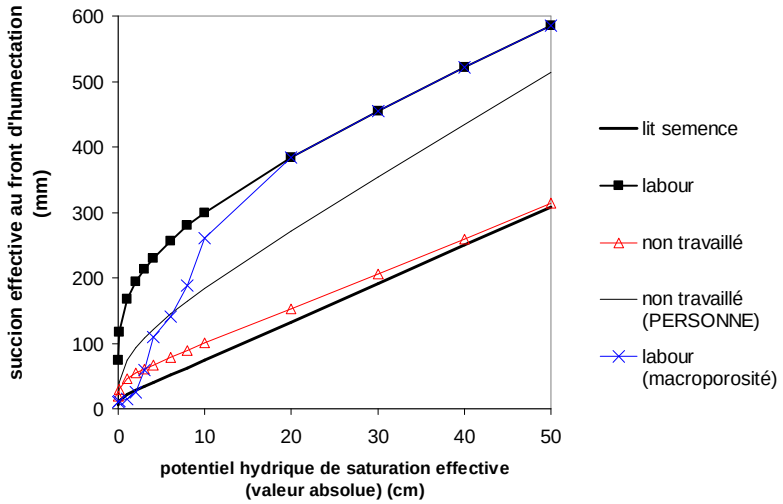


Figure n°101 : *calculs de la succion effective au front d'humectation en fonction du potentiel effectif d'infiltration*

Nous avons regardé à titre indicatif l'effet de la macroporosité dans le cas du labour avec le modèle de JARVIS et MESSING, et observons un effet très sensible, mais seulement pour les potentiels compris entre 0 et -10cm. Pour des sols ayant un potentiel effectif d'infiltration proche de zéro, la macroporosité devra de toute évidence être intégrée dans le calcul de Hf.

Pour notre part, nous utilisons la valeur de -10cm de potentiel effectif d'infiltration, ce qui nous permet de négliger l'effet de la macroporosité.

Les points sur la figure n°102 indiquent les valeurs de Hf calculées en fonction du déficit hydrique de saturation. La variation de Hf se montre très importante selon la valeur de l'humidité initiale du sol, tendant vers la valeur nulle sur sol entièrement saturé, et caractérisée par une valeur maximale lorsque le sol est sec (forte valeur du déficit hydrique de saturation).

Pour retraduire cet effet, nous n'avons pas trouvé de modèle robuste dans la bibliographie. Parmi les très rares propositions, RISSE *et al.* (1995) ou encore ZHANG *et al.* (1995a, 1995b) expriment par exemple une relation linéaire entre la succion effective au front d'humectation et le déficit hydrique de saturation, expression que nous jugeons trop simpliste.

Nous avons alors développé un modèle simple et robuste. Nous définissons un paramètre de succion effective au front d'humectation sur sol sec, noté Hf_{max}, et calons une loi logarithmique de décroissance de Hf à proximité de la saturation (courbes en pointillés représentées sur la figure n°102). Le modèle est ainsi défini en deux parties :

$0 \le Hf(\Delta\theta) \le Hf_{max}$:

$$Hf = A.\ln(\Delta\theta) + B$$

$Hf(\Delta\theta) \le Hf_{max}$:

$$Hf = Hf_{max}$$

$\Delta\theta$ = déficit hydrique de saturation (m^3/m^3)
A et B = paramètres (mm)
Hfmax = valeur maximale de succion au front d'humectation (pour une valeur élevée de $\Delta\theta$) (mm)

Il est nécessaire de connaître les valeurs de trois paramètres (A, B et Hf_{max}), mais nous avons estimé que deux d'entre eux sont directement liés : $B = 1{,}34.Hf_{max} + 33{,}13$ (r^2 = 0.999 à partir de 4 points). Les valeurs des paramètres par tranche de sol sont données dans le tableau n°18.

	Hf_{max} (mm)	A (mm)	B (mm)
Semis	74.3	15.88	130.94
Labour	300.0	60.55	435.76
Non travaillé	100.1	21.33	170.67
Non travaillé (PERSONNE, 1998)	184.2	36.90	277.49

Tableau n°18 : *valeurs des paramètres du modèle de calcul de Hf pour les différentes tranches de sol*

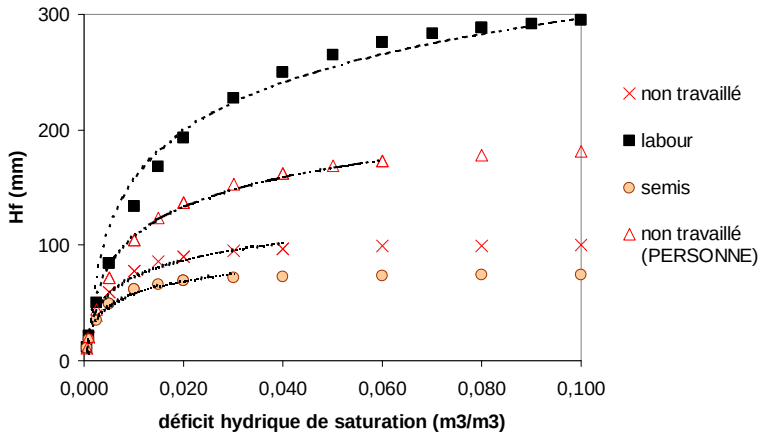


Figure n°102 : *évolution de Hf en fonction du déficit hydrique de saturation (valeurs calculées représentées par des points, et modèle simplifié représenté par des traits pointillés)*

Nous n'avons pas étudié les variations des paramètres en fonction du potentiel effectif d'infiltration. Nous avons simplement constaté que les paramètres A et Hf_{max} diminuent lorsque le potentiel effectif d'infiltration se rapproche de zéro, et une étude plus poussée devrait permettre de donner une formule d'expression de cette variation. Egalement, nous avons pu estimer que les variations calculées pour Hf en fonction du potentiel effectif d'infiltration, bien qu'importantes, restent cohérentes. La figure n°103 représente les points Ks(Hf) pour les différentes couches de sol de Grignon, ainsi que des données de MAHMOUD (1991) obtenues par calibration du modèle de GREEN-AMPT sous pluie artificielle sur placettes de 3x11m de sol cultivé (granulométrie très proche de notre parcelle de Grignon). Ces résultats montrent bien que Hf est d'autant plus faible que Ks est élevé, et suggèrent en outre que l'on puisse trouver une relation de pédotransfert entre Hf et Ks.

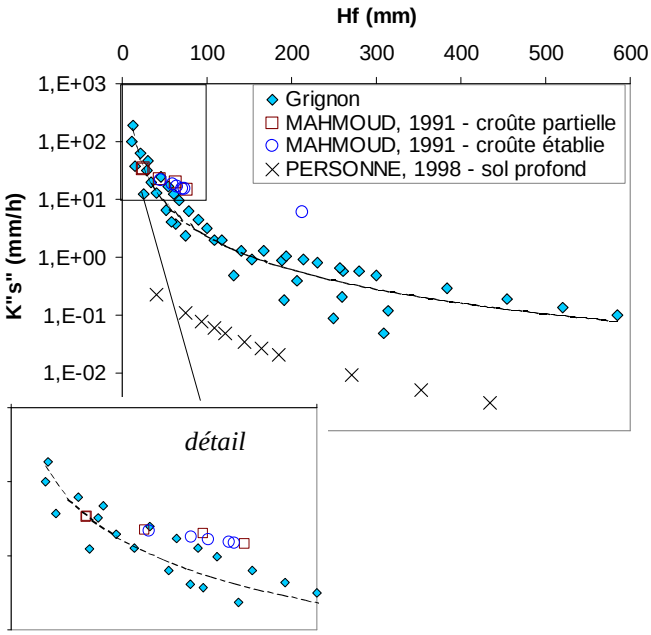


Figure n°103 : *rapport entre la conductivité hydraulique à « saturation » et la succion effective au front d'humectation.*

$Ks = 16101.Hf^{-1,9174}$
$r^2 = 0.90$

d) Bilan des valeurs des paramètres du modèle de GREEN-AMPT (sol sous la croûte)

Les valeurs des paramètres de conductivité hydraulique et d'humidité volumique à « saturation » (respectivement notés Ks et θs) sont données directement par les relations de VAN GENUCHTEN à une valeur donnée de potentiel hydrique, équivalant au « potentiel effectif d'infiltration ». Le paramètre de succion effective au front d'humectation a été déterminé par des calculs basés sur la formule de YOUNGS (1974). Nous avons ainsi pu fixer les valeurs des trois paramètres de GREEN-AMPT (voir tableau n°19) pour les trois couches de sol étudiées, au potentiel effectif d'infiltration de -10cm. A titre de comparaison, nous indiquons également les valeurs au potentiel de -4cm (potentiel caractéristique de la macroporosité selon JARVIS et MESSING, 1995), qui montrent bien le poids essentiel du paramètre de potentiel effectif d'infiltration sur les valeurs des paramètres d'infiltration.

	Valeurs utilisées			***Pour indication, valeurs au potentiel de –4cm (macroporosité)***		
	Ks (mm/h)	**Hf_{max} (mm)**	**θs (m3/m3)**	***Ks (mm/h)***	***Hf_{max} (mm)***	***θs (m3/m3)***
Semis	2.332	74.3	0.437	*12.698*	*40.2*	*0.475*
Labour	0.494	300.0	0.386	*0.808*	*229.8*	*0.389*
Non travaillé	3.191	100.1	0.428	*9.773*	*67.4*	*0.442*

Tableau n°19 : *récapitulatif des valeurs des paramètres utilisés pour le modèle de GREEN-AMPT, au potentiel hydrique effectif de -10cm (pour indication : valeurs pour -4cm, non retenues)*

3) Fixation des paramètres de calcul de l'infiltrabilité du sol

Tous les paramètres et variables d'entrée du modèle d'infiltration / ruissellement ont été fixés, et seuls les deux paramètres de calcul l'infiltrabilité du sol à partir de l'équation intégrée de GREEN-AMPT (cf. chapitre I) devaient encore être précisés. Nous avons estimé que la valeur de 10^{-3} mm était tout à fait satisfaisante pour le paramètre ΔV. Nous avons fixé la valeur du pas de temps (Δt) à 0.01h afin de donner un compromis entre la vitesse et la précision des calculs. Nos tests utilisant de fortes pluies (10 ou 20mm réparties en courbe de Gauss sur une durée de 0.55h) sur un sol en lit de semence (humidité variable et capacité de flaquage de 1mm), ont montré qu'un pas de temps beaucoup plus fin donnait des valeurs de ruissellement supérieures de seulement 0.02 à 0.07mm. Puisque nous ne calculons que très peu d'événements de ruissellement par année (par exemple, 7 à 11 événements en 1999 selon les simulations, pour un ruissellement cumulé de près de 40mm), nous considérons que cette imprécision est tout à fait négligeable.

4) Conclusions

Nous avons pu déterminer l'ensemble des paramètres du sol pour le modèle d'infiltration, en caractérisant quatre couches aux propriétés différentes (croûte, semis, labour d'hiver, sol non travaillé), d'une manière empirique et raisonnée.

Nous avons pu obtenir un ordre de grandeur de la résistance hydraulique de la croûte à partir de la bibliographie. Des mesures directes sur notre sol devraient être envisagées pour préciser ces résultats.

Nous avons également déterminé les paramètres du sol sous la croûte de manière rigoureuse, à partir de relations de VAN GENUCHTEN et en admettant l'existence d'un potentiel hydrique constant dans le sol humecté au cours de l'infiltration (« potentiel effectif d'infiltration », de -10cm). Le paramètre de succion effective au front d'humectation a en particulier fait l'objet d'une étude plus développée, aboutissant à l'établissement d'un modèle original de calcul en fonction du déficit hydrique de saturation. L'hypothèse principale de ce travail est la constance et l'homogénéité du potentiel effectif d'infiltration, paramètre purement empirique qu'il serait judicieux de tester par des mesures sur notre sol. Nous pourrons juger de la robustesse des paramètres choisis dans le chapitre V.

Le paragraphe suivant s'attache à restituer la dynamique des différents paramètres du modèle d'infiltration / ruissellement, et permettra de préciser notamment le terme de hauteur de flaquage (Ho) de l'équation de GREEN-AMPT.

II) Restitution de la dynamique des paramètres du modèle d'infiltration / ruissellement

Plusieurs paramètres d'infiltration / ruissellement connaissent une importante variabilité temporelle (capacité maximale de flaquage, résistance hydraulique de la croûte de battance, paramètres hydrodynamiques du sol), que nous allons maintenant tenter d'intégrer à partir d'approches simples. Nous traiterons de l'évolution de la rugosité en premier, qui détermine l'évolution de la capacité de flaquage de la surface du sol et participe à l'évolution de la croûte de battance.

1) Evolution de la rugosité et de la capacité de flaquage

Nous utilisons ici les résultats de nos mesures pour fixer les paramètres d'un modèle d'évolution de la rugosité, qui nous servira à établir la dynamique de la capacité de flaquage.

- ***Modélisation de l'évolution de la rugosité à partir des résultats***

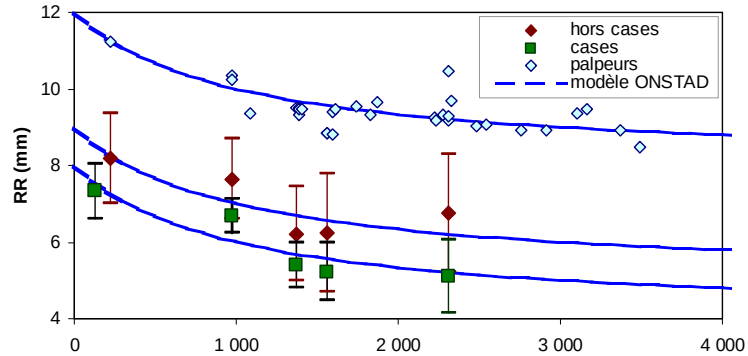
L'évolution de la rugosité est selon la plupart des modèles calculée à partir du cumul de la hauteur de précipitation ou d'énergie cinétique, et selon essentiellement deux formes d'équations.
La première utilise une forme exponentielle (ZOBECK et ONSTAD, 1986, BURWELL et LARSON, 1969 cités par ZOBECK et ONSTAD, 1987, POTTER, 1990 cité par GOVERS *et al.*, 2000), repoussée car traduisant une évolution trop drastique. Une deuxième forme de modèle est donnée par ONSTAD *et al.* (1984), ROMKENS et WANG (1985b cités par ZOBECK et ONSTAD, 1987), TORRI *et al.* (1999). Nous avons retenu la formule de ONSTAD *et al.* (1984), largement validée, employant un petit nombre de paramètres et exprimant la pluie selon son énergie cinétique :

$$RRp = RRo - b.\left[\sum Ec \Big/ 1 + \sum Ec\right]$$

$$b = RRo - RRf$$

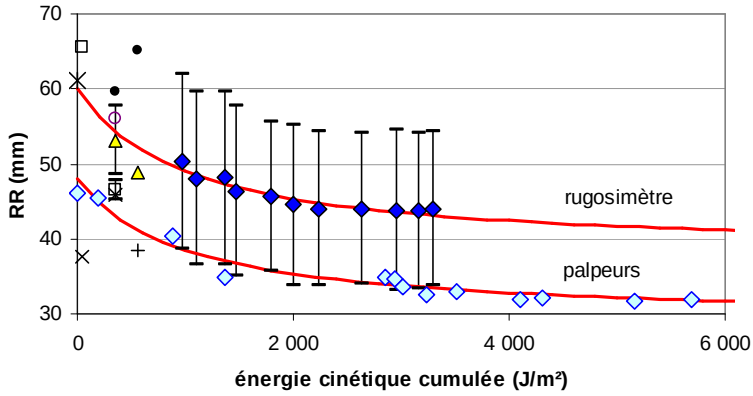
RRp = rugosité à un instant donné (cm)
RRo = rugosité initiale (cm)
RRf = rugosité finale (cm)
∑P = cumul de l'énergie de la pluie (KJ/m²)

Les figures n°104 et 105 présentent les résultats de nos mesures, et les courbes calées avec le modèle de ONSTAD (valeurs des paramètres données dans le tableau n°20).



Figures n°104 et 105 : *évolution de la rugosité (« random roughness » ou « RR ») en fonction du cumul de l'énergie cinétique des pluies, sur le lit de semence en 1999*

Lit de semence
(mesures 1999)



Labour d'hiver
(rugosimètre 1998/99, palpeurs 1999/2000

	RRo (cm)	b (cm)
Labour d'hiver		
- palpeurs (1 profil)	4.8	- 1.9
- rugosimètre (6 profils)	6.0	- 2.2
MOYENNE	*5.8*	*- 2.16*
Lit de semence		
- palpeurs (1 profil)	1.2	- 0.4
- rugosimètre « cases » (6 profils)	0.8	- 0.4
- rugosimètre « hors cases » (3 profils)	0.9	- 0.4
MOYENNE	*0.87*	*- 0.4*

Tableau n°20 : *valeurs des paramètres du modèle de ONSTAD d'évolution de la rugosité*

Nous noterons une importante variabilité entre transects, traduite par les barres d'écart type sur les figures. Nous voyons aussi que sur lit de semence, le modèle n'explique pas la faible décroissance de la rugosité mesurée jusqu'aux alentours de 1 000 J/m² de cumul, sans pouvoir véritablement l'expliquer. Les mesures obtenues par la méthode des palpeurs permettent néanmoins de constater des oscillations importantes de la rugosité non expliquées par les pluies, d'autant plus nettes que le sol se dessèche. Nous supposons que les processus de gonflement / retrait du sol induisent ces perturbations, notamment par la création de fissures de dessiccation. Nous négligerons ce dernier point, qui devrait en outre s'estomper avec l'humectation du sol de surface au cours du processus d'infiltration. L'apparition de fissures de dessiccation, que nous n'avons pas caractérisées mais qui sont susceptibles d'augmenter les capacités d'infiltration du sol (RUY *et al.*, 1999, NOVAK *et al.*, 2000), pourraient néanmoins biaiser les résultats du modèle d'infiltration / ruissellement. Finalement le modèle semble en moyenne bien restituer l'évolution de la rugosité en fonction de l'énergie cinétique des pluies.

- ***Généralisation du modèle d'évolution de la rugosité***

Deux questions nous paraissaient essentielles dans notre travail : (1) les valeurs des paramètres d'évolution de la rugosité sont-ils les mêmes pour les différents types de travail du sol, et (2) ont-ils la même valeur pour tous les types de sols ?

Nos résultats semblent montrer que le coefficient « b » du modèle est d'autant plus fort que la rugosité est élevée (figure n°106) . Il semble exister ici une relation empirique qu'aucun auteur ne paraît avoir établie, pour laquelle nous pouvons donner une l'expression :
$b = 0{,}026.RRo^2 - 0{,}527.RRo + 0{,}039$ (cm). Cette relation est obtenue à partir de seulement trois points et devra donc être étudiée plus largement. Nous avons pour notre part directement utilisé les valeurs moyennes de paramètres déterminées pour chaque situation culturale (tableau n°20). Il paraît logique que plus la rugosité initiale est élevée et plus l'écart avec la rugosité finale (égale à « b ») est important. Nous pensons que l'impact de la rugosité sur la valeur effective de l'énergie cinétique des pluies (BRAKENSIEK et RAWLS, 1983, BRISTOW *et al*., 1994) est un élément important d'explication, de même que le processus d'effondrement de la tranche de sol travaillée sous l'effet des pluies successives.

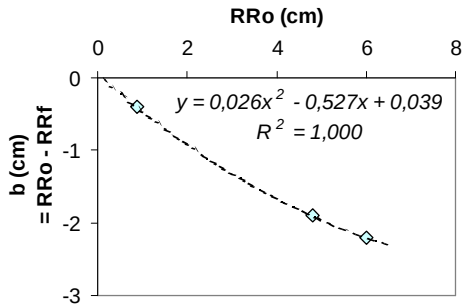


Figure n°106 : *expression du paramètre « b » en fonction de RRo*

Il paraît logique aussi que la rugosité initiale du sol soit fonction des caractéristiques du sol et de sa teneur en eau initiale. Les résultats de ONSTAD *et al.* (1984) montrent par exemple une valeur d'autant plus forte de la rugosité initiale que le taux d'argiles est élevé. A notre connaissance, seul POTTER (1990) a exprimé les paramètres d'évolution de la rugosité en fonction des caractéristiques physiques du sol (matière organique et taux d'argiles). Dans l'état actuel des connaissances, nous ne pouvons proposer de généralisation de nos données. Nous n'avons également pas étudié toutes les situations de surface de sol, pour lesquelles nous trouverons néanmoins des éléments dans la bibliographie (voir notamment ZOBECK et ONSTAD, 1987).

- ***Modélisation de la capacité maximale de flaquage de la surface du sol***

Le calcul de la capacité de flaquage de la surface du sol est un point délicat à cause de la variabilité de la rugosité et de la problématique du changement d'échelle, et aussi car le ruissellement peut débuter avant que ce volume soit entièrement constitué.

Les résultats qui nous semblaient les plus fiables sont ceux obtenus sur des « modèles numériques de terrain » (MNT), issus de mesures très précises de rugosité, car ils permettent de calculer précisément le volume flaqué, et de développer des modèles précis et relativement généralisables reliant des indices de rugosité à une valeur de capacité maximale de flaquage. En outre, il s'agit d'approches qui commencent actuellement à se développer au sein de notre Laboratoire (utilisation de rugosimètres électroniques développant un maillage 3D, photogrammétrie) et qui ne manqueront pas d'établir un lien intéressant avec la présente approche simplifiée du flaquage / ruissellement. Les surfaces étudiées sont généralement de quelques m² de dimensions au plus.

Basés sur ce principe de mesure, de très rares modèles de calcul de la capacité de flaquage sont proposés dans la bibliographie. Nous avons retenu le modèle très largement employé de ONSTAD (1984), qui exprime la capacité maximale de flaquage moyenne, MDS (« mean depression storage », en cm). KAMPHORST (2000) en a exprimé les paramètres de manière beaucoup plus robuste, à partir de MNT précis pour des états variables de surface du sol (dont labour et semis) :

$MDS = A.RR + b.RR^2$
où $A = a - c.S$

S = pente (%)
RR = random roughness (cm)
a = 0.246 ; b = 0.00861 cm^{-1} ; c = - 0.0117

KAMPHORST (2000) propose également une amélioration du modèle en exprimant les coefficients en fonction de la pente, que nous rejetons car dans le cas du labour d'hiver ils conduisent à calculer une capacité de flaquage qui augmente avec la pente, ce qui est *a priori* illogique.
KAMPHORST (2000) montre qu'il existe une variation importante de la capacité de flaquage selon les caractéristiques des bordures d'une placette. Dans le cadre de nos expérimentations de ruissellement, les placettes ayant une surface de 1m² et une bordure libre pour collecter le ruissellement, les paramètres effectifs de la capacité maximale de flaquage devraient en toute rigueur être un peu différents. Nous négligeons ce point.

- ***Effet de la pente sur le flaquage***

L'effet de la pente sur le flaquage est un paramètre important, car nous savons que le ruissellement est d'autant plus fort que la pente est importante. Nos mesures de ruissellement ont porté sur des placettes de semis de maïs de 1%, 3% et 6% de pente. La parcelle possède par ailleurs une pente variant localement de 0% à 1%.

La capacité de flaquage sur lit de semence s'avère relativement peu sensible à la pente dans la gamme de valeurs étudiée, avec une différence entre les pentes de 0% et 6% de 0.63mm et 0.36mm respectivement pour le stade initial et le stade final de la battance (figure n°107). Sur labour d'hiver, la capacité de flaquage est par contre beaucoup plus sensible à la valeur de la pente (figure n°108). Dans les deux cas de figure, au stade final de la battance, la sensibilité à la pente est un peu plus faible.

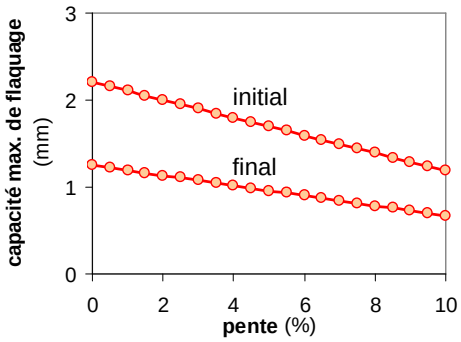


Figure n°107 : lit de semence

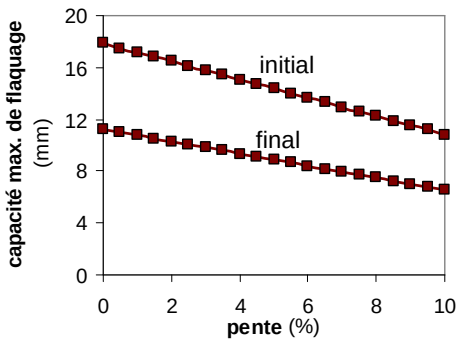


Figure n°108 : labour

Effet de la pente sur la valeur de la capacité maximale de flaquage selon le modèle de ONSTAD (1984) / KAMPHORST (2000) sur labour et semis, distinguant les stades initial et final de la battance

- ***Modélisation de la dynamique de la capacité de flaquage***

Comment calculer l'évolution de la capacité de flaquage ? KAMPHORST (2000) suggère de mesurer directement la capacité de flaquage et son évolution, mais nous pensons que cette méthode est très lourde et ne peut faire l'objet que de quelques études ponctuelles. L'idéal serait de disposer directement d'un modèle d'évolution de la capacité de flaquage en fonction des pluies, mais un tel modèle n'existe pas encore. Nous calculons donc la capacité de flaquage en fonction de la rugosité (« random roughness »), elle-même calculée en fonction du travail du sol (modèle de ONSTAD présenté précédemment).

La figure n°109 illustre les résultats de cette méthode. Nous représentons l'évolution de la capacité de flaquage en fonction du temps sur l'année 1999, en indiquant également les quantités de pluie journalière. Nous constatons d'abord une très grande supériorité de la valeur de la capacité de flaquage du labour sur le semis, et ceci participera sans doute beaucoup à expliquer les faibles capacités de ruissellement des sols labourés, communément admises comme étant nulles. Nous voyons d'autre part que l'évolution de la capacité maximale de flaquage est très irrégulière et dépend du rythme et de l'énergie cinétique des pluies, comme nous pouvons clairement le voir après le labour du sol, au cours d'une période de très forte pluviosité. Cela montre bien l'importance de l'aspect dynamique de la modélisation de la capacité maximale de flaquage.

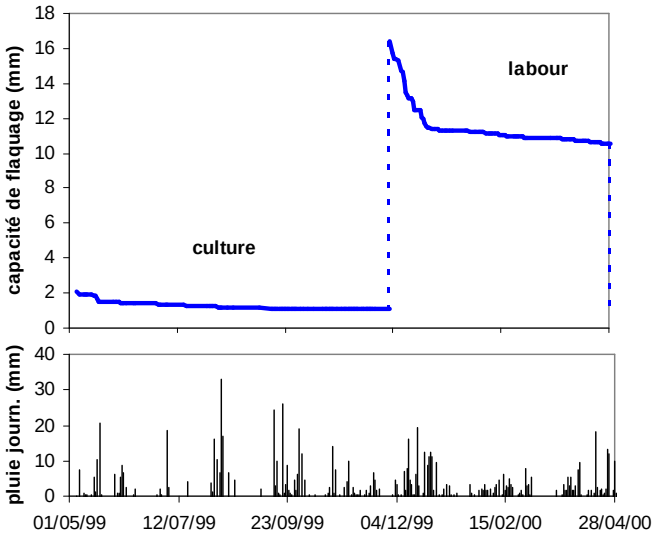


Figure n°109 : *évolution de la capacité maximale de flaquage calculée par deux modèles (ONSTAD, 1984 / KAMPHORST, 2000), couplée au modèle d'évolution de la rugosité de ONSTAD, 1984*

pente = 1%

- ***Conséquences pour le calcul du ruissellement***

Nous avons simplifié la question de l'échelle spatiale en considérant que la capacité de flaquage (en mm ou Kg d'eau / m²) de la parcelle entière est égale à celle estimée sur de petites placettes. A l'échelle de la parcelle, notre modèle pourrait ainsi surestimer le ruissellement, puisque nous ne modélisons pas à proprement parler le déplacement de la lame d'eau ruisselant à la surface du sol, qui possède une certaine inertie. Ceci constitue donc un aspect prospectif, qui pourra notamment s'inspirer des expressions récentes du coefficient de « résistance hydraulique à l'écoulement » basé sur le terme de rugosité « random roughness » (notamment le coefficient très employé de MANNING : GILLEY et FINKNER, 1991, MWENDERA et FEYEN, 1992, cités par TORRI *et al*., 1999).

Nous négligeons aussi la participation privilégiée de certains éléments de la rugosité. Le ruissellement sur une parcelle agricole se concentrerait d'abord dans les espaces délimités par la rugosité orientée, notamment les traces de roues très présentes sur un lit de semence (KAMPHORST, 2000, SOUCHERE *et al*., 1998). Nous supposons ainsi que les dépressions formées par les passages de roues ont la même rugosité et par extension la même capacité de flaquage que le reste de la surface du sol. A notre connaissance, aucune étude n'a encore apporté de résultats directement utilisables de la particularité et du rôle des passages de roues dans le processus de flaquage.

- ***Conclusions***

Le modèle de rugosité donne en moyenne de bons résultats, malgré que certains aspects de variabilité spatiale et temporelle des mesures ne soient pas restitués (gonflement / retrait notamment). La modélisation de la capacité de flaquage de la surface du sol et de son évolution est nécessaire au calcul du ruissellement. Bien qu'ayant bénéficié d'études précises, il s'agit d'un domaine dont les problématiques n'ont pas toutes été résolues, en particulier la signification des paramètres empiriques, la variabilité spatiale (notamment à l'échelle d'une parcelle agricole) et le poids exact de la pente (notamment pour les fortes valeurs de rugosité) et des traces de roues. Nous avons néanmoins utilisé un modèle simple d'évolution combinée de la rugosité et de la capacité de flaquage, permettant d'en retranscrire la dynamique. Bien que simple, nous pensons que cette approche constitue une bonne amélioration dans la modélisation du ruissellement par rapport à de nombreuses approches se préoccupant moins des aspects dynamiques des paramètres.

2) Evolution de la croûte de battance

Nous avons présenté précédemment l'introduction de la croûte de battance dans le modèle d'infiltration, à travers un paramètre de résistance hydraulique, que nous avons estimé de faible valeur. Néanmoins, une application du modèle sur des sols possédant une croûte de battance beaucoup plus importante justifie pleinement que nous en modélisions l'évolution temporelle.

L'évolution des caractéristiques des croûtes de battance sous l'influence du travail du sol et des caractéristiques des pluies, bien que complexe, a néanmoins fait l'objet de quelques approches simplifiées (voir notamment les travaux de BOIFFIN, HILLEL ou encore LINDEN), essentiellement à travers le terme de conductivité hydraulique à saturation. Nous proposerons donc une relation simple entre conductivité hydraulique à saturation et résistance hydraulique par le biais d'une valeur d'épaisseur équivalente de la croûte.

- *Modélisation de l'évolution de la conductivité hydraulique de la croûte*

Les résultats suivants de BOIFFIN *et al*. (1988) (tableau n°21) donnent une idée de l'impact de la formation de la croûte de battance sur la diminution des capacités d'infiltration du sol, entre les stades initial (sol fraîchement travaillé) et final (croûte entièrement développée), sur un sol sensible à la battance. Nous noterons aussi la forte variabilité de l'infiltrabilité du sol sous l'impact du remaniement de la croûte par les agents climatiques et biologiques (fissuration notamment). Ces ordres de grandeur sont cohérents avec les résultats classiques (cf. tableau n°14), et nous indiquent l'importance de tenir compte de la dynamique de la battance pour calculer l'infiltration.

Faciès morphologique de la surface du sol	**Gamme de variation probable de l'infiltrabilité (mm/h)**
Faciès fragmentaire initial	30-50
Faciès fragmentaire altéré à croûtes structurales	5-30
Faciès de transition (apparition locale de croûtes de dépôt)	2-5
Faciès continu à croûtes de dépôt	1-2
Faciès à croûtes remaniées (agents climatiques et biologiques)	> 5

Tableau n°21 : *classification de l'infiltrabilité du sol en fonction du stade d'évolution de la battance (BOIFFIN, mesures sur sol limoneux et humide par la méthode de la tâche saturée)*

La bibliographie présente toutefois assez peu de données de modélisation de l'évolution des croûtes, particulièrement sur le terme de résistance hydraulique (voir notamment MUALEM, 1990). L'essentiel des modèles exprime une évolution exponentielle de la conductivité « à saturation » des croûtes en fonction du cumul des pluies (hauteur ou énergie cinétique selon les auteurs). Nous avons trouvé en l'approche de BRAKENSIEK et RAWLS (1983) un modèle simple, physiquement robuste, et largement réutilisé par d'autres auteurs (notamment DIEKRÜGER et BORK, 1994, MOORE, 1981, ZHANG *et al*., 1995a, 1995b, CHU, 1985, cité par MUALEM, 1990) :

$$K_c = K_f + \left(K_0 - K_f\right).\exp\left(-C.Es\right)$$

Kc, Kf, Ko = conductivité hydraulique à saturation respectivement de la croûte, de la croûte finale, du sol sans croûte (cm/h)
C = coefficient empirique
Es = énergie d'impact des gouttes d'eau de pluie à la surface du sol (Joules)

MOORE, 1981, a montré que cette formulation était tout à fait solide et possédait un véritable sens physique à travers le paramètre « C ».

Ce modèle possède certaines variantes que nous n'avons pas étudiées (notamment MOORE, 1981, AHUJA, 1983, cités par MUALEM, 1990). Il semble aussi que de nombreuses études aient été menées en déviant la formule précédente de sa limite initiale, en exprimant non plus la conductivité de la croûte mais celle du sol en entier, avec des résultats relativement intéressants (notamment RISSE *et al.*, 1995). Nous négligeons ces données.

Une limite du modèle tient dans l'observation que l'énergie cinétique seule ne suffirait pas à décrire entièrement le processus d'évolution de la croûte (AHUJA et ROSS, 1983), donnant naissance à des modèles utilisant un terme d' « érositivité » de la pluie exprimée en KJ/m² mm/h (voir par exemple DIEKKRÜGER et BORK, 1994), que nous n'avons pas étudiés par souci de simplification. Nous soulevons également une limite essentielle : la valeur de la conductivité du sol sans croûte (« Ko ») est un paramètre très difficile à donner. En toute logique, il devrait correspondre à la conductivité effective du sol sous la croûte lorsque celle-ci est en place, et dans des conditions réelles d'infiltration sous une pluie.
Déterminer la conductivité finale est également difficile. BRAKENSIEK et RAWLS (1983, à partir de MOORE, 1981), en proposent une formulation, mais qui nous paraît hasardeuse. Nous avons donc considéré la valeur de la conductivité à saturation du sol argileux donné par CAMPBELL (1998), donnant une valeur tout à fait cohérente avec les données de la bibliographie (notamment SHARMA *et al.*, 1981, MOORE, 1981, KEITH *et al*., 1994).

Notons également que le modèle présenté ne restitue pas la variabilité des caractéristiques de la croûte sous l'effet des remaniements d'origine biologique et climatique (cf. BOIFFIN *et al*., 1988), ni sous l'impact mécanique du ruissellement.

- ***Fixation de la cinétique de la battance (paramètre « c »)***

Il nous restait à déterminer le coefficient de cinétique « C », pour lequel l'énergie d'impact de la pluie à la surface du sol est essentielle. BRAKENSIEK et RAWLS (1983) donnent une expression détaillée du paramètre « C », selon les données de LINDEN (1979) :

$$C = -\frac{1}{Eo}.\ln\frac{Kf}{Ko - Kf}$$

$$K(Eo) = 2.Kf$$

Eo = énergie de la pluie nécessaire pour que la conductivité de la croûte soit égale au double de la conductivité finale (J/m²)

Bien peu de modèles fournissent une estimation de l'énergie d'impact des gouttes d'eau à la surface du sol, Eo. Nous avons noté l'existence du modèle présenté par PANINI *et al*. (1997), que nous n'avons pas étudié car il utilisait une expression compliquée de la rugosité basée sur la distribution de diamètres d'agrégats. Une expression de l'énergie d'impact de la pluie à la surface du sol tenant compte du terme de « random roughness » est donnée par la formule suivante (BRAKENSIEK et RAWLS, 1983, BRISTOW *et al*., 1994) :

$$Es = Ep.B.(a - b.RR)$$

RR = rugosité ou « random roughness » (cm)
B = fraction de sol exposé à la pluie (sans unité)
Ep = énergie cinétique de la pluie incidente (J/m²)
a = 1.11 (sans unité) ; b = 0.247 (cm^{-1})

Le terme de réduction, a - b.RR, a une valeur respectivement de 0.99 (RR = 0.5 cm) et de 0.12 (RR = 4.0cm) pour un lit de semence et un labour d'hiver évolués, ce qui indique une très faible sensibilité à la battance du labour d'hiver. Il est intéressant de noter aussi qu'à partir d'une valeur de rugosité critique (RR = 4.5cm, caractéristique d'un labour d'hiver), la croûte selon ce modèle ne se forme pas (voir notamment RAWLS *et al*., 1990 cités par RISSE *et al.*, 1995). Ceci confirme nos observations de terrain. Nous considérerons également que, bien que déformée par la présence du couvert végétal, la pluie incidente à la surface du sol est homogène. Nous montrerons son poids sur l'évolution des caractéristiques de la croûte.
Le paramètre « C » doit être estimé à partir du temps de « demi-évolution » de la conductivité hydraulique de la croûte, pour laquelle diverses études rapportent la valeur de 0.5 à 1h sous une pluie artificielle forte et constante, de l'ordre de 50mm/h (BRAKENSIEK et RAWLS, 1983, DIEKRÜGER et BORK, 1994, EDWARDS et LARSON, 1964). Nous manquons de données expérimentales pour fixer exactement la valeur du paramètre recherché, aussi nous n'en avons fait qu'une simple approximation, en choisissant *a priori* la valeur intermédiaire de 0.75h, pour laquelle nous estimons une énergie cinétique de 1970 J/m². En supposant un lit de semence à son stade final d'évolution (RRo = 4,7mm), sans couvert végétal, avec des valeurs réalistes de conductivité (Ko =

2,3mm/h, Kf = 0.06mm/h), nous estimons la valeur de C = $1{,}85.10^{-3}$. Sur le labour, avec les mêmes considérations (Ks = 0.494mm/h, RRo = 21,6mm), nous trouvons pratiquement la même valeur, avec C = $1{,}74.10^{-3}$. Nous retenons la valeur de C = $1{,}8.10^{-3}$. Ceci est tout à fait de l'ordre de grandeur des données de la bibliographie, cette gamme étant néanmoins extrêmement large (voir notamment RISSE *et al.*, 1995).

- ***Passage de la valeur de la conductivité hydraulique à la résistance hydraulique de la croûte***

Pour relier la valeur de résistance à celle de la conductivité, nous avons dû procéder à une hypothèse d'évolution linéaire de l'épaisseur de la croûte, entre une valeur initiale (« Zmin ») et une valeur finale maximale (« Zmax »). L'autre choix possible d'évolution linéaire de la résistance de la croûte donnait lieu à une évolution illogique de l'épaisseur de la croûte (augmentation puis diminution) et a donc été directement écarté. Nous choisissons Zmin = 0. La valeur maximale de l'épaisseur de la croûte (en mm) est donnée par :

$$Z_{\max} = R_{\max}.K_f$$

Kf = conductivité hydraulique finale à saturation de la croûte (mm/h)
Rmax = résistance finale de la croûte (h)

Nous calculons l'évolution de l'épaisseur de la croûte, Zc (en mm), en fonction de la relation :

$$Z_c = \frac{(K_c - K_0)(Z_{\max} - Z_{\min})}{K_f - K_0} + Z_{\min}$$

Kc = conductivité hydraulique à saturation de la croûte (mm/h), donnée par le modèle de LINDEN, 1978
Ko = conductivité hydraulique à saturation du sol sans croûte (mm/h)

Nous calculons enfin la valeur de la résistance de la croûte (en h) avec :

$$R_c = Z_c / K_c$$

Zc = épaisseur de la croûte (mm)
Kc = conductivité hydraulique à saturation de la croûte (mm/h)

Comme le montre la figure n°110, selon notre approche, la résistance de la croûte croît de manière quasi exponentielle avec la formation de la croûte de battance. L'impact de la croûte ne sera donc véritablement marqué que pour une croûte bien formée. Nous n'avons pas trouvé d'éléments suffisants susceptibles de peser la robustesse de la présente forme d'évolution.

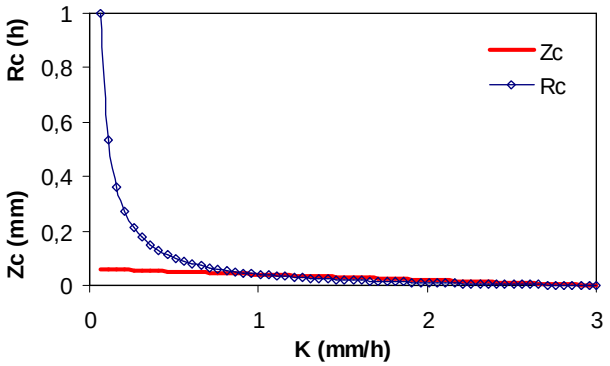


Figure n°110 : *illustration des relations entre les termes d'épaisseur, de conductivité et de résistance de la croûte*

Caractéristiques initiales de la croûte :
Rc = 0 h
Kc =3.0 mm/h
Caractéristiques finales de la croûte :
Rc = 1.0 h
Kc =0.06 mm/h

L'épaisseur de la croûte pleinement développée donnée par notre modèle est de l'ordre de 0.1mm. Il ne s'agit que d'une épaisseur « équivalente », et il n'est donc pas utile d'en étudier le réalisme.
Pour s'affranchir du terme d'épaisseur de la croûte, certains auteurs ont directement exprimé l'évolution de la conductance hydraulique (inverse de la résistance hydraulique) au lieu de la conductivité hydraulique à saturation de la croûte dans l'expression de BRAKENSIEK et RAWLS (1983) (voir notamment BRISTOW *et al.*, 1994). Nous avons vérifié *a posteriori* que notre modèle donnait des résultats très proches de ceux-ci en ajustant la valeur du paramètre cinétique, « c ». Nous pouvons néanmoins trouver intéressant d'essayer de modéliser l'évolution de l'épaisseur de la croûte.

- ***Illustrations***

La figure n°111 montre l'évolution de la résistance de la croûte pour la culture de maïs 1999 et le labour d'hiver qui y fait suite, selon le modèle détaillé précédemment.

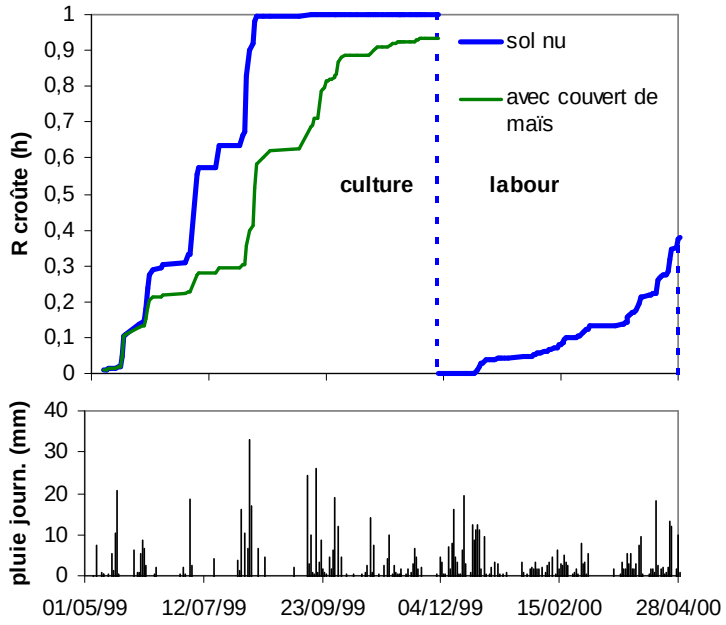


Figure n°111 : *évolution de la résistance de la croûte de battance en fonction du cumul de précipitation, dans les conditions de la culture du maïs et de labour à Grignon en 1999/2000*

Nous voyons que le couvert a un fort effet sur la battance. Ainsi, en présence d'une très forte pluviosité dès la date du semis, la croûte pourrait être totalement formée avant l'apparition du couvert végétal. Nous remarquons que la prise en compte de l'impact de la rugosité sur l'abaissement de l'énergie cinétique effective des pluies constitue aussi un terme essentiel dans le cas du labour d'hiver : la valeur de résistance hydraulique finale supposée de la croûte (2.5h) est loin d'être atteinte au moment du travail du sol de printemps. Enfin, à l'instar de l'évolution de la capacité de flaquage de la surface du sol (cf. graphique n°89), l'évolution de la croûte de battance est directement liée au rythme et à l'énergie cinétique des pluies, et il apparaît donc essentiel d'intégrer la dynamique de la croûte.

- ***Conclusions***

Un point délicat et essentiel de la modélisation de l'évolution de la croûte est la fixation de la résistance hydraulique finale de la croûte, ainsi que du paramètre cinétique d'évolution. Nous avons pour cela utilisé les données de la bibliographie, malgré ses insuffisances sur le thème. Notre approche comporte un certain nombre d'autres lacunes, négligées toutefois également par la plupart des modèles : le gouttage depuis les feuilles modifiant la valeur de l'énergie cinétique de la pluie, la fissuration des croûtes et les remaniements d'origine biologique, l'action de l'érosion sur la destruction des croûtes, l'impact des propriétés précises du sol de surface (notamment la stabilité des agrégats, le taux d'argiles et de matières organiques, et la valeur de l'humidité avant la pluie), l'action variable des différents types de croûtes selon la hauteur de flaque.

Compte tenu des éléments bibliographiques, la formation de la croûte semble néanmoins bien traduite par notre modèle, puisque prenant en compte à la fois les caractéristiques climatiques (intensité et énergie cinétique des pluies), leur relation avec le taux de couverture du sol par le couvert végétal et la rugosité de la surface du sol, et utilisant des ordres de grandeur moyens des paramètres.

3) Evolution des paramètres d'infiltration du sol selon les travaux agricoles

Pour traduire l'impact des pratiques agricoles sur les paramètres d'infiltration du sol, nous avons pris une solution très simple sachant que nous avons pu estimer les valeurs des paramètres

d'infiltration pour les quatre couches de sol étudiées (croûte, lit de semence, labour, sol non travaillé). Nous avons ainsi attribué un profil de sol particulier à chaque situation culturale étudiée, tel que la figure n°112 le présente. Nous avons distingué deux travaux agricoles seulement (semis, et labour d'hiver), considérant par simplification que la moisson ne modifiait pas les paramètres du sol en « semis ». Nous supposons que les paramètres d'infiltration des couches de sol sous la croûte (conductivité hydraulique à saturation, succion effective au front d'humectation, humidité volumique à saturation) sont redéfinis à chaque travail agricole (semis, labour d'hiver), et restent constants entre deux travaux agricoles. La rugosité, et la croûte de battance, dont nous avons défini l'évolution temporelle de la résistance hydraulique, sont réinitialisés à chaque travail du sol.

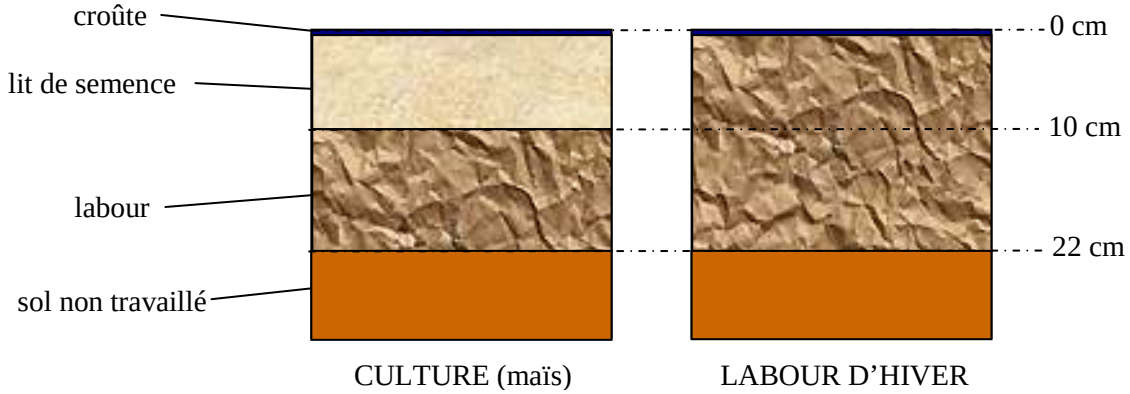


Figure n°112 : *découpage vertical du sol selon le type de travail agricole*

Une des limites de ces données est que nous ne pouvons pas traduire l'évolution temporelle des caractéristiques hydrodynamiques du sol travaillé entre deux interventions culturales (labour, semis), ce qui simplifie un des aspects dynamiques de l'étude. En cela, nous restons néanmoins au même niveau de complexité que l'essentiel des autres modèles de bilan hydrique et d'infiltration / ruissellement, avec avons en outre l'avantage de détailler le sol et ses paramètres de manière plus rigoureuse et détaillée.

4) Conclusions

Nous avons restitué l'essentiel de l'évolution des paramètres du modèle d'infiltration / ruissellement selon des approches empiriques et moyennes. Ces données devraient nous permettre de restituer de manière honnête les processus dynamiques majeurs sur parcelle agricole. Le nombre relativement limité de paramètres, dont les ordres de grandeur sont assez généralement disponibles dans la bibliographie, devraient également permettre des applications directes dans une grande variété de situations de sol, culture et climat. Les perspectives d'amélioration des modèles employés tiennent largement dans l'intégration de certains processus pouvant ponctuellement jouer des rôles importants, notamment la fissuration de la croûte de battance sous l'influence du climat, l'évolution des caractéristiques hydrodynamiques du sol travaillé sous l'effet du tassement du sol et du climat, ou encore l'évolution des paramètres de flaquage en fonction de l'érosion sous l'impact du ruissellement.

III) Paramétrisation du modèle de redistribution lente de l'eau entre les couches de sol

La redistribution lente de l'eau entre couches de sol constitue un aspect potentiellement important du modèle. Nous en présentons ici la paramétrisation et une analyse de sensibilité.

a) Choix des paramètres

Les valeurs moyennes des paramètres des relations hydrodynamiques données dans la bibliographie (notamment CAMPBELL, 1998, d'après RAWLS *et al.*, 1992) décrivent plutôt mal

les relations mesurées sur le sol de Grignon (données de WIND décrites précédemment) ; en outre la valeur de θs n'est généralement pas (ou mal) définie, et l'effet du travail du sol sur les valeurs des paramètres est difficile à aborder. Nous avons alors recalculé les paramètres de la relation de BROOKS-COREY à partir des lois de VAN GENUCHTEN. Les différentes formules visant à exprimer les paramètres de BROOKS-COREY à partir de ceux de VAN GENUCHTEN (notamment MOREL-SEYTOUX *et al*., 1996) ne nous ayant pas donné satisfaction, nous avons procédé à un calage direct. Nous avons pour cela fixé les valeurs de θs et θr égales à celles de VAN GENUCHTEN, déterminant ensuite les paramètres b et ψe à partir de la relation θ(ψ). Il existe enfin une seule valeur de Ks pour satisfaire la courbe K(ψ). Les paramètres calés pour le modèle de BROOKS-COREY sont donnés dans le tableau n°22.

Couche de sol	**Ψ*e* (cm)**	**b**	**Ks (mm/h)**	**θs (m^3/m^3)**	**θr (m^3/m^3)**
Non travaillé	15.0	3.2	5.0	0,450	0.240
Lit de semence	4.9	3.8	35.0	0.510	0.170
Labour	63.0	4.8	0.2	0.390	0.110

Tableau n°22 : *valeurs des paramètres calés pour la relation de BROOKS-COREY sur le sol de Grignon*

Les résultats (graphiques non représentés) nous sont apparus très bons pour les relations θ(ψ), un petit peu moins pour K(ψ), avec notamment un défaut pour le sol non travaillé, pour lequel la conductivité est plus basse pour les potentiels très élevés (en valeur absolue). Nous obtenons néanmoins une correspondance intéressante dans le domaine de définition de la relation de VAN GENUCHTEN (-10cm à -1000cm) pour les potentiels supérieurs au potentiel d'entrée d'air.

Nos tests montrent que la valeur de 0.01h de pas de temps et l'utilisation d'une seule procédure de redistribution par jour sont largement satisfaisantes.

Le paramètre d'humidité volumique à la capacité au champ est importante pour le modèle de redistribution, puisque l'infiltration calculée par BILHYNA remplit les couches successives à la capacité au champ (cf. chapitre I). Pour affiner les valeurs d'humidité à la capacité au champ selon la tranche de sol, nous avons utilisé une notion de potentiel matriciel constant sur toute l'épaisseur de sol (négligeant le potentiel gravitaire) et obtenu les résultats suivants avec le modèle de BROOKS-COREY (tableau n°23).

	θcc (m^3/m^3)
Lit de semence	0,273
Labour	0,297
Non travaillé	0,313

	Stock d'eau sur 1.10m (mm)
Sol labouré	340,83
Sol semé	338,47

Tableau n°23 : *détail des valeurs de l'humidité volumique à la capacité au champ du sol*

Les mesures (figure n°62) montrent toutefois que le profil d'humidité à la capacité au champ n'est pas constant en fonction de la profondeur, mais nous conservons cette approche moyenne étant donné la simplicité du modèle.

Nous noterons enfin une problématique délicate sur notre sol : le calcul des transferts d'eau en profondeur, et tout particulièrement les remontées capillaires. Le sol présente en profondeur une couche de loess qui possède des caractéristiques physiques et hydrodynamiques inconnues et *a priori* différentes de celles du sol plus superficiel, dont sont tirés les paramètres utilisés. L'humidité de la couche semi-infinie est ainsi fixée de manière tout à fait *a priori*. De nombreux tests ont montré par ailleurs des résultats extrêmement variables de flux profonds (remontées capillaires tout particulièrement) selon les modèles utilisés et selon les hypothèses de taille des couches de sol et de profondeur du sol. La paramétrisation des couches de sol profond est donc incertaine, et méritera des études expérimentales spécifiques et détaillées.

b) Résultats de sensibilité

La figure n°113 présente les quantités de transfert d'eau calculées pour une journée entre deux couches de sol de 10cm d'épaisseur, en fonction de l'humidité initiale de chacune, sur sol non travaillé. La conclusion est alors évidente : les transferts d'eau en-dessous de la capacité au champ sont très faibles. Nous préciserons les valeurs des transferts lents de l'eau dans le sol dans le chapitre V.

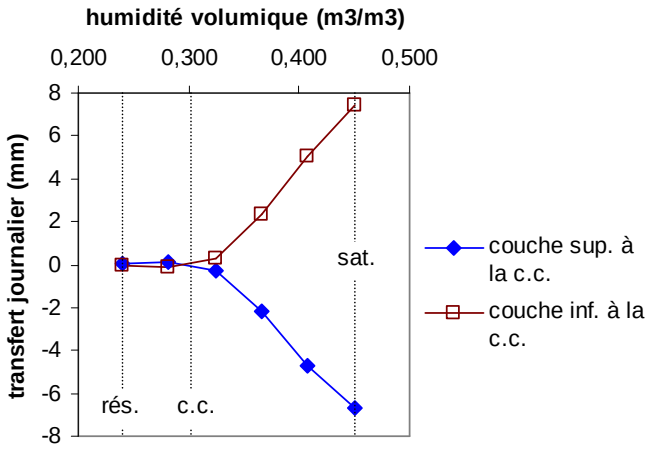


Figure n°113 : *quantité de transfert d'eau (positif vers le bas, négatif vers le haut) à un intercouches du sol non travaillé*

L'humidité de la couche supérieure ou inférieure est fixée à la capacité au champ tandis que l'autre varie

c) Conclusions

Les résultats montrent que la redistribution lente de l'eau entre les couches de sol est relativement négligeable, et nous verrons que ceci sera confirmé par les faibles valeurs de remontées capillaires que nous calculerons sur les différentes années de simulation. L'apport du modèle de redistribution lente est donc faible, et justifie le faible développement attribué à l'étude de ce modèle dans la présente étude.

IV) Etudes de sensibilité de l'infiltration / ruissellement

Afin de pouvoir peser le poids et les conséquences de certains points importants de notre travail, nous étudions à présent la sensibilité du modèle d'infiltration / ruissellement aux paramètres suivants : la capacité maximale de flaquage, la pente, la résistance hydraulique de la croûte de battance, l'hétérogénéité du profil de conductivité hydraulique à saturation, l'intégration de la captation, et la variabilité du paramètre de succion effective au front d'humectation en fonction de l'humidité initiale du sol. Nous étudions dans chaque cas les valeurs de ruissellement, qui constituent le terme essentiel du couplage de l'infiltration / ruissellement au modèle de bilan hydrique BILHYNA.

Les paramètres pluviométriques constituent également un point important de notre travail. La sensibilité de l'infiltration / ruissellement à ces paramètres a déjà été abordée dans le chapitre précédent (paragraphe II), auquel on pourra se reporter.

Sauf indication contraire dans le texte, les résultats des simulations présentées ici ont été obtenus avec le modèle BILHYNA intégrant l'ensemble les modèles (captation, infiltration / ruissellement, pluie instantanée), et utilisant les paramètres déterminés auparavant.

1) Sensibilité à la capacité maximale de flaquage

La figure n°114 présente les calculs de ruissellement cumulé sur l'année 1999, en fixant une valeur donnée et constante de capacité maximale de flaquage (valeurs typiques du semis et du labour d'hiver, et une valeur intermédiaire). Nous voyons que le ruissellement est extrêmement sensible à ce paramètre, avec une valeur cumulée importante pour une capacité de flaquage de semis, mais pratiquement nulle avec une capacité de flaquage de labour d'hiver. Nous montrons donc que le paramètre de capacité de flaquage de la surface du sol est tout à fait essentiel sur parcelle cultivée, et les différents types de travail du sol doivent donc être parfaitement caractérisés.

Ces données indiquent également la très faible capacité de ruissellement générée par la rugosité du labour d'hiver.

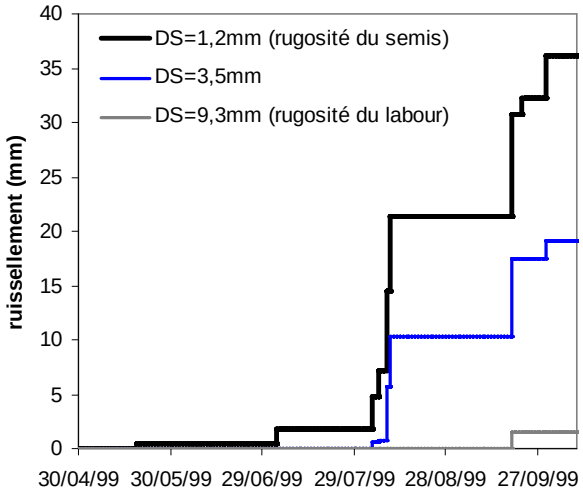


***Figure n°114** – Ruissellement cumulé en fonction du temps sur l'année 1999, pour différentes valeurs constantes de capacité maximale de flaquage*

2) Sensibilité à la pente

Nous regardons l'effet de la pente sur les valeurs de ruissellement calculé pour la période de culture du maïs 1999 (29/4 au 05/10), sur lesquelles ont porté nos mesures de ruissellement (pentes de 1%, 3% et 6%) : les valeurs simulées sont de 36.29mm, 37.43mm et 39.16mm respectivement pour les pentes de 1%, 3% et 6%. Nous n'avons pas étudié le cas du labour d'hiver, celui-ci montrant des résultats de ruissellement négligeable. Les différences de ruissellement selon la pente sont donc assez faibles, de surcroît de l'ordre de l'écart type des mesures. Ces résultats indiquent un effet relativement négligeable de la pente sur le ruissellement pour la culture de maïs (rugosité de semis), donnée que nous utiliserons pour le test du modèle d'infiltration / ruissellement.

3) Sensibilité à la résistance hydraulique de la croûte

Nous regardons maintenant l'effet de la valeur de la résistance hydraulique de la croûte de battance sur les résultats du modèle d'infiltration / ruissellement. Les simulations portent sur la période du 01/10/98 au 31/12/00, avec une valeur constante de résistance hydraulique de la croûte, sur un sol avec lit de semence, d'humidité remise chaque jour à la capacité au champ, sans couvert végétal, et avec une capacité de flaquage constante de 1mm.

Les résultats (figure n° 115) montrent que la valeur de résistance hydraulique de la croûte employée pour le sol de Grignon (soit 1h) a un effet très faible sur le ruissellement, par rapport à la référence sans croûte de battance (résistance hydraulique de 0h). Une valeur plus forte, correspondant à un sol assez battant (résistance hydraulique de 10h), conduit quant à elle à une augmentation plus importante mais néanmoins limitée du ruissellement, de l'ordre de 25%.

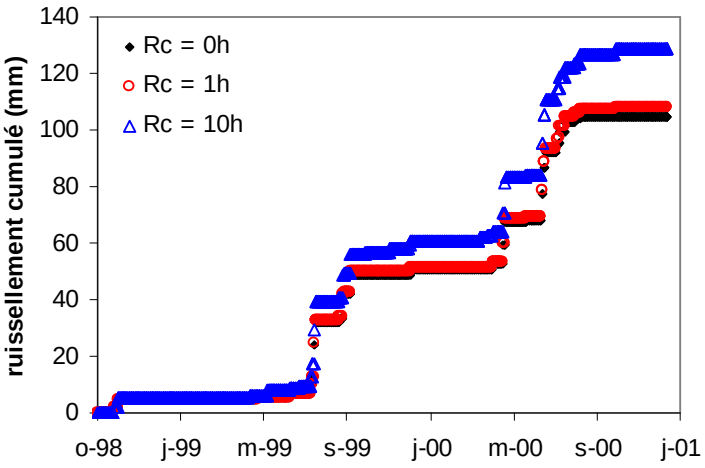


***Figure n°115 :** illustration de l'impact de la valeur de résistance de la croûte sur le cumul du ruissellement*

(simulations du 01/10/98 au 31/12/00, avec une valeur constante de résistance hydraulique de la croûte, sur un sol avec lit de semence, d'humidité remise chaque jour à la capacité au champ, sans couvert végétal, avec une capacité de flaquage constante de 1mm)

- ***Liaison entre l'évolution de la résistance de la croûte et celle de l'infiltrabilité du sol***

Certains résultats prévoient que la conductivité effective moyenne du sol diminue de l'ordre de 80% après un travail agricole sur un sol assez proche de celui de Grignon (RISSE *et al.*, 1995, RAWLS *et al*., 1990). Les résultats numériques suivants de conductivité hydraulique effective du sol pour le semis de maïs 1999 à Grignon, supposant un potentiel effectif d'infiltration constant de -10cm (voir figure n°116), indiquent que la croûte (résistance de 1h dans le cas de Grignon) cause une diminution seulement de l'ordre de 5% de la conductivité entre les états initial et final. Nous avons donné la conductivité effective sur des épaisseurs de 10cm de manière indicative, et sur 20cm selon les indications de RISSE *et al.* (1995) qui considèrent que le front d'humectation ne concerne pas le sol plus profond. Pour trouver une cinétique plus conforme aux valeurs attendues selon la bibliographie, il faudrait augmenter la résistance de la croûte (illustration avec une valeur de 10h), ce qui nous paraît trop artificiel.

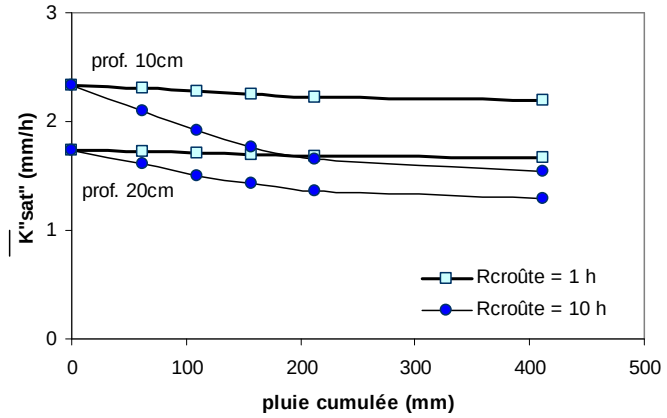


Figure n°116 : *évolution simulée de la conductivité hydraulique effective du sol en culture de maïs sur une épaisseur de 10cm et 20cm, selon l'évolution de la croûte de battance en fonction du cumul de pluie*

Ces résultats semblent indiquer que le potentiel effectif d'infiltration serait pour les premiers stades de battance plus élevé que la référence de -10cm, et/ou que l'évolution du sol conduirait à une diminution de la conductivité au potentiel de -10cm. Nous pensons qu'il faudrait modéliser spécifiquement ces deux données, ce que l'état actuel des connaissances ne permet pas. Faute de plus de données, nous conservons l'approche utilisant un potentiel effectif d'infiltration constant, et ainsi nous surestimerons peut-être le ruissellement dans les premiers stades de la battance.
Certains auteurs avancent que la croûte détermine entièrement le processus d'infiltration et que l'effet des caractéristiques du sol sous la croûte est négligeable (MAHMOUD, 1991, citant CHILDS et BYBORDI, 1969, JENNINGS *et al*., 1988). Cette approche revient selon nous simplement à donner des paramètres effectifs moyens pour tout le système sol/croûte et nous paraît fausse.

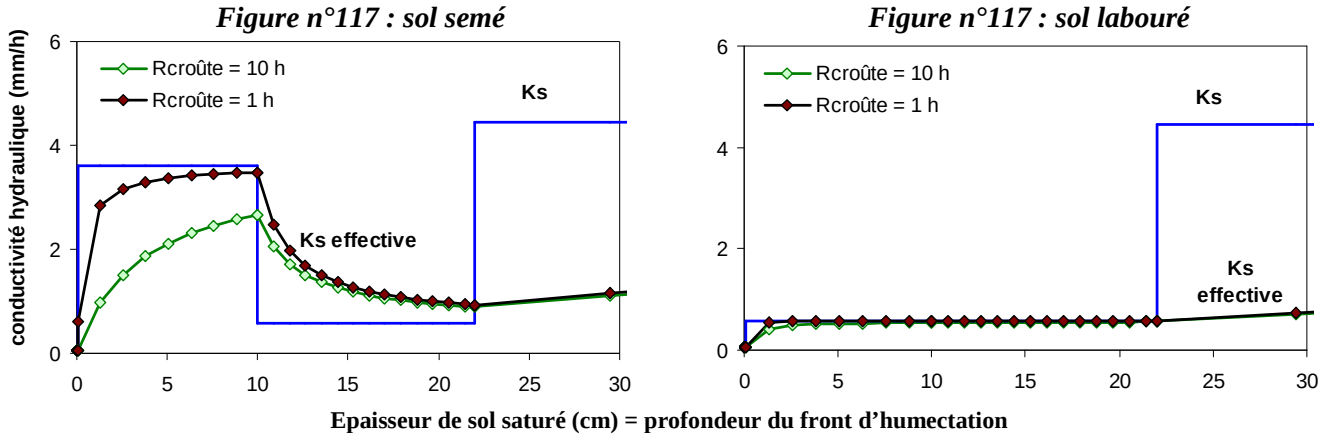
- ***Conclusions***

Selon le modèle d'infiltration de GREEN-AMPT à résistances, la croûte de battance est susceptible de fortement limiter l'infiltration. Toutefois, nous avons montré que le sol de Grignon possédait seulement une faible sensibilité à la battance, limitant considérablement le poids de la croûte. L'intégration de la croûte peut néanmoins être primordiale pour d'autres types de sols, plus battants que le notre (voir par exemple l'étude de ESTEVES *et al*., 2000, attribuant pour la croûte du sol étudié une valeur de résistance hydraulique de plus de 80h). En outre, notre approche de l'infiltration avec l'utilisation de résistances hydrauliques conserve son intérêt dans notre cas, car elle permet de donner un poids à la variabilité verticale des caractéristiques de l'ensemble du sol, intégrant les couches travaillées.

4) Sensibilité au profil de conductivité hydraulique à saturation

Un apport important de notre travail est le détail du profil de sol en une succession de couches de caractéristiques hydrodynamiques différentes, et tout particulièrement de conductivité hydraulique à saturation hétérogène. Nous allons étudier par conséquent l'impact de cette approche détaillée sur les résultats de ruissellement, par rapport à une description simplifiée du sol, utilisant une valeur homogène de conductivité hydraulique à saturation.

Revoyons tout d'abord en quoi l'approche multicouches permet de donner une valeur de la conductivité hydraulique à saturation variable et donnée pour toute profondeur du front d'humectation. Les figures n°117 et 118 illustrent l'effet de la formulation en résistances hydrauliques sur le calcul de la conductivité hydraulique effective de la tranche de sol saturée, sur un sol labouré et sur un sol semé, pour deux valeurs de résistance de la croûte (faible avec la valeur de 1h, forte avec 10h). Nous représentons en traits pleins les valeurs mesurées de conductivité hydraulique à saturation (« Ks »), constantes dans chaque couche de sol, ainsi que les courbes de conductivité hydraulique à saturation « effective » sous l'effet du modèle à résistance hydraulique (« Keff »). La conductivité hydraulique à saturation « effective » est simplement le rapport entre l'épaisseur et la somme des résistances hydrauliques de la tranche de sol humecté. A chaque profondeur du front d'humectation, correspondant à un instant donné de l'infiltration, la valeur calculée de la conductivité hydraulique à saturation du sol humecté est ainsi fonction des caractéristiques (résistance hydraulique et épaisseur) de l'ensemble des couches de sol humecté. Nous voyons aussi l'importance du paramètre de résistance de la croûte (sauf sur labour d'hiver), dont l'effet s'estompe toutefois assez rapidement avec la profondeur du front d'humectation.



Valeur de la conductivité hydraulique effective de la tranche de sol saturé en fonction de son épaisseur (en abscisses), pour différents travaux du sol (potentiel hydrique de -10cm)

Nous étudions le cas du sol en situation de culture de maïs (« semis »), donnant les valeurs les plus élevées de ruissellement (cf. figure n°114). Nous avons estimé à 1.74mm/h la valeur moyenne de la conductivité hydraulique à saturation (Ks) du profil de sol en culture de maïs (sol avec semis, figure n°117) en effectuant une simple moyenne arithmétique de la conductivité hydraulique à saturation des 3 couches de sol pondérées par leur épaisseur, sur les 30 premiers centimètres de sol afin de donner un poids à chacune des 3 couches individualisées.

Nous comparons pour la culture de maïs 1999 (figure n°119) les résultats de ruissellement calculé avec le profil hétérogène de Ks, et ceux calculés avec la valeur moyenne et homogène de Ks, tous les autres paramètres étant égaux par ailleurs. Nous constatons que l'utilisation d'une valeur moyenne et homogène de Ks, qui donne pour les dix premiers centimètres du sol une valeur de Ks plus faible que pour l'approche multicouches, amène une surestimation assez systématique du ruissellement. Cet écart est ponctuellement assez faible (0.5 à plus de 1mm) mais néanmoins important sur le terme de ruissellement cumulé pour la période d'étude, avec 20.5 %. Ces résultats montrent qu'à partir d'un profil mesuré de Ks, sur un sol hétérogène, l'approche multicouches à résistances hydrauliques peut apporter une amélioration importante des résultats de ruissellement par rapport à l'utilisation d'un simple profil homogène de Ks.

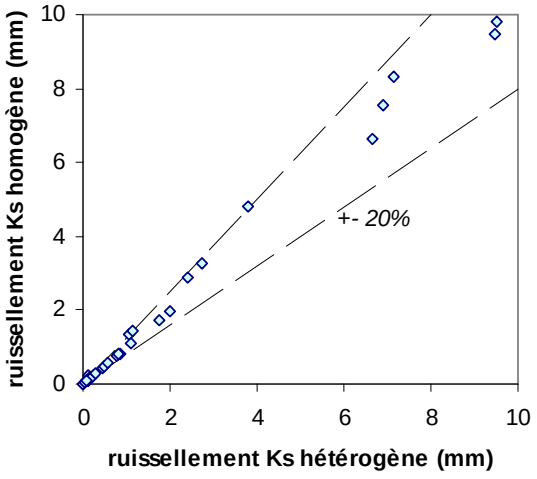


Figure n°119 *– Comparaison des quantités de ruissellement entre les modèles de description homogène et hétérogène du profil de conductivité hydraulique à saturation du sol, pour chaque événement de la saison de culture du maïs 1999*

5) Sensibilité au modèle d'évolution de la succion effective au front d'humectation

Nous avons comparé les résultats de ruissellement entre l'approche utilisée, avec variabilité de la succion effective au front d'humectation en fonction de l'humidité initiale du sol, et un modèle simplifié dans lequel la succion effective au front d'humectation reste constante pour chaque couche, à la valeur (maximale) calculée pour un sol très sec. Les résultats sont sensiblement identiques dans les deux cas, indiquant que pour notre sol il n'est pas nécessaire d'utiliser le modèle de calcul de la succion effective au front d'humectation en fonction de l'humidité initiale. Néanmoins, ce dernier modèle peut avoir un intérêt d'application pour des sols très humides, notamment en situation hivernale et/ou avec une nappe aquifère proche de la surface, ou encore pour des sols présentant un écart faible entre les valeurs d'humidité à la capacité au champ et à saturation.

6) Sensibilité à la captation

La captation de l'eau de pluie par le couvert végétal diminue les quantités de ruissellement, par l'abaissement de l'énergie cinétique de la pluie (qui limite l'aplanissement de la rugosité et la décroissance la capacité de flaquage, ainsi que la formation de la croûte de battance), et par l'abaissement de l'humidité initiale du sol de surface. Par exemple, nous avons ainsi calculé sur l'année de culture du maïs 1999, un ruissellement cumulé de 42mm sans tenir compte de la captation, et un ruissellement cumulé diminué de presque 6mm en intégrant la captation. Ceci confirme le poids non négligeable du couvert végétal sur les processus dynamiques influant sur l'infiltration / ruissellement. Nous n'étudierons donc pas l'infiltration / ruissellement sans tenir compte de la captation.

7) Conclusions

Les tests de sensibilité montrent que le ruissellement est très sensible à la capacité maximale de flaquage de la surface du sol, et relativement sensible au modèle d'intégration de l'hétérogénéité verticale de la conductivité hydraulique à saturation, ainsi qu'à la captation de l'eau de pluie par le feuillage végétal. Le ruissellement est par contre peu sensible à la pente, dans la gamme de valeurs fixée. Pour le sol étudié, le ruissellement est également pratiquement insensible à l'intégration de la croûte de battance et au modèle de calcul de la succion effective au front d'humectation en fonction de l'humidité initiale du sol. Ces deux derniers paramètres sont néanmoins susceptibles d'amener des modifications importantes du ruissellement sur certains types de sol (sols battants, sols très humides), et ont donc un attrait important pour la généralisation du modèle.

E) Conclusions

Nous avons présenté dans les paragraphes précédents, la fixation des paramètres du modèle d'infiltration / ruissellement et la restitution de leur évolution temporelle, ainsi que des analyses de sensibilité.

Nous avons cherché à donner une explication claire et validée de la détermination des paramètres d'infiltration, qui sont dans l'essentiel des études déterminés de manière imprécise et sans réflexion sur la détermination des valeurs dites « à saturation ». Notre travail est en ce sens original et il nous paraît susceptible de mieux orienter les travaux et la réflexion sur la modélisation de l'infiltration à partir de modèles simples tels que celui de GREEN-AMPT.

Notre travail comporte plusieurs autres originalités et points forts. Nous avons notamment utilisé le modèle de GREEN-AMPT selon une approche multicouches détaillée, en intégrant la croûte de battance et en employant un paramètre de potentiel effectif d'infiltration qui permet de calculer très précisément les paramètres à partir des relations de VAN GENUCHTEN. Nous montrons une amélioration du calcul du paramètre de succion effective au front d'humectation, en utilisant un modèle de décroissance logarithmique au voisinage de la saturation du sol, qui pourra être utile dans les situations de sol très humide. Enfin, nous avons traduit l'évolution temporelle des paramètres clés de l'infiltration / ruissellement sur parcelle cultivée, de manière simple.

Nous avons montré l'importance notamment de la capacité maximale de flaquage de la surface du sol, et de l'intégration de l'hétérogénéité du profil de conductivité hydraulique à saturation, dont les évolutions temporelles sont restituées. La croûte de battance a une importance très faible sur notre sol, mais néanmoins la paramétrisation du modèle permettra de restituer les processus dans une large gamme de conditions de sol, culture et climat, et notamment sur les sols développant une importante croûte de battance.

Moyennant ces points positifs, des lacunes subsistent dans notre approche, et nous proposons également certains points de prospective. Tout d'abord, le routage du ruissellement n'est pas calculé, et les passages de roues - dont l'infiltrabilité est *a priori* nettement diminuée - ne sont pas intégrés. De plus larges mesures du ruissellement pourraient être appréhendées : placettes de plus grandes dimensions, avec exploration de différents types de surface du sol. Les paramètres d'infiltration / ruissellement n'ont pas été spécifiquement définis pour la situation du sol moissonné. Le paramètre de potentiel effectif d'infiltration devrait être étudié expérimentalement sur notre sol. La valeur effective de la conductivité hydraulique à saturation en fonction de l'épaisseur du sol humecté pourrait être mesurée. L'impact de la taille des couches de sol sur les résultats d'infiltration / ruissellement n'a pas été étudié, et pourrait faire l'objet d'une évaluation spécifique. Les caractéristiques physiques et hydrodynamiques du sol profond devraient enfin être caractérisées afin d'améliorer le calcul des transferts lents de l'eau entre les couches, et en particulier les remontées capillaires.