Nous avons présenté dans le premier chapitre les modèles de bilan hydrique, captation et infiltration / ruissellement, ainsi que dans le deuxième chapitre les différentes expérimentations visant à déterminer certains paramètres, variables et données de test des modèles. Nous présentons maintenant la détermination des paramètres et variables d'entrée des différents sous-modèles, avec l'intégration des aspects dynamiques de la parcelle cultivée. Nous faisons appel à nos résultats expérimentaux, ponctuellement complétés par des données de la bibliographie et/ou de résultats d'autres équipes de recherche sur notre site expérimental.

Nous présenterons ainsi successivement la paramétrisation du modèle de bilan hydrique BILHYNA incluant un volet important de modélisation de l'évolution du couvert végétal (couvert vert, couvert sénescent, débris de récolte), puis le développement et l'intégration des modèles de pluie, et enfin de captation. L'infiltration / ruissellement, constituant un aspect central et volumineux du travail, fait l'objet du chapitre suivant.

I) Détermination des paramètres et variables d'entrée du modèle BILHYNA

Voyons maintenant la fixation des variables et paramètres nécessaires au fonctionnement de BILHYNA. Nous ne reviendrons pas sur un ensemble de paramètres, classiquement fixés ou déjà validés par le Laboratoire (cf. annexe n°1), ainsi que sur les variables météorologiques journalières, directement déterminées par la station automatique de mesures météorologiques. Nous nous focalisons ici sur les variables et paramètres que nous avons modifiés en fonction de la dynamique sur parcelle cultivée, et/ou sur ceux que nous avons pu estimer à partir de nos mesures.

1) Un paramètre essentiel d'humidité du sol : la capacité au champ

L'humidité à la capacité au champ est un paramètre essentiel du modèle BILHYNA, car il permet de calculer le profil d'humidité après une journée de pluie ainsi que le terme de drainage profond.

La valeur de ce paramètre apparaît difficile à estimer dans la mesure où sa conception même diffère selon les auteurs, en accord avec les remarques de GUYOT (1997). La méthode la plus classique consiste à estimer l'humidité du sol à une valeur de potentiel hydrique « standard » (paramètre purement empirique, généralement de cent à quelques centaines de cm), sur des échantillons de sol en laboratoire ou bien à partir des lois $\theta(\psi)$ (voir notamment DUCHAUFOUR, 1995; CAMPBELL, 1998). Ces données nous ont paru beaucoup trop imprécises car dépendant largement des caractéristiques du sol.

Nous avons donc choisi une manière plus empirique, qui consiste à mesurer le profil d'humidité du sol après une pluie importante et un ressuyage de 2 à 3 jours sans pluie ni évaporation (voir notamment DUCHAUFOUR, 1995). La période la plus adaptée était *a priori* la fin de l'hiver (BRESSON, communication personnelle), où le sol se « ressuie » après une recharge maximale et n'est pas encore affecté par un terme important d'évaporation.

La figure n°61 utilisant nos mesures TDR montre que nous pouvons trouver ce palier, avec toutefois une incertitude en fonction de la valeur initiale de l'humidité du sol avant ressuyage. Lorsque le sol est « sursaturé » comme au moment des pluies exceptionnelles de l'hiver 1999/2000, le terme de capacité au champ n'a toutefois plus de signification (cf. courbe débutant à la date du 01/11/98). Nos mesures (TDR et gravimétrie) dessinent un palier d'équilibre hivernal et printanier qui devrait correspondre à la capacité au champ, de l'ordre de 340 mm de stock d'eau sur 1.10 m d'épaisseur de sol. Ce chiffre correspond à une humidité volumique moyenne de 0.310 m³/m³, ou pondérale de 0.229 Kg/Kg, la valeur moyenne de densité mesurée étant de 1 350 Kg/m³.

Dans les 3 cas présentés dans la figure n°62, les valeurs du stock d'eau sur 1.10m sont relativement proches : 334.6mm, 337.3mm et 344.35mm respectivement aux 04/2/99, 12/3/99 et 22/02/00. L'humidité à la capacité au champ semble assez constante au-delà de 30cm de profondeur, mais est très hétérogène pour la tranche travaillée. Nous avons néanmoins fixé la valeur moyenne d'humidité à la capacité au champ du sol à 0.310 m³/m³ (ou 0.229 Kg/Kg).





Figure n°61 : évolution du stock d'eau du sol sur 1.10m (mesures TDR corrigées) après des apports importants d'eau

Figure n°62 : profils d'humidité volumique trois jours après un apport important d'eau (sol labouré) selon les mesures TDR corrigées

2) Variables et paramètres relatifs au couvert végétal

Les variables et paramètres définissant le fonctionnement et la croissance du couvert végétal nécessitent une attention particulière. La végétation joue en effet un rôle extrêmement fort sur le bilan hydrique par sa transpiration, et par l'abaissement de l'évaporation de l'eau de la surface du sol. Comme nous le verrons ultérieurement, la captation et l'impact des gouttes d'eau de pluie à la surface du sol dépendent également des caractéristiques du couvert.

a) Paramètres de transpiration du couvert végétal

Le paramètre d'humidité maximale « Rmax » du calcul de la transpiration des plantes est habituellement assimilé à la capacité au champ, et nous avons donc choisi la valeur fixée ci-dessus. L'humidité minimale « Rmin », assimilable au point de flétrissement permanent, est plus délicate à fixer, et les résultats semblent montrer pour notre sol une valeur de l'ordre de 0.110 Kg/Kg, que nous avons retenue.

b) Caractérisation du couvert végétal sur l'ensemble du cycle cultural

Le couvert végétal « vert » ou photosynthétiquement actif est souvent la seule composante de la végétation qui soit modélisée. Les modèles limitent en effet généralement leur étude à la saison de croissance de la végétation pour des questions de rendement de la culture, mais nous visons pour notre part à modéliser le bilan hydrique en continu, notamment pour préciser le terme de drainage profond. Or, durant son évolution, le couvert végétal se rencontre également sous la forme d'un couvert sénescent sur pied, puis d'un mulch de pailles résultant de la récolte. Bien que seules les surfaces foliaires vertes doivent être considérées pour calculer la transpiration de la végétation, l'ensemble des états de la végétation doit être pris en compte pour calculer les caractéristiques aérodynamiques de la culture, l'évaporation de l'eau à la surface du sol et la captation de l'eau de pluie. Nous verrons en particulier que la sénescence est un processus particulièrement important pour ne pas surestimer la transpiration du couvert végétal.

b-1) Modélisation de la croissance du couvert végétal (LAI)

L'évolution du LAI est calculée avec un pas de temps journalier à partir d'un simple modèle de lissage entre les valeurs moyennes mesurées. Pour chaque année, entre la dernière date de mesure du LAI et la date de moisson, nous supposons que la valeur du LAI reste constante. En l'absence de mesures, nous noterons que BILHYNA reste applicable, pouvant simuler l'évolution du LAI à partir d'un modèle simple de sommes de degrés jour et d'une date donnée de semis.

Chapitre III

b-2) Calcul du taux de recouvrement du sol

Le taux de recouvrement du sol par la végétation est un paramètre important pour la captation et pour le calcul de l'énergie cinétique de la pluie à la surface du sol, deux points que nous développerons.

Le couvert végétal n'est en principe jamais entièrement couvrant, et possède un certain coefficient de trouée (voir notamment ANDRIEU *et al.*, 1997 ; BARRET *et al.*, 1993). Par analogie avec les formules de pénétration de la lumière dans le couvert, nous pouvons utiliser l'expression très classique d'atténuation exponentielle en fonction du LAI (NILSON, 1971, cité par ANDRIEU *et al.*, 1997) :

$$R(\theta) = \exp(-K(\theta).LAI) \qquad R(\theta) = \text{ coefficient de trouée du couvert végétal} \\ (\text{ (* gap frequency » ou (* gap fraction »)}) \\ K(\theta) = \text{ coefficient d'extinction} \\ \theta = \text{ angle de zénith} \\ LAI = \text{ indice de surface foliaire (m2/m2)} \end{cases}$$

Cette formulation suppose que les surfaces végétales aériennes soient distribuées de manière aléatoire dans l'espace. Nous négligeons l'effet du vent sur l'angle de chute de la pluie, et ainsi la valeur du coefficient de trouée dans la végétation pourrait être surestimée. La bibliographie fournit les valeurs suivantes du coefficient d'extinction pour quelques espèces de grande culture (tableau n°9). Nous en tirons le taux de couverture du sol en fonction du LAI (figure n°63).

Type de couvert	K	
Maïs (*)	0.34	ANDRIEU et al., 1997
Blé	0.337	BARRET et al., 1993
Betterave à sucre	0.762	BARRET et al., 1993
	0.732	ANDRIEU et al., 1997



(*) semis de caractéristiques strictement identiques à notre expérimentation

Tableau n°9 : valeurs du coefficient d'atténuation pour différents couverts

Figure n°63 : taux de couverture du sol en fonction du LAI pour différents couverts

Nous voyons que ce paramètre est très variable selon le type de culture. Toutefois, il est intéressant de noter que blé et maïs ont sensiblement la même valeur. COUTURIER et RIPLEY (1983) proposent quant à eux un coefficient moyen de 0.5, *a priori* trop généraliste. Pour le maïs, nous utiliserons le coefficient donné par ANDRIEU *et al.* (1997), soit K = 0,34.

b-3) Modélisation de la sénescence du couvert et de ses impacts sur le bilan hydrique

Nous définissons la sénescence comme la phase bien individualisée de mort de la végétation, qui se caractérise en particulier par un brunissage des feuilles et un arrêt de la photosynthèse et de la transpiration, essentiellement après la fructification.

Contrairement aux hypothèses simplificatrices souvent admises, et afin de calculer avec réalisme l'évaporation de l'eau à la surface du sol ainsi que la captation, nous devons maintenir le couvert végétal sur pied jusqu'à la date de la moisson. Ceci est incompatible avec l'approche de BILHYNA qui considère que la totalité des surfaces foliaires est verte et participe à la transpiration, calculant donc une transpiration parfaitement irréaliste dans le cas d'un couvert sénescent. Il fallait donc impérativement intégrer un paramètre de sénescence pour traduire l'abaissement de la fonctionnalité du couvert.

Or, nous ne savions pas modéliser l'impact exact de la sénescence sur les paramètres physiques et biologiques du modèle. Nous nous sommes donc tournés vers une approche très simple et de visée purement corrective. Nous utilisons ainsi un terme correctif pour calculer la transpiration journalière du couvert sénescent (en mm) : $ET_{sénescent} = \beta(t).ET_{vert}$, avec $\beta(t)$ terme de correction variant de 0 (couvert entièrement brun) à 1 (couvert non sénescent), et ET_{vert} transpiration journalière réelle calculée par BILHYNA (en mm).

La difficulté consiste alors à décrire la cinétique de sénescence, qui nécessite de définir une date de début de sénescence et un modèle d'évolution de β .

La sénescence est un processus qui démarre assez tôt dans le processus de croissance de la culture, en particulier pour les feuilles insérées en bas de tige - que nous négligeons. Elle peut être décrite en deux phases, comme le montre la figure n°64 obtenue à partir du suivi des longueurs et largeur des surfaces vertes sur la culture de maïs 2000 (variété Déa, peu différente de la variété que nous étudions), de la parcelle immédiatement voisine de la notre (COMBE, non publié).



Figure n°64 : évolution de la surface foliaire verte au cours de la sénescence du maïs (variété Déa) en 2000

<u>Modèle linéaire biphasique :</u> (1) régression sur les 5 premiers points y = -0,0201.x + 7,9658; $r^2 = 0,994$ (2) régression sur les 5 derniers points y = -0,129.x + 35,318; $r^2 = 0,987$

Polynôme de degré trois: $y = -2.10^{-5} .x^3 + 0.0135.x^2 - 2.9787.x + 224.05 (r^2 = 0.989)$

Nous observons deux phases (conformément aux résultats classiques, cf. GIRARDIN, 1998), dont la deuxième est la plus significative (il s'agit de celle prise en compte dans le tableau n°10). L'approche de diminution linaire des surfaces vertes apparaît particulièrement réaliste.

La deuxième phase de la sénescence s'étale en général sur une quinzaine de jours (durée est largement moindre dans le cas particulier - que nous ignorons - d'apparition de basses températures), et démarre en moyenne autour du 15 septembre (cf. tableau n°10).

Même si la sénescence est un processus compliqué appelant plusieurs paramètres, les dates de début et fin du processus apparaissent assez constantes malgré des conditions très différentes de date de semis et de stock d'eau du sol. Les sommes de degrés jour traduisent quant à elles très mal la date de début ainsi que l'évolution du processus. Nous choisirons donc *a priori* des paramètres de cinétique de sénescence constants d'une année sur l'autre.

Si nous émettons l'hypothèse - non discutée - que le coefficient β est proportionnel au rapport entre le LAI vert et le LAI total (vert + brun), nous pouvons proposer un modèle biphasique d'évolution du coefficient β à partir des résultats présentés sur la figure n°64.

	Sénescence, phase principale			
année	début	fin	durée (somme de degrés jour, °C)	
1998	15 septembre	03 octobre	18 jours (130°C)	
1999	21 septembre	07 octobre	16 jours (107°C)	
2000	11 septembre	30 septembre	19 jours (166°C)	

Tableau n°10 : dates de début et fin de la phase principale de la sénescence à Grignon (COMBE, communication personnelle)

Certains résultats indiquent toutefois que l'activité photosynthétique diminue selon une pente beaucoup plus constante que le taux de surface verte, et atteindrait une valeur nulle environ 15 jours avant la sénescence totale (GIRARDIN, 1998).

Nous proposons donc un deuxième modèle d'évolution du coefficient β , monophasique et linéaire. Pour celui-ci, selon nos propres observation de terrain, la sénescence débute plutôt autour du 1^{er} septembre chaque année. Enfin, en première approche, le coefficient β devrait atteindre une valeur nulle entre le 15 et le 30 septembre.

Les figures n°65, 66 et 67 montrent le poids des différents modèles de sénescence du couvert de maïs sur le bilan hydrique en 1998, 1999 et 2000. Nous y comparons les résultats obtenus avec le modèle BILHYNA utilisant trois modèles de sénescence : un modèle monophasique avec deux durées de sénescence (15 et 30 jours) à partir du 1^{er} septembre, ainsi que le modèle biphasique présenté sur la figure n°64. Le bilan hydrique s'avère très sensible au modèle de sénescence, ce qui montre l'intérêt d'en rechercher des critères plus précis. Le modèle biphasique de sénescence a un effet sur le bilan hydrique visible dès mi-août. Pour le modèle monophasique, l'écart du stock d'eau du sol (sur 1.10m) entre les deux durées de sénescence atteint jusqu'à 20mm. L'étude des mesures d'humidité du sol permettra d'étudier ce point plus précisément.

D'après les données discutées précédemment, et selon les résultats du bilan hydrique comparés aux mesures d'humidité du sol en 1998, 1999 et 2000 (cf. chapitre V), nous avons jugé que le modèle de sénescence qui restituait en moyenne le mieux les mesures était celui avec décroissance linéaire monophasique du coefficient β entre le 1^{er} et le 15 septembre de chaque année. C'est donc le modèle et les paramètres que nous utiliserons dans les simulations de bilan hydrique. Le réalisme de cette approche sera discuté dans le chapitre V.



b-4) Modélisation du mulch de « pailles » et de ses effets sur le bilan hydrique

Le mulch de paille subsiste à la surface du sol jusqu'au travail suivant du sol. Nous calculons son impact sur l'abaissement de l'évaporation de l'eau à la surface du sol par un simple coefficient de partition du rayonnement solaire :

$$ET_{sol} = (ET_{sol})_{virtuel} \cdot exp(-K.LAI)$$
$$(ET_{sol})_{virtuel} = \acute{e}vaporation journalière du sol en l'absence de couvert végétal (mm)$$

K = coefficient d'extinction du rayonnement, intégré pour une journée = 0.7

En supposant la conservation des surfaces végétales d'un couvert pleinement développé (LAI = $3.9 \text{ m}^2/\text{m}^2$), nous obtenons $\exp(-K.LAI) = 0.064$. Cette valeur est peut-être un peu basse et devrait être précisée, mais notre approche possède néanmoins l'avantage de donner un poids au mulch de paille, et de surcroît selon des bases physiques robustes.

Nous avons négligé la captation du mulch de paille, pourtant réelle, mais pour laquelle une formulation spécifique de l'évaporation de l'eau captée reste à développer. Cela pourrait être fait à partir du modèle employé pour le mulch du sol.

Les figures n°68, 69 et 70 illustrent l'effet du mulch de pailles sur l'évolution du stock d'eau du sol calculé par BILHYNA. L'effet n'est pas négligeable mais reste limité, particulièrement lorsque le sol atteint la capacité au champ comme en 2000 (figure n°70).



3) Conclusions

Nous nous sommes concentrés sur quelques paramètres et variables importants du modèle BILHYNA, dont l'impact sera discuté dans le chapitre V. Nous verrons que l'humidité à la capacité au champ a un poids important. Nous avons proposé des approches simples permettant de tenir compte de l'ensemble des états du couvert végétal pour calculer le bilan hydrique. Le bilan hydrique se montre notamment sensible au modèle de sénescence, et certains paramètres restent à être précisés et/ou mesurés, à titre prospectif : la cinétique de sénescence en fonction de paramètres plus robustes, et la modélisation la transpiration du couvert sénescent. Nous verrons aussi que la captation est directement influencée par la modélisation de l'évolution du couvert végétal. Les pluies font maintenant l'objet d'un traitement particulier.

II) Développement des modèles de pluie

Un des points-clés de notre travail consiste à calculer de manière robuste le ruissellement et la captation. Or, nous savons que le ruissellement est extrêmement sensible à l'intensité de la pluie (en mm/h), et donc - comme nous l'expliquerons - à deux paramètres essentiels : la durée de la pluie, et la forme de la courbe d'évolution de l'intensité au cours de la pluie (ROSNOBLET, 1998). Le modèle de captation est également sensible à ces paramètres, toutefois dans une moindre mesure. Face à ce besoin de grande précision dans la modélisation des pluies, les mesures communément disponibles et effectuées par les stations météorologiques automatiques offrent au mieux des valeurs de cumuls horaires de hauteur de précipitation, précision largement insuffisante pour nos objectifs (voir aussi KING, 2000). Pour des besoins d'application générale du modèle, ainsi que pour des études « statistiques » des termes de captation et de ruissellement, un volet essentiel était par conséquent de mettre au point un modèle efficace de répartition des pluies (en intensité et en durée)

à partir de ces simples données horaires. Les modèles de captation et de ruissellement devaient également être testés de manière précise sur les années 1998 à 2000 à partir des mesures réalisées au champ ; pour cela, nous avons de surcroît développé un modèle de pluie beaucoup plus précis, à partir de mesures instantanées.

Nous savons qu'une quantité de pluie mesurée sur une heure (soit « en mesure horaire ») se répartit en réalité de manière moyenne et statistique sur une durée plus petite qu'une heure : nous appellerons « durée effective des pluies horaires » (tp) ce paramètre tout à fait essentiel : $0 < tp \le 1h$.



Nos objectifs et les différentes étapes du travail sur les pluies, développés dans le présent chapitre, sont précisés dans la figure n°71 que nous expliquons ici. Le modèle de pluies que nous appellerons « instantanées » utilise les mesures les plus précises de la pluie (instants exacts de chaque basculement d'auget). Nous supposons que ce modèle permet de calculer des valeurs de référence de la captation et du ruissellement (« finalité 1 »). Nous avons entièrement développé ce modèle de pluies instantanées, qui nous le verrons nécessite de déterminer deux paramètres. Ce modèle vise d'abord à tester les modèles de captation et de ruissellement. Egalement, dans l'objectif de réaliser des simulations à partir de nombreuses années de données météorologiques (« finalité 3»), nous avons également développé un modèle de répartition de l'intensité des pluies horaires selon deux possibilités (intensité constante ou gaussienne), qui nécessite en particulier de connaître un paramètre de « durée effective des pluies horaires ». Nous verrons que nous pourrons fixer la valeur de ce dernier paramètre en comparant les résultats de captation et de ruissellement à partir des modèles de pluies instantanées et de pluies horaires (« finalité 2»).

Parallèlement à la modélisation de l'intensité des pluies, le calcul de son énergie cinétique est nécessaire pour la modélisation de la battance et de l'évolution de la rugosité de la surface du sol.

Le présent paragraphe est ainsi organisé comme suit. Nous présentons tout d'abord une hypothèse de répartition des pluies horaires sous forme d'une courbe de Gauss ou en intensité constante, qui nécessite la connaissance de respectivement un et deux paramètres. Nous développons ensuite le modèle de « pluies instantanées », et nous l'utilisons directement pour estimer les paramètres des modèles gaussien et constant de pluie horaire. Nous présentons enfin une approche simple de calcul de l'énergie cinétique des pluies.

1) Présentation de la démarche d'étude, et premiers éléments empiriques

Comment répartir la quantité de précipitation enregistrée par un pluviomètre au cours d'une heure ? La question est essentielle en particulier pour modéliser le ruissellement. Nous présentons ici un modèle original basé sur la forme de Gauss, dont la « calibration » fera l'objet du paragraphe suivant.

- Modélisation de l'intensité d'une pluie

Un premier traitement des mesures précises des pluies tel que nous l'avons fait sur le site de Grignon montre que les pluies se répartissent essentiellement sous forme de courbes d'allure gaussienne, comme l'illustrent les figures n°72 à 75 (noter les échelles variables de représentation).



Figures n°72 à 75 : quelques exemples de dépouillement des mesures précises de la pluie de Grignon (intervalle d'indépendance entre deux basculements d'auget successifs fixé à sa valeur maximale, 1h ; chaque losange représente l'instant mesuré d'un basculement d'auget)

Plusieurs caractéristiques essentielles des pluies sont alors à souligner. Les données valident bien le fait qu'il existe plusieurs types de pluies de caractéristiques variables. Comme nous pouvions le penser *a priori*, la durée des fortes pluies (exemples des 30/7 et 24/9/99 : figures n°72 et 75) est variable et largement inférieure à la durée de 1h, et ces événements décrivent *grosso modo* une courbe de Gauss avec de nombreuses petites oscillations. Les pluies moins fortes (exemple du 24/10/99 : figure n°74) semblent s'étendre sur de plus longues durées, tout en conservant l'allure d'une succession de courbes avec un pic d'intensité. Enfin, les pluies les plus faibles paraissent d'intensité relativement constante et faible (exemple du 14/12/98 : figure n°73). Notons également qu'un découpage horaire des mesures peut conduire à diviser les pluies en deux parties ou plus. En outre, le découpage des mesures en pluies individuelles est difficile, et ceci constitue l'un des objets du paragraphe suivant. Comme nous le verrons, l'ensemble de ces éléments a également un impact sur la modélisation des pluies horaires.

Dans notre travail, une question tout à fait essentielle était de pouvoir déterminer quels modèles pouvaient décrire de manière robuste et moyenne la forme d'allure gaussienne de l'intensité d'une pluie. Tout d'abord, nous avons limité notre réflexion à un seul modèle pour toutes les pluies, n'ayant pas défini de critères de discrimination entre les différents types de pluies. En outre, puisque le ruissellement est le processus potentiellement le plus fort de notre étude et sachant que celui-ci est essentiellement présent lors des pluies de forte intensité, nous avons favorisé la restitution des fortes intensités de pluie dans nos critères de modélisation. Par conséquent, nous avons cherché une approche qui permette de calculer une courbe d'intensité présentant un pic d'intensité.

La bibliographie présente divers types de modèles cherchant à retraduire les caractéristiques d'intensité et de durée des pluies, selon des approches généralement assez complexes, utilisant les mesures journalières et un certain nombre de paramètres empiriques. Notamment, le modèle WEPP calcule une seule pluie par journée et détermine l'évolution de l'intensité selon 4 paramètres (quantité de pluie, intensité moyenne, ratio du pic d'intensité sur l'intensité moyenne, temps au pic d'intensité) (FOSTER et LANE, 1987, NICKS *et al.*, 1995, ZHANG *et al.*, 1995a, 1995b). Le modèle de CONNOLY *et al.* (1998) (voir aussi LOCH *et al.*, 2000) calcule le nombre de pluies sur une journée, et pour chaque pluie, l'instant de début, la quantité de précipitation, la durée, la valeur du pic d'intensité, et le temps au pic d'intensité.

Notre choix s'est porté sur la restitution des pluies horaires selon une courbe de Gauss, qui nous paraissait constituer une bonne approche de départ - de nombreux phénomènes naturels se prêtant bien en outre à une modélisation de ce type. D'autres formules pourraient peut-être offrir un réalisme accru, notamment en les adaptant aux différents types de pluies, mais nous n'avons pas développé ce type d'approche, qui reste donc une ouverture pour des recherches futures. Nous jugerons dans la suite de notre travail de la robustesse du modèle gaussien, tel que nous allons maintenant le présenter.

- <u>Développement du modèle de pluie horaire selon la formule de Gauss</u>

La formule de Gauss peut être adaptée à la modélisation des pluies, à partir de quelques hypothèses. Nous présentons en annexe (n°11) le développement de ce modèle, et nous concentrons ici sur le choix de ses paramètres. Tout d'abord, un premier est clairement fixé : la hauteur de précipitation, mesurée selon un pas de temps horaire. Notre objectif est ainsi de donner une courbe d'intensité à cette pluie horaire, à partir du modèle gaussien. Deux paramètres indispensables sont alors à définir pour calculer une courbe à partir de la valeur de la hauteur de pluie : la durée réelle de la pluie (nécessairement inférieure ou égale à une heure, et que nous appelons « durée effective des pluies horaires »), et la valeur de l'intensité minimale aux deux bornes de la courbe (opération nécessaire pour prendre en compte les parties s'étendant vers les temps infinis). L'ensemble des données permet de calculer la valeur du pic d'intensité.

Avant de déterminer la durée de la pluie, il nous a paru logique de traiter la question du choix de valeur de l'intensité de pluie (en mm/h) aux bornes de la courbe de Gauss. Nos considérations précédentes sur la précision du pluviomètre nous ont poussé à fixer la limite de la mesure à la valeur hypothétique mais raisonnable de 0.5mm/h. C'est par conséquent la valeur que nous affecterons à l'intensité de la pluie aux bornes de la courbe de Gauss.

Regardons néanmoins le poids du choix de la valeur de l'intensité aux bornes (ou « minimale », notée « Imin ») sur les caractéristiques de la courbe de Gauss. Nous constatons tout d'abord que la valeur de l'intensité aux bornes de la courbe a un impact fort sur la valeur du pic d'intensité, et ceci de manière d'autant plus marquée que l'intensité aux bornes est faible (figure n°76). Nous pouvons également obtenir des courbes de pluie gaussienne très similaires à partir de différents jeux de paramètres de durée et d'intensité aux bornes, comme l'illustre la figure n°77. Nous voyons ainsi que la durée de la pluie est largement allongée par l'abaissement de l'intensité aux bornes. Ceci nous indique d'ores et déjà que les résultats de ruissellement devraient être très similaires pour différents jeux de paramètres de durée et d'intensité aux bornes, et par conséquent le paramètre de « durée effective de la pluie horaire » est très dépendant de la valeur de l'intensité aux bornes de la courbe de pluie gaussienne.

Finalement, nous avons choisi de fixer dans notre étude la valeur de l'intensité aux bornes de la courbe de pluie gaussienne à 0.5mm/h, et de porter notre travail sur la valeur de la durée de la courbe de Gauss (soit la « durée effective des pluies horaires »). Nous verrons que ce choix est tout à fait valable, mais qu'une valeur plus faible d'intensité aux bornes de la courbe de Gauss (de l'ordre de 0.01mm/h) peut être plus robuste.



Figure n°76 : impact de la valeur de l'intensité de la pluie aux bornes de la courbe de Gauss (« Imin »), avec une pluie de 10mm répartie sur une durée de 0.55h

Figure n°77 : illustration de l'impact de l'intensité aux bornes de la courbe de Gauss sur la durée de la pluie : pluie de 10mm répartie selon deux jeux de paramètres (durée 0.8h avec Imin 0.01mm/h, et durée 0.55h avec Imin 0.5mm/h)

- Modélisation de la pluie horaire en intensité constante

La pluie est souvent décrite en intensité constante dans les modèles. Parallèlement au travail sur le modèle gaussien de pluie, nous avons donc également testé le modèle d'intensité constante, dont nous voulions savoir s'il pouvait malgré son aspect *a priori* trop simpliste être utilisé pour calculer la captation et/ou le ruissellement.

Contrairement au modèle de pluie gaussienne, le modèle constant ne nécessite de connaître qu'un seul paramètre : la durée effective des pluies horaires. Nous verrons que ce paramètre de durée est de valeur différente pour les modèles de pluies gaussienne et constante.

- <u>Premiers éléments empiriques</u>

Pour avoir une première idée de la robustesse des modèles gaussien et constant de pluie, et approcher la valeur du paramètre de durée effective des pluies horaires, nous avons dans un premier temps traité une série de mesures assez peu précises, estimées par la station météorologique de Grignon : quantité de pluie horaire, et valeur de l'intensité maximale journalière de la pluie. Cette dernière donnée est simplement calculée à partir du nombre maximal de basculements d'auget sur des tranches glissantes de 6 minutes de durée (la valeur minimale du pic d'intensité étant par conséquent de 5 mm/h et 2mm/h respectivement pour les capacités d'auget de 0.5 et 0.2mm). La série de mesures disponibles s'étendait de février 1997 à fin 2000. Nous verrons rapidement que l'insuffisance des résultats ainsi obtenus nécessitait que nous traitions des mesures beaucoup plus précises de la pluie, ce qui sera l'objet du paragraphe suivant.

A partir de ces données, nous avons constitué des couples hypothétiques en affectant la valeur du maximum d'intensité journalière à la hauteur de précipitation horaire la plus forte de chaque journée, ce qui nous paraissait tout à fait raisonnable *a priori*. Cela revient toutefois à commettre une erreur lorsqu'une pluie donnée est coupée en plusieurs parties par le découpage horaire, mais en moyenne nous supposons que cela intervient peu. Nous avons ensuite simplement replacé l'ensemble de ces points sur un graphique de pic d'intensité en fonction de la hauteur de précipitation, où nous figurons également les courbes correspondant aux modèles gaussiens pour différentes durées effectives de pluie, de 0.1 à 1.0h selon un pas de 0.1h (figure n°78). Nous ne représentons pas les courbes pour le modèle d'intensité constante.



Figure n°78 : relations hauteur de pluie horaire / pic d'intensité (station météorologique de Grignon Bioclimatologie, 04/02/97-31/12/00) face aux courbes du modèle gaussien

Traits épais = droite de régression (tous les points) : $y = 4,5942x (r^2 = 0,6879)$

Nous voyons que les différents points s'étalent dans un large domaine quantité / pic d'intensité, avec une dispersion diminuant toutefois avec l'augmentation de la hauteur de précipitation. Les mesures ne permettent pas de définir des classes très précises. Nous noterons que les pluies de très faible intensité se rapprochent du modèle de Gauss de durée 0.1h, ce qui constitue un artefact : la mesure est insuffisamment précise pour les faibles précipitations horaires, affectant une valeur de pic d'intensité trop grande en rapport avec la hauteur de pluie (5mm/h au minimum, quelle que soit la hauteur de pluie horaire maximale de la journée, de 0.5 à 5 mm). Nous excluons ainsi les points de moins de 1.5mm de pluie. Nous avons noté également que les valeurs des pics d'intensité peuvent correspondre à des valeurs seulement partielles de hauteur de pluie, à cause de l'effet de découpage arbitraire des tranches horaires de mesure. Ceci implique que les points auront tendance à être décalés vers les modèles de courte durée de courbe de Gauss.

En ce qui concerne le caractère saisonnier des pluies, peu d'éléments apparaissent. Le seul paramètre véritablement variable selon la saison semble être la quantité de pluie horaire maximale (et le pic d'intensité qui lui est lié) : en hiver et en automne, les pluies horaires ne dépassent guère

6mm, contre une limite de 20mm pour les pluies printanières et estivales. Nous traitons donc l'ensemble des points sans distinction saisonnière.

Ces points indiquent que les pluies se répartissent en moyenne surtout dans le domaine délimité par les courbes d'intensité gaussienne de 0.4 et 0.8 heures (voir l'annexe n°12 pour le détail du traitement). Les classes supérieures et inférieures ont également une représentation importante, mais distribuée de manière relativement égale dans les deux groupes. Remarquons toutefois que le printemps et l'été se démarquent par un nombre beaucoup plus important de points dans le groupe des modèles gaussiens de durée 0.4 à 0.1h, probablement par l'occurrence d'événements de type orageux.

La droite de régression linéaire calculée sur tous les points se rapproche du modèle gaussien de 0.5-0.6 heures de durée et constant de 0.2h de durée, avec toutefois une certaine incertitude puisque les relations entre le pic d'intensité et la quantité de pluie gaussienne ne décrivent pas des droites mais des courbes. Nous verrons plus loin que ce premier résultat est tout à fait bon dans le cas du modèle gaussien, et beaucoup moins bon pour le modèle constant.

- <u>Conclusions – fixation des paramètres</u>

Les valeurs précédentes constituent surtout un premier ordre de grandeur utile de la durée réelle ou effective des pluies horaires, et fournissent une première indication que les pluies doivent pouvoir en moyenne être considérées comme des courbes de Gauss. Les pluies semblent se rapprocher des modèles gaussiens (intensité aux bornes de 0.5mm/h) de durée 0.5-0.6 h et du modèle constant de durée 0.2h. La paramétrisation précise des modèles de pluie horaire sera détaillée dans les paragraphes suivants relatifs à la captation et à l'infiltration / ruissellement.

2) Développement d'un modèle de pluie à partir des mesures très précises

Pour les besoins de l'étude statistique des paramètres de modélisation des pluies horaires, et afin disposer des données pluviométriques très précises nécessaires au test des modèles de captation et de ruissellement, une étape obligatoire était de réaliser des mesures selon une base de temps largement inférieure à l'heure, et de développer un modèle de pluie utilisant ces mesures. L'objet du présent paragraphe est de montrer le développement de ce modèle, ainsi que le choix de ses paramètres. Nous verrons l'utilisation du modèle dans le paragraphe suivant, ainsi que dans les chapitres suivants.

a) <u>Modélisation de l'intensité de la pluie (en mm/h) à partir des mesures d'instant de basculement d'auget</u>

L'objectif était de développer un modèle capable de restituer une courbe d'évolution des intensités de pluie (en mm/h) à partir de nos mesures précises, selon un pas de temps très fin (choisi de 0.01h). Le développement du modèle, assez simple dans le principe, a toutefois exigé beaucoup de rigueur et la fixation de certaines hypothèses de traitement (que nous allons exposer) et en particulier la fixation de deux paramètres.

Nous disposons pour la présente étude d'une longue série de mesures instantanées de la pluie (01/10/1998 - 11/01/2001), mais nous nous sommes néanmoins limités au 31/12/2000 pour les études de la captation et du ruissellement.

- Présentation des hypothèses de découpage d'une pluie et de calcul de la courbe d'intensité

Le temps séparant deux basculements successifs d'auget indique une seule et unique information : 0.5mm de précipitation ont été enregistrés durant cet intervalle. Nous avons considéré par hypothèse que l'intensité de la pluie est constante à l'instant de chaque basculement d'auget, ce qui compte tenu de la faible capacité de l'auget basculeur représente une approximation acceptable, d'autant meilleure que les pluies sont de forte intensité. Nous avons émis l'hypothèse que la pluie peut être découpée en une succession de paliers d'intensité constante, la difficulté étant de déterminer la durée, la position dans le temps et la valeur de l'intensité (en mm/h) de chaque palier.



Figure n°79 : illustration du calcul d'une courbe d'intensité de pluie à partir des mesures des instants précis de basculement d'auget

La figure n°79 permet d'illustrer les principaux points du traitement de mesures de pluie à partir d'un extrait de nos mesures. Nous présentons dans l'annexe n°13 le détail des calculs qui permettent de restituer les intensités des pluies à partir de la série de mesure des instants de basculement d'auget. Nous nous attardons simplement ici sur les points les plus fondamentaux du programme.

Interpolation des intensités calculées

Tout d'abord, nous ne souhaitions pas conserver une allure en paliers successifs d'intensité de pluie, que nous trouvions insuffisamment réaliste. Nous avons donc choisi d'interpoler les points d'intensité selon un modèle linéaire, suffisamment simple pour garder au traitement informatique une certaine simplicité.

Découpage en pluies individuelles

Le traitement nécessite de regrouper les séries de basculements d'auget en pluies individuelles, c'est-à-dire en événements continus d'intensité (en mm/h) non nulle. Ceci implique de déterminer un critère de discontinuité, et nous avons ainsi choisi de fixer un paramètre « d'intervalle de temps d'indépendance entre deux basculements successifs d'auget ». Ceci conduit à individualiser un certain nombre de petites pluies isolées de 0.5 mm, dont nous devons alors définir la durée. Nous avons choisi d'employer un paramètre statistique constant, que nous qualifierons de « durée par défaut des petites pluies ». Notons que la valeur d'intervalle de temps d'indépendance entre deux basculements successifs d'auget de temps d'indépendance entre deux basculements successifs d'auget doit être strictement supérieure à celle de la durée par défaut des pluies de 0.5mm. Une dernière manipulation consiste à fixer les instants de début et de fin de chaque pluie de plus de 0.5mm, ce qu'impose directement le modèle d'interpolation linéaire choisi.

Calcul d'une valeur d'intensité

Pour calculer la valeur de l'intensité de la pluie à l'instant d'un basculement d'auget, nous posons l'hypothèse que la quantité de précipitation correspondant à un basculement (0.5mm) est répartie sur l'intervalle de temps égal à la somme des demi-intervalles avec les deux basculements qui l'encadrent (voir figure n°79). Lorsque le basculement est le premier ou le dernier d'une pluie de plus de 0.5mm, l'intervalle de temps utilisé est alors celui qui sépare ce basculement de son voisin le plus proche. Cette méthode a l'avantage de relier l'instant d'un basculement d'auget à la fois à celui qui le précède et à celui qui le suit. La pluie ainsi modélisée subit un certain lissage. L'intensité des pluies isolées (de 0.5mm) est directement calculée à partir de la valeur de durée fixée par défaut.

Positionnement des valeurs d'intensité par rapport aux instants des basculements d'auget

Nous voyons que nos calculs visent à centrer un palier d'intensité constante correspondant à 0.5mm de basculement d'auget sur l'instant précis où ce basculement a été enregistré. Ce point est

éventuellement discutable, dans la mesure où pour un basculement d'auget donné, le modèle attribue toujours une partie de cette quantité après l'instant du basculement. Il s'agit d'une imprécision temporelle inhérente à notre modèle de lissage, mais que nous estimons tout à fait raisonnable pour deux raisons. D'une part, les quantités de pluie mises en jeu sont faibles, et d'autre part, l'imprécision temporelle de la mesure de la pluie est inévitable, puisque l'auget basculeur n'est *a priori* pas vide à l'instant où débute et où se termine une pluie.

Justesse du bilan d'eau

Le modèle présenté donne une quantité de pluie strictement égale à la quantité de pluie correspondant au nombre mesuré de basculements d'auget. Nous supposons que l'évaporation de l'eau dans l'auget basculeur est nulle et que la quantité d'eau demeurant dans l'auget à l'issue d'une pluie est égale à la quantité d'eau présente dans l'auget au début de la pluie suivante.

- <u>Conclusions</u>

Finalement, le modèle que nous proposons semble suffisamment simple et robuste pour l'utilisation souhaitée. Il a l'avantage de ne nécessiter que deux paramètres : l'intervalle de temps à partir duquel deux basculements d'auget successifs sont indépendants, et la durée par défaut d'une pluie constituée seulement d'un seul basculement d'auget. Ce modèle simplifie toutefois le calcul des durées précises de chaque pluie, mais il ne nous semblait pas possible de contourner cette simplification. L'utilisation de mesures encore plus fines, avec des pluviomètres de plus petite capacité d'auget (0.2 ou 0.1mm) permettrait d'éclairer plus efficacement ce point. Il serait sans doute également peu difficile d'effectuer un lissage des points d'intensité de pluie à partir d'un modèle plus robuste d'interpolation, polynomial notamment, et il pourrait être intéressant d'en étudier l'éventuel impact sur les résultats des simulations de captation et de ruissellement.

b) Etude et choix des paramètres de traitement des mesures précises de la pluie

Voyons maintenant la question essentielle de la détermination des deux paramètres qui nous permettent de mettre en œuvre notre modèle de « pluies instantanées ». Plutôt qu'un choix entièrement *a priori*, nous avons préféré nous baser sur l'étude des données expérimentales. Nous regardons également la sensibilité des caractéristiques pluviométriques à ces deux paramètres.

- <u>Détermination d'une valeur du paramètre d'intervalle d'indépendance entre deux</u> <u>basculements successifs d'auget</u>

A partir de quel intervalle de temps pouvons-nous considérer que deux basculements d'auget successifs sont indépendants, c'est-à-dire appartenant à deux pluies différentes ? La question n'est pas triviale. Nous avons étudié pour cela la courbe de fréquence des intervalles de temps entre basculements d'augets successifs sur la période 01/10/1998 - 11/01/2001. Tous les points ne devaient pas être pris en compte, et quelques hypothèses *a priori* s'imposaient. Nous avons ainsi éliminé les basculements d'auget isolés, constituant des pluies de 0.5mm, soit 448 points. Ensuite, nous avons sélectionné seulement les intervalles entre basculements successifs d'auget inférieurs ou égaux à 1 h, supprimant 414 autres points, et laissant 2 788 points utiles (soit 76.4 % du nombre total de points).

La valeur moyenne des intervalles est de 0.22 h lorsque nous sélectionnons uniquement les points inférieurs à 1h, et de 6.11h en prenant en compte tous les points. Ceci confirme l'intérêt de limiter l'intervalle étudié, et le choix d'une valeur moyenne ne sera donc fait qu'*a priori*. En fonction de nos considérations concernant la précision de la mesure, nous fixons la valeur de 1 heure pour l'intervalle maximum.

A partir de l'observation de la courbe de fréquences des intervalles ente basculements d'auget (voir figures n°80 et 81), plusieurs points particuliers pourraient être retenus. La moyenne arithmétique des points est de 0.22 h, mais semble trop restrictive. Nous observons qu'à partir de 0.6h approximativement, la courbe des fréquences prend une allure particulière - décrivant des fluctuations de forme « bruitage » - et nous pensons donc qu'il s'agit de la valeur véritablement significative. Cette valeur correspond à un cumul de 92% des points, ce qui est très satisfaisant. Des tests ultérieurs de sensibilité des modèles de captation et de ruissellement à la valeur de ce paramètre permettront néanmoins de peser l'impact de son incertitude.



Figures n°80, 81 : fréquence et fréquence cumulée des intervalles entre basculements successifs d'auget (classes de 1 minute)

- Détermination de la durée et de l'intensité (mm/h) des pluies correspondant à un seul basculement d'auget

Quelle durée attribuer aux pluies - très nombreuses - constituées d'un seul basculement d'auget ? En première approche, un choix judicieux serait d'utiliser directement la valeur de l'intervalle d'indépendance entre deux basculements successifs d'auget. Nous avons toutefois étudié plus précisément ce point, en étudiant la courbe de fréquence des valeurs d'intensité (en mm/h).

Afin de ne pas biaiser les calculs, nous avons éliminé les points d'intensité qui ne correspondaient pas à un basculement d'auget entouré de deux basculements assez proches pour appartenir à la même pluie (soit n-2 points à partir d'une pluie constituée de n basculements d'auget, $n \ge 3$). Notons également que les points utilisés sont ceux préalables à l'étape de correction des chevauchements de certaines courbes d'intensité (cf. annexe n°13), étape qui conduit à relier certaines pluies voisines par une valeur faible d'intensité.



Figure n°82 : courbe de fréquence des intensités de pluie (classes de 0.2 mm/h) pour différentes valeurs de l'intervalle d'indépendance entre basculements d'auget

Nous avons testé plusieurs valeurs d'intervalle d'indépendance entre basculements d'auget (indiqué « tlim »). Les résultats (figure n°82) montrent que la valeur la plus fréquente d'intensité de pluie augmente lorsque diminue la valeur du paramètre d'intervalle d'indépendance entre basculements d'auget. Un intervalle de 0.22h découpe énormément les pluies et donne la fréquence la plus élevée à la valeur de 3mm/h d'intensité de pluie, contre deux valeurs très proches pour les intervalles de 0.6 et 1.0h : respectivement 1.3 et 1.1mm/h. Ces intensités correspondent selon notre

modèle de pluie à des durées respectivement de 0.91h, 0.77h et 0.34h. Compte tenu des incertitudes, nous pouvons donc sans trop d'erreur assimiler la durée par défaut des pluies de 0.5mm à la valeur de l'intervalle d'indépendance entre basculements d'auget, soit 0.6h.

La durée et la courbe d'intensité des pluies de faible hauteur (0.5 mm) est relativement difficile à modéliser, mais les résultats montrent que nos choix sont relativement robustes. Toutefois, sachant que les pluies de 0.5mm sont très nombreuses, leur poids sur la captation pourrait être notable, et nous évaluerons donc ce point à la lumière de tests de sensibilité.

3) Recherche des paramètres permettant de modéliser la pluie à partir des mesures horaires

Le point important de l'utilisation des quantités de pluie horaire pour calculer le ruissellement et la captation est d'en définir une durée statistique réelle (appelée « durée effective des pluies horaires », inférieure à une heure). Nous allons en étudier les possibilités pratiques pour les deux modèles de pluies horaires proposés, gaussien et constant. Nous avons pour cela comparé les résultats simulés de captation et de ruissellement entre les modèles de pluies instantanées et horaires (gaussiennes et constantes), selon différentes valeurs des paramètres de temps (« intervalle d'indépendance entre deux basculements d'auget » pour les pluies instantanées, et « durée effective » pour les pluies horaires), en conditions simplifiées et constantes de sol et de couvert végétal, sur la période du 01/10/98 au 31/12/2000.

Nous noterons que, afin de rassembler et d'analyser dans la même partie l'ensemble des données relatives à la modélisation de la pluie, nous utilisons directement ici des résultats de simulations des modèles de captation et d'infiltration / ruissellement couplés à BILHYNA, dont le détail est présenté par ailleurs.

- <u>Etude de l'infiltration / ruissellement</u>

Nous avons utilisé le modèle d'infiltration / ruissellement couplé à BILHYNA, avec un sol remis chaque jour à la capacité au champ, une capacité de flaquage constante de 1mm, sans croûte de battance ni couvert végétal. Ces éléments nous ont permis de calculer un nombre important d'événements de ruissellement, tout en conservant un certain réalisme des conditions d'application. Nous avons également comparé deux types de situations présentant des caractéristiques hydrodynamiques bien différenciées : sol avec lit de semence (forte capacité d'infiltration), et sol labouré (faible capacité d'infiltration). La figure n°83 en présente les résultats.



Figure n°83 : ruissellement cumulé entre le 01/10/98 et le 31/12/2000 pour les différents modèles de pluies, selon le paramètre de durée (« intervalle d'indépendance entre deux basculements d'auget » pour les pluies instantanées, et « durée effective » pour les pluies horaires) et pour deux types de sols

Le modèle de pluies instantanées montre des résultats extrêmement stables de ruissellement cumulé en fonction de la valeur du paramètre d'intervalle d'indépendance entre basculements d'auget. Nous prenons pour référence la valeur de ruissellement cumulé obtenue avec 0.6h d'intervalle d'indépendance entre basculements d'auget (indiquée par un trait pointillé sur la figure n°83), et nous allons regarder pour quelle durée effective horaire les modèles de pluies gaussienne et constante donnent le même résultat.

Le modèle d'infiltration / ruissellement se montre très sensible à la durée des pluies horaires gaussiennes et constantes. Cette sensibilité est moindre pour le sol labouré (faible conductivité hydraulique à saturation) que pour le sol semé (plus forte conductivité hydraulique à saturation), ce qui indique que l'infiltration / ruissellement est d'autant plus sensible au modèle de pluie que sa perméabilité est forte. Le ruissellement décroît tout à fait logiquement à mesure que la durée des pluies horaires augmente, mais le processus s'inverse en s'approchant de la durée limite de 1 heure ; cette particularité est due simplement à l'abaissement du temps de redistribution de l'eau dans le sol entre deux pluies consécutives. Nous observons quelques légères irrégularités sur les courbes pour les pluies gaussiennes et constantes dans le cas du labour d'hiver, notamment pour la durée de pluie horaire de 0.7h ; ceci est dû à l'occurrence de quelques événements où le modèle calcule une infiltrabilité nulle par saturation d'une couche de sol à la suite d'une phase de redistribution de l'eau dans le sol entre deux pluies (et infiltration totale de la flaque).

	Durée effective horaire (h)			
	Sol semé	Sol labouré	moyenne	
Pluie gaussienne	0.55	0.54	0.545	
Pluie constante	0.36	0.41	0.385	

Tableau nº11 : durée effective des pluies horaires selon le modèle de pluie

Les durées effectives les plus réalistes des pluies horaires sont présentées dans le tableau $n^{\circ}11$. Le modèle de pluie constante est le moins cohérent, avec une durée effective variable selon le type de sol. Le modèle gaussien est par contre plus robuste, avec la même durée effective dans les deux cas. Le modèle de pluie gaussienne est donc préférable pour calculer le ruissellement à partir des pluies horaires. Le modèle de pluie constante, présentant le gros avantage de faciliter la résolution des équations, apportera néanmoins des résultats tout à fait raisonnables en utilisant une durée effective moyenne de 0.385h.



Figure n°84 : comparaison du ruissellement horaire entre les modèles de pluies instantanées et gaussiennes (durée effective horaire de 0.5h), pour deux « saisons » (automne/hiver et printemps/été), sur sol en labour d'hiver

La figure n°84 compare, pour les mêmes simulations que précédemment, les valeurs de ruissellement horaire calculées entre les modèles de pluie instantanée et de pluie horaire gaussienne (ici durée effective testée à 0.5h, sur labour d'hiver). Nous pouvons constater deux choses. Tout d'abord, le paramètre de durée effective semble remarquablement indépendant de la saison : pour les deux périodes (printemps/été et automne/hiver), la droite de régression est identique. Egalement, nous voyons que les forts événements de ruissellement sont très fidèlement restitués par le modèle de pluie horaire. De nombreux points sont toutefois situés dans une fourchette d'erreur maximale de $\pm 2mm$, en particulier pour les petits événements de ruissellement. Notons que nous ne présentons pas les résultats pour le modèle de pluies constantes, les points étant très similaires.

Nous montrons ainsi que globalement, le modèle de pluie horaire (gaussien ou constant) avec une durée effective horaire ajustée permet d'obtenir des résultats d'infiltration / ruissellement en moyenne tout à fait similaires à ceux calculés avec le modèle de pluies instantanées.

Nous noterons que l'analyse n'a pas été menée concernant l'évolution de la croûte de battance.

- <u>Etude de la captation</u>

La figure n°85 présente pour la captation la même étude que précédemment, avec un couvert végétal constant de maïs (LAI de $3.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$), un sol restant à la capacité au champ, sans calcul de l'infiltration / ruissellement.

La figure n°85 permet de constater que les termes de quantité d'eau captée et d'abaissement de la transpiration du couvert sont assez sensibles au paramètre de durée effective des pluies horaires, mais le bilan de la captation est quant à lui remarquablement stable. La sensibilité au paramètre des pluies instantanées est par ailleurs assez faible. La forme de la pluie horaire, gaussienne ou constante, a un poids très faible sur les valeurs de captation. Nous n'avons également pas remarqué de particularité saisonnière marquée dans les résultats.

Nous estimons ainsi que la durée effective horaire pour calculer la captation est de près de 0.4h, tant pour le modèle de pluie gaussienne que constante, et que toute valeur proche donne pratiquement les mêmes résultats. La valeur de durée effective de pluie horaire estimée précédemment pour calculer l'infiltration / ruissellement est ainsi tout à fait raisonnable pour calculer la captation, avec une très faible erreur.



Figure n°85 : cumuls des bilan de la captation et de l'abaissement de la transpiration du couvert (01/10/98-31/12/00) pour les différents modèles de pluies, selon le paramètre de durée (intervalle d'indépendance entre deux basculements d'auget » pour les pluies instantanées, et « durée effective » pour les pluies horaires)

- Choix final des paramètres de modélisation des pluies horaires

Nous avons montré que l'utilisation des pluies horaires est tout à fait efficace pour calculer l'infiltration / ruissellement et la captation, au moyen d'un modèle de pluie d'intensité gaussienne ou constante utilisant une valeur de durée effective horaire ajustée et constante pour toute l'année. Le modèle gaussien (intensité aux bornes de 0.5mm/h et durée effective de 0.55h) semble préférable au modèle constant par son meilleur réalisme dans le calcul de l'infiltration / ruissellement. Par ailleurs, nous avons pu juger que la variabilité saisonnière du paramètre de durée effective horaire était négligeable. Nous retenons donc *in fine* pour l'utilisation des pluies horaires le modèle gaussien avec des paramètres fixes et constants toute l'année (intensité aux bornes de 0.5mm/h et durée effective horaire de 0.55h).

- <u>Bilan</u>

Tel que nous en avons abordé l'étude, la valeur du paramètre de durée effective horaire des pluies n'est qu'une valeur de calage, ajustée pour les caractéristiques du sol étudié, des pluies instantanées et des modèles d'infiltration / ruissellement et de captation, et dépendant des caractéristiques du modèle de pluie horaire. Il est important de noter de surcroît que ce paramètre est différent de la durée moyenne réelle des pluies sur une heure de mesure. L'extrapolation des valeurs des paramètres de notre modèle de pluie gaussienne est par conséquent sujette à caution :

pour chaque nouvelle situation, il pourrait être nécessaire de recalculer les paramètres en refaisant l'étude que nous avons menée, ce qui est extrêmement lourd.

Il serait donc particulièrement intéressant de pouvoir limiter la paramétrisation du modèle de pluie horaire gaussienne à une simple étude des données climatiques, en fixant le paramètre de durée des pluies horaires dont la valeur réelle est facilement estimable à partir des mesures instantanées. Afin d'explorer cette voie, nous avons estimé à partir des résultats du modèle de pluies instantanées que la durée moyenne des pluies sur une heure était sensiblement de l'ordre de 0.8h (somme des pas de temps avec intensité de pluie non nulle, sur une heure à partir du découpage temporel utilisé par les stations de mesure météorologiques - pluies de moins de 2mm non prises en compte). Nous avons vu par ailleurs que la durée effective horaire des pluies gaussiennes était très dépendante de la valeur du paramètre d'intensité aux bornes (cf. figure n°77 et ses commentaires). Avec le modèle de pluie gaussienne, nous avons ainsi calculé qu'en utilisant la valeur (réelle) de 0.8h de durée des pluies horaires, nous pouvions retrouver les valeurs de ruissellement calculées avec les pluies instantanées, simplement en ajustant l'intensité aux bornes à une valeur de l'ordre de 0.01mm/h, avec des résultats extrêmement proches de ceux calculés avec une durée effective horaire de 0.55h et une intensité aux bornes de 0.5mm/h. Par contre, le modèle de pluie constante utilisant la même valeur de durée réelle de pluie (0.8h) donne des résultats de ruissellement très largement sous-estimés (cf. figure n°83), confirmant le caractère inadapté de l'hypothèse d'une pluie d'intensité constante.

Ces derniers éléments ne constituent qu'un aspect prospectif, que nous n'avons pas développé plus en détail. Nous montrons néanmoins que le modèle de pluie constante est tout à fait irréaliste, et que la robustesse du modèle de pluie gaussien peut être facilement améliorée en ajustant la valeur du paramètre d'intensité aux bornes.

4) Modélisation de l'énergie cinétique des pluies

Les pluies n'ont pas toutes la même énergie d'impact au niveau de la surface du sol. Il s'agit d'un important élément d'étude de la dynamique de la formation des croûtes de battance et de l'évolution de la rugosité, que nous avons par conséquent cherché à modéliser.

L'énergie cinétique des pluies a fait l'objet de très nombreuses études pour des thématiques variées (érosion des sols, la battance, transferts d'agents pathogènes, etc.) et les données de la bibliographie sont ainsi particulièrement riches sur le sujet. La formulation du problème apparaît relativement simple dans le cas d'une goutte d'eau de diamètre donné car elle se base sur des équations robustes et parfaitement connues. L'étape la plus difficile est le calcul du spectre de distribution des diamètres des gouttes d'eau au cours d'une pluie, sur laquelle les efforts de recherche se sont concentrés.

- Modélisation de l'énergie cinétique des pluies

Pour une intensité donnée de pluie, l'énergie est très variable (ROSEWELL, 1986) et il convient de donner une expression moyenne de cette relation. La résolution la plus solide consiste à calculer l'énergie de chaque goutte de pluie à partir de mesures ou d'une formule empirique du spectre de distribution des diamètres de gouttes. Nous avons exclu *a priori* cette approche pour sa complexité.

Une série de formules empiriques a été proposée pour de nombreux sites géographiques du globe (on en trouvera un large aperçu comparatif dans ROSEWELL, 1986 et BABAU, 1987). L'expression de l'énergie de la pluie est souvent en Joules par unité de surface et par millimètre de pluie. La plus classique est la suivante :

 $Ep = a + b \cdot \log(I) \qquad Ep = énergie cinétique de la pluie (J/m²/mm de pluie)$ a et b = coefficients empiriques (J/m²/mm de pluie)I = intensité de la pluie (mm/h)

Notamment WISHMEIER (1958) donne a=11.9 et b=8.73, et ROOSE (1977) a = 12.14 et b = 8.90.

De nombreuses autres formules empiriques sont proposées (HUDSON, 1965, KINNELL, 1973, CARTER *et al.*, 1974, MAC GREGOR et MUTCHLER, 1976, KINNELL, 1981).

Toutes ces formules nous ont toutefois paru trop empiriques, et nous avons donc cherché à savoir si un raisonnement physique nous permettait de retrouver une loi semblable. Pour exprimer l'énergie cinétique d'une pluie d'intensité donnée, nous savions facilement traduire l'énergie d'une goutte de pluie de rayon donné, mais la relation entre le rayon moyen des gouttes et l'intensité de la pluie était l'inconnue. Nous en avons calculé une expression originale à partir d'une formule empirique classique du spectre des rayons de goutte en fonction de l'intensité de pluie. Voici notre démonstration.

L'énergie cinétique d'une goutte d'eau (en Joules) est donnée par la relation :

$$\varepsilon = \frac{1}{2}.mV^2$$
 $m = masse \ de \ la \ goutte \ (Kg)$
 $V = vitesse \ de \ la \ goutte \ (m/s)$

Or, la masse de la goutte (en Kg) est donnée par :

$$m = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^{3} \cdot \rho_{eau} \qquad \qquad \begin{array}{l} R = rayon \ de \ la \ goutte \ (m) \\ \rho_{eau} = masse \ volumique \ de \ l'eau \cong 1000 \ Kg/m^{3} \end{array}$$

D'autre part, la vitesse de la goutte (en m/s) s'exprime de la sorte :

$$V = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot R \cdot \rho_{eau}}{3 \cdot CD \cdot \rho_{air}}} \qquad CD = coefficient (* drag coefficient *) \cong 0.44$$
$$\rho_{air} = masse \ volumique \ de \ l'air \cong 1 \ Kg/m^3$$
$$g = accélération \cong 9.8m/s^2$$

Le coefficient CD est en toute rigueur fonction du nombre de Reynolds. Pour les gouttes de pluie, nous pouvons assimiler sa valeur à 0.44 (SEINFELD et PANDIS, 1995). Il vient alors :

$$\varepsilon = \frac{16}{9} \cdot R^4 \cdot \frac{\pi \cdot g \cdot \rho_{eau}^2}{CD \cdot \rho_{air}} \qquad \text{soit} \quad \varepsilon = \alpha \cdot R^4 \qquad \text{avec} \qquad \alpha = \frac{16}{9} \cdot \frac{\pi \cdot g \cdot \rho_{eau}^2}{CD \cdot \rho_{air}}$$

Nous émettons l'hypothèse qu'à une intensité de pluie donnée correspond un rayon de goutte équivalent. L'intensité de la pluie (« I » en m/s) peut alors s'écrire sous la forme :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad \qquad \Delta Q = quantité \ de \ précipitation \ (mm)$$
$$\Delta t = intervalle \ de \ temps \ (s)$$

D'autre part, la quantité de pluie (en mm) peut s'écrire :

$$\Delta Q = \beta . N \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{4}{3} . \pi . R^3 \qquad \qquad N = nombre \ de \ gouttes \ (toutes \ de \ rayon \ R) \ par \ unité \ de \ surface \ et \ de \ temps \ (m^{-2} . s^{-1})$$

Ceci nous permet d'écrire l'expression de l'énergie cinétique cumulée (en J/m²) pour la durée d'une pluie (tp, en heures) : $\varepsilon_p = \int_0^{tp} N \cdot \varepsilon \cdot dt$

BEST donne la fraction F du poids cumulé des gouttes de diamètre inférieur ou égal à une valeur x :

$$F = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{A.I^{p}}\right)^{n}\right] \qquad \qquad x = diamètre \ de \ goutte \ (mm) \qquad A = 1.3 \\ I = intensité \ de \ la \ pluie \ (mm/h) \qquad P = 0.232 \\ N \approx 2.25, \ selon \ type \ de \ pluie$$



Des résultats de cette relation, nous tracons un graphique de rayon moyen des gouttes d'eau en fonction de l'intensité de la pluie, qui nous permet d'écrire une relation originale par un ajustement des points selon une loi de puissance (voir figures n°86 et 87).

Pour donner une valeur caractéristique de rayon de goutte d'eau en fonction de l'intensité de la pluie, nous avons estimé que le rayon le plus fréquent du spectre était plus adapté que le diamètre moyen. Le rayon le plus fréquent est la valeur pour laquelle la dérivée seconde de l'expression de

 $\frac{n.(n-1)}{(A.I^{p})^{n}}.x^{n-2} - \frac{n^{2}}{(A.I^{p})^{2.n}}.x^{2.n-2} = 0 \pm \gamma(\gamma) = \text{tolérance de}$ BEST s'annule, devant satisfaire

précision du calcul, choisie à la valeur de 10^{-9}). Nous déduisons :



Figure n°87: relation entre l'intensité de la pluie et le rayon des gouttes de pluie, obtenue à partir de la loi de BEST (1950)

$$y = 4,67916.10^{7}.x^{4,310345}$$

$$r^{2} = 1,0$$

Le modèle s'exprime :

 $I = b.R^{z} \text{ ou } R = \left(\frac{I}{b}\right)^{\frac{1}{z}} \qquad I = intensit\acute{e} \ de \ la \ pluie \ (m \ s^{-1}) \\ R = rayon \ moven \ des \ gouttes \ (m) \\ b = 4,679.10^{9} \ (m^{1-z}.h^{-1})$ z = 4,31 (sans unité)

Puisque
$$N = \frac{b}{\beta} R^{z-3}$$
 et $e^{(t)} = \frac{\alpha}{b^{\frac{4}{z}}} I^{\frac{4}{z}}$, vient enfin l'expression de l'énergie cinétique de la pluie :
 $e^{p} = \int_{0}^{p} \frac{\alpha}{\beta b^{\frac{1}{z}}} I^{1+\frac{1}{z}} dt$ soit $e^{p} = \int_{0}^{p} c I^{d} dt$ $I = intensité de la pluie (m/s)$
 $t = temps (s)$
 $a = 493439$ et $d = 1.232$

Etude de l'énergie cinétique

La figure n°88 montre les résultats de notre modèle (utilisant le modèle de pluies instantanées), comparés à ceux de WISHMEIER (avec les pluies horaires en intensité constante) que nous prenons pour référence *a priori* compte tenu de son large emploi dans la bibliographie.



Notre modèle restitue des valeurs d'énergie cinétique un peu plus fortes que les formules empiriques classiques (facteur d'environ 1.2 par rapport au modèle de WISHMEIER), et constitue donc *a priori* une estimation haute. Nous verrons que cela ne porte pas à conséquence pour notre travail.

La figure n°89 montre que le modèle de pluies horaires gaussiennes (durée effective 0.55h) restitue en moyenne très bien les valeurs d'énergie cinétique calculées avec le modèle de pluies instantanées. L'écart des valeurs horaires d'énergie cinétique est faible (de l'ordre de 20% au maximum) avec toutefois quelques valeurs d'énergie plus fortes pour les pluies instantanées. Nous ne représentons pas les points correspondant au modèle de pluie constante (durée effective 0.39h), les résultats étant très proches de ceux utilisant la répartition gaussienne.



Figure $n^{\circ}89$: comparaison des valeurs horaires et journalières d'énergie cinétique calculées pour deux modèles de pluies entre le 01/10/98 et le 31/12/00: pluies instantanées et pluies gaussiennes (durée horaire effective = 0.55h)

(la ligne en traits continus est la droite de régression des points ; les lignes pointillées indiquent l'écart de 20%)

- Impact du couvert végétal

Nous supposons que l'énergie des gouttes de pluie qui touchent une structure végétale (culture sur pied mais aussi débris de récolte) est entièrement absorbée par celles-ci. Cette hypothèse est admise par la plupart des auteurs. L'énergie à la surface du sol, ε_{ps} , en fonction de l'énergie de la pluie incidente au-dessus de la végétation, ε_{p} , s'écrit donc :

 $\varepsilon_{ps} = \varepsilon_p \exp(-K.LAI)$ (formule expliquée dans le paragraphe I-1-b-1).



Figure n°90: valeur journalière du rapport entre l'énergie cinétique des pluies et la hauteur de précipitation sur la période du 01/10/98-31/12/00

La figure n°90 illustre l'évolution saisonnière de l'agressivité des pluies au cours d'une succession de culture de maïs et de labour d'hiver. Nous voyons que le rapport entre l'énergie et la hauteur de pluie traduit une plus grande agressivité des pluies en été, mais le couvert végétal engendre néanmoins une très importante baisse de l'énergie des pluies à la surface du sol. Il est donc évident que la présence du couvert végétal aura un rôle essentiel dans la dynamique de la battance, et il conviendra d'étudier les différentes combinaisons de cultures (incluant un état donné

de la surface du sol) et de climat (saison de culture), en particulier avec l'intervention d'une culture d'hiver.

- Conclusions

Notre modèle est une expression originale du calcul de l'énergie cinétique des pluies, simplifiée mais néanmoins basée sur des éléments robustes. Ce modèle est critiquable essentiellement par la nature empirique des coefficients du spectre de distribution des gouttes de pluie (SAINT-JEAN, communication personnelle), et par l'assimilation d'une pluie à un ensemble de gouttes de diamètre moyen homogène pour résoudre le système d'équations. Les coefficients du spectre seraient très variables selon les zones géographiques (HUDSON, 1965, cité par BABAU, 1987) même si ROSEWELL (1986) tempère largement cette donnée. Le modèle de BEST - parmi d'autres - est apparu biaisé également pour les fortes et faibles valeurs d'intensité de pluie, mais cela contribuerait peu au calcul de l'énergie de la pluie (SAINT-JEAN, communication personnelle). Nous n'avons pas directement estimé les conséquences de ces éléments sur nos modèles.

Le changement climatique est susceptible d'introduire des modifications dans les caractéristiques des pluies, que le choix d'un modèle suffisamment explicite tel que le nôtre pourrait permettre d'intégrer assez facilement.

5) Conclusions

Nous avons présenté un modèle simple permettant de donner aux pluies une allure fidèle à la réalité à partir de mesures des instants de basculement d'auget. Les modèles de captation et d'infiltration / ruissellement apparaissent peu sensibles à sa paramétrisation, ce qui en fait un modèle fiable. En nous basant sur les résultats de ce modèle, nous avons également pu ajuster le modèle de pluie horaire (forme de Gauss retenue), impliquant néanmoins un calage pour nos propres conditions d'étude (climat, sol, modèles). Une étude supplémentaire est encore nécessaire pour augmenter la généralisation du modèle de pluie horaire, pour laquelle nous avons fourni des éléments. Nos résultats constituent néanmoins un apport intéressant dans l'utilisation des données météorologiques horaires pour la modélisation des processus dynamiques rapides tels que le ruissellement.

L'étude de la modélisation des pluies horaires pourrait encore faire l'objet de certains développements. Les deux modèles simplifiés de pluies proposés (intensité gaussienne ou constante), ainsi que les paramètres de durée effective de la pluie sur 1 heure, devraient pouvoir être adaptés à chaque type de temps particulier. Nous imaginons par exemple qu'une averse suivra vraisemblablement un modèle gaussien de durée effective très largement inférieure à l'heure, au contraire des pluies de type hivernal qui pourront s'étaler sur plusieurs heures de durée et peut-être selon une intensité plutôt constante. La question sera alors de trouver des critères pertinents de recherche des types de temps à partir des données météorologiques. Egalement, concernant la forme des courbes d'intensité de pluie, nous avons choisi *a priori* une courbe gaussienne pour décrire les fortes pluies, mais d'autres modèles pourraient peut-être donner des résultats encore meilleurs. En particulier, il semblerait qu'en région parisienne le pic d'intensité ne soit pas centré - tel que nous l'avons choisi - mais plutôt placé au début d'une averse (BRESSON, communication personnelle ; GRISOLLET, 1948) ; ceci constituera par ailleurs un nouveau paramètre de calage, car il semble qu'il en advienne différemment en d'autres zones géographiques.

Nous suggérons également d'élargir encore nos études, avec l'utilisation de pluviomètres de 0.1-0.2mm de capacité d'auget, et la réalisation de calculs statistiques des durées effectives de pluies horaires pour des conditions plus variées de sol, végétation et climat. Il conviendrait aussi d'estimer dans quelle mesure le changement climatique global est susceptible de modifier l'ensemble des paramètres estimés.

Puisque les mesures horaires constituent les mesures les plus fines de l'essentiel des stations de mesure, nos résultats pourraient permettre des études très larges et précises sur le ruissellement en particulier.

Il serait également intéressant d'étendre nos travaux à l'utilisation des données pluviométriques trihoraires, qui constituent une autre part importante des bases de données des mesures météorologiques.

Par ailleurs, nous avons également développé un modèle simple et original de calcul de l'énergie cinétique des pluies, utilisant des données empiriques classiques de la bibliographie, que nous utiliserons pour modéliser l'évolution de la rugosité et de la croûte de battance.

III) Paramétrisation du modèle de captation - tests de sensibilité

Nous avons montré précédemment l'équation et les bases du processus de captation. Nous précisons ici certains paramètres du modèle de captation non encore déterminés, notamment pour restituer la dynamique de la parcelle cultivée, et évaluons la sensibilité de la captation aux variables et paramètres principaux. Les résultats de la captation intégrée au bilan hydrique seront analysés dans le chapitre V.

Nous ne reviendrons pas sur la description précise du programme de captation et sur le schéma de couplage au modèle BILHYNA, pour lesquels nous pourrons nous reporter respectivement à l'organigramme présenté en annexe (n°14) et à la figure n°12 du chapitre I (et commentaires dans le texte).

a) Choix des paramètres du modèle de captation

Les paramètres du modèle de captation sont peu nombreux : capacité de saturation du couvert, répartition de l'évaporation journalière et de la transpiration journalière, distribution de la pluie, valeur du pas de temps des calculs. Nous avons calibré par nos mesures l'évolution du paramètre de capacité de captation du couvert de maïs en fonction du LAI. Nous avons vu également que nous répartissions l'évaporation journalière et la transpiration journalière en intensité constante sur la durée du jour calculée par BILHYNA, et décrit la restitution de l'intensité de la pluie à partir des mesures des pluviomètres.

Nous avons estimé que le pas de temps des calculs était suffisamment précis avec la valeur de 0.01h, les résultats de captation étant identiques avec le choix de 0.001h et moins. Par ailleurs, nous verrons que nous utiliserons cette même valeur pour les calculs d'infiltration / ruissellement.

Sur parcelle cultivée, les différents stades du couvert végétal (évolution du LAI, sénescence, débris de moisson) doivent être pris en compte dans le calcul de la captation. Or, il est évident que toute la pluie n'atteint pas les structures végétales, puisque le couvert végétal présente un certain coefficient de trouée. Seule la part de la pluie qui n'atteint pas directement le sol doit être utilisée pour les calculs de captation. La pluie (« P », en mm) utilisée pour la captation est ainsi la suivante :

 $P = P_i . [1 - \exp(-K.LAI)]$ Pi = pluie incidente (mm) K = coefficient d'extinction LAI = indice de surface foliaire (m²/m²)

Nous utilisons pour K, la valeur présentée précédemment pour le maïs (paragraphe I-2-b2). La modélisation de l'interception de l'eau de pluie par les couverts peu couvrants, tels qu'une culture en début de croissance, semble problématique (voir notamment VAN DIJK et BRUIJNZEEL, 2001a, 2001b). Le modèle de MERRIAM n'a semble-t'il pas été directement validé sur des couverts végétaux peu couvrants, et un biais est possible dans cette situation. Des expérimentations semblent nécessaires pour étudier ce point en détail.

La captation sur le couvert sénescent est strictement calculée selon le modèle habituel. Nous n'avons pas mesuré toutefois le paramètre de capacité de saturation du couvert sénescent et employons donc le même que pour le couvert entièrement vert. La valeur du LAI, de même que les propriétés de captation des surfaces aériennes, sont néanmoins affectées par la sénescence, et ceci a une incidence à la fois sur la capacité de captation du couvert et sur le taux de recouvrement du sol

par la végétation (paramètre de coefficient d'extinction du couvert). A titre prospectif, il faudra en toute rigueur analyser précisément ces deux points et leurs conséquences sur la captation.

b) Tests de sensibilité du modèle de captation

Nous appréhendons dans ce paragraphe la sensibilité du modèle de captation à différents paramètres essentiels, pour la végétation de maïs.

La figure n°91 illustre l'évolution du stock d'eau captée dans le temps, au cours d'une pluie constante de 10mm/h et pour une évaporation nulle. L'impact du coefficient d'extinction y est également figuré. Nous constatons une augmentation forte du stock d'eau captée en début de pluie, puis l'atteinte d'une asymptote («Cmax », stock maximal). La cinétique du processus indique qu'en présence de petites pluies le stock d'eau captée n'atteindra pas la valeur maximale. Egalement, l'atteinte du stock maximal se montre d'autant plus rapide que le LAI est faible. La captation apparaît surtout en premier lieu extrêmement sensible à la valeur du LAI.



Figure n°91 : évolution dans le temps du stock d'eau captée par un couvert de maïs, en fonction de la valeur du coefficient d'atténuation (K) lors d'une pluie de 10 mm/h, pour différentes valeurs de LAI (en m^2/m^2)

Le coefficient d'extinction a également un impact sur le processus, ce qui confirme l'importance de le déterminer de manière précise. L'inclinaison de chute de la pluie sous l'effet du vent aura donc une importance, qu'il conviendrait d'estimer.



Figure $n^{\circ}92$: évolution dans le temps de la captation (quantité d'eau captée et évaporée) par un couvert de maïs (LAI = 3.5) lors d'une pluie constante de 10 mm/h, pour différentes intensités d'évaporation potentielle

La figure n°92 montre que la valeur de l'évaporation potentielle durant une pluie possède une importance considérable sur la valeur de la quantité d'eau de pluie captée. L'exemple donné utilise une pluie forte (10mm/h) sur un couvert de maïs bien développé (LAI = 3.5 m²/m²). La figure n°93 montre quant à elle le poids de la valeur de l'évaporation potentielle sur l'évolution temporelle de la valeur du stock d'eau captée, et sur le temps de mouillage du couvert. Nous voyons que l'évaporation empêche l'atteinte de la valeur maximale du stock d'eau. D'après nos calculs également, une valeur d'évaporation potentielle de 0.42mm/h (5mm/j pour une journée de 12h) suffit à sécher les surfaces végétales en moins de 2.5h, tandis que le stock d'eau subsiste plus de 8h

sous une évaporation potentielle de 0.08mm/h (1mm/j). La valeur de l'évaporation potentielle durant une pluie a ainsi également un poids fort sur la durée de mouillage, ayant elle-même un impact direct sur la transpiration du couvert.



Figure $n^{\circ}93$: évolution du stock d'eau captée par un couvert de maïs (LAI = 3.5) durant et après une pluie constante de 10mm/h, pour différentes valeurs d'évaporation potentielle journalière

Nous savons que l'intensité et la durée précises des pluies sont particulièrement difficiles à retraduire à partir de mesures horaires, et nous commettrons inévitablement une erreur sur ces deux paramètres. Nous allons ainsi regarder l'impact des différents modèles de pluie que nous avons développés.

Tout d'abord, pour l'étude des résultats de captation face aux paramètres pluviométriques des différents modèles de pluie proposés, nous nous reporterons au paragraphe précédent (II).



Figure n°94 : évolution dans le temps de la quantité d'eau de pluie captée et évaporée par un couvert de maïs (LAI = $3.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$, EP = 5mm/j) pour différentes hauteurs de pluie (durée 1h) distribuée selon deux modèles

De manière plus détaillée, la figure n°94 montre la quantité d'eau captée et évaporée par un couvert de maïs mature (LAI = $3.5m^2/m^2$), pendant une pluie donnée de 1h de durée et sous une évaporation potentielle d'intensité moyenne (0.42mm/h soit de l'ordre de 5mm/j), selon que la pluie est répartie en une forme constante ou bien gaussienne. Nous voyons que l'allure de la courbe de captation cumulée est très sensible au modèle de pluie, mais que la valeur finale de captation en est relativement indépendante. L'écart de captation entre les deux modèles de pluie se dessine seulement à la fin de la pluie, avec une captation très légèrement plus importante pour la pluie constante que pour le modèle gaussien.

Une étude plus large (figure n°95) montre que les deux modèles de pluie donnent des résultats de captation qui divergent légèrement avec l'augmentation du taux de l'évaporation potentielle, sans marquer toutefois de différences importantes.

Nous retiendrons que la captation est peu sensible aux paramètres pluviométriques comme au modèle de pluie.



Figure n°95 : quantité d'eau stockée et évaporée par un couvert de maïs (LAI 3.5m²/m²) à l'issue d'une pluie de 1h de durée, en fonction de sa hauteur et selon deux modèles de distribution

c) Bilan

Les résultats de sensibilité montrent que le modèle de captation est extrêmement sensible à la valeur du LAI et au taux de l'évaporation potentielle, relativement sensible au coefficient d'extinction, et peu sensible aux modèles de pluie. La relation entre capacité de saturation et LAI est donc primordiale. Dans le présent travail, un certain nombre de simplifications pourront donc avoir un poids sur les résultats de captation, et ces simplifications gagneront à être améliorées par des études ultérieures : taux constants de l'évaporation potentielle et de la transpiration du couvert à l'échelle de la journée, pluie tombant strictement verticalement, négligence de l'impact du recouvrement des feuilles entre pieds voisins pour calculer la capacité de saturation du couvert, non différenciation des caractéristiques de captation des parties sénescentes du couvert. Le cas des couverts peu couvrants devrait également être précisé. Un ensemble de mesures directes devrait permettre d'étudier efficacement ces différents points.

IV) Conclusions

Nous avons présenté dans le présent chapitre la détermination des variables et paramètres des modèles de bilan hydrique BILHYNA, de pluie et de captation, avec des études de sensibilité. Nous avons surtout développé certains points qui nous paraissaient les plus essentiels dans le cadre de notre travail : l'humidité à la capacité au champ, l'évolution du couvert végétal et de ses caractéristiques, et la pluie. Nous avons ainsi proposé notamment des modèles simples traduisant l'impact de la sénescence sur la transpiration du couvert, et la restitution des variations temporelles de l'intensité de la pluie à partir des mesures.

Nous étudierons dans le chapitre V l'impact des différents points abordés sur les résultats du bilan hydrique.