



Unité de recherche Milieux Aquatiques,
Ecologie et Pollutions. Lyon

Guide de dimensionnement des zones tampons enherbées ou boisées pour réduire la contamination des cours d'eau par les produits phytosanitaires



Nadia Carluer
Alexandra Fontaine
Claire Lauvernet
Rafaël Munoz-Carpena

Août 2011

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	5
1.1. Contexte	5
1.2. Objectifs du guide	5
1.3. Destinataires	6
1.4. Structure du guide	6
2. PRODUITS PHYTOSANITAIRES ET ZONES TAMPONS : RAPPELS.....	7
2.1. Le transfert des produits phytosanitaires.....	7
2.2. Les zones tampons et leur rôle	8
2.3. Efficacité des zones tampons	10
2.4. Positionnement des zones tampons.....	12
2.5. Dimensionnement des zones tampons	13
3. METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT	13
3.1. Hypothèses majeures	14
3.2. Modèle utilisé.....	14
3.3. Démarche à suivre.....	15
4. ACQUISITION DES DONNEES ET PARAMETRES D'ENTREE	18
4.1. Surface contributive.....	18
4.1.1. Dimensions et pente de la surface contributive.....	19
4.1.2. Occupation des sols et périodes de traitement	24
4.1.3. Sols de la surface contributive	24
4.1.3.1. Conductivité hydraulique à saturation	24
4.1.3.2. Profondeur eventuelle de la couche imperméable	28
4.1.3.3. Profondeur De la nappe.....	28
4.1.4. Potentiel de génération du ruissellement.....	29
4.1.4.1. La théorie du Curve Number.....	29
4.1.4.2. La détermination du Curve Number	33
4.1.5. Evènement pluvieux.....	35
4.1.6. Ruissellement sortant de la surface contributive.....	39
4.2. Zone Tampon enherbée ou boisée	43
4.2.1. Longueur et pente de la zone tampon	43
4.2.2. Propriétés d'infiltration du sol de la zone tampon	44
4.2.2.1. Présence d'une nappe superficielle	44

4.2.2.2. Conductivité hydraulique à saturation	44
4.2.2.3. Teneur en eau à saturation.....	47
4.2.2.4. Teneur en eau initiale	48
4.2.2.5. Succion moyenne au front d'humidité	49
4.2.2.6. Caractéristiques hydrodynamiques des horizons de sol.....	50
5. DIMENSIONNEMENT DE LA ZONE TAMPON.....	56
5.1. Modélisation.	56
5.1.1. Création d'un projet	56
5.1.1.1. Renseignement des « Propriétés du ruissellement de surface ».....	57
5.1.1.2. Renseignement des « Propriétés d'infiltration du sol »	59
5.1.1.3. Renseignement des « Propriétés de la couverture végétale »	61
5.1.1.4. Renseignement des « Caractéristiques des sédiments transportés »	62
5.1.1.5. Renseignement du « Hyetogramme de pluie »	62
5.1.1.6. Renseignement de l' « Hydrogramme de ruissellement »	63
5.1.2. Modification d'un projet	64
5.2. Dimensionnement de la zone tampon. Optimisation	65
Exploitation des résultats	66
6. CONCLUSION.....	68
GLOSSAIRE.....	69
REFERENCES.....	70
ANNEXE A. LE MODELE NUMERIQUE VFSSMOD.....	72
Equations utilisées.....	72
Paramètres d'entrée.....	73
Sensibilité des paramètres	75
Scénarios	75
Etude de sensibilité	78
Résultats	79
ANNEXE B. LA METHODE DU SCS-CN (SOIL CONSERVATION SERVICE - CURVE NUMBER).....	80
ANNEXE C. LE PROGRAMME IGCS (INVENTAIRE GESTION ET CONSERVATION DES SOLS).....	83
La base de données DONESOL.....	83
La base de données des analyses de terres (BDAT)	83
ANNEXE D. METHODES DE DETERMINATION DE LA TEXTURE D'UN SOL	84
ANNEXE E. LE PROGRAMME HYETOHYDRO	88
Construction des hyétogrammes de pluie	89
Construction des hydrogrammes de ruissellement.....	91
Etape 1 : Construction du hyetogramme de pluie nette	92

Etape 2 : Construction de l'hydrogramme unitaire	92
Etape 3 : Construction de l'hydrogramme total	93

**ANNEXE F. UTILISATION DU MODULE HYDROGRAMME UNITAIRE (HU) DANS
VFSSMOD..... 95**

**ANNEXE G. UTILISATION DU MODULE « HYDROGRAMME UNITAIRE » (HU) DANS
LA « DESIGN ANALYSIS » 97**

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

Les produits phytosanitaires sont utilisés depuis quelques décennies en France pour protéger les cultures des maladies et augmenter le rendement agricole. Cependant, ils sont incriminés dans la contamination des eaux de surface : pour répondre aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau, qui requiert l'atteinte du bon état écologique des masses d'eau d'ici 2015, il est nécessaire de gérer cette source de contamination. La limitation du transfert des pesticides entre la parcelle agricole et le réseau hydrographique peut s'avérer une solution complémentaire intéressante, en parallèle à une occupation du sol diversifiée et des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.

Les zones tampons enherbées ou boisées peuvent dans ce contexte être un moyen efficace pour limiter la contamination des eaux de surface en pesticides. Elles protègent les cours d'eau de la dérive des produits appliqués sur les cultures, mais peuvent également limiter le transfert des pesticides dans le ruissellement de surface, depuis la parcelle agricole jusqu'à la rivière. Outre leur fonction de protection de la qualité de l'eau, elles sont également susceptibles de préserver ou restaurer la biodiversité (CORPEN 2007)¹ et suscitent donc un intérêt croissant.

L'efficacité d'une zone tampon pour retenir les pesticides varie selon sa localisation et ses dimensions. A ce jour, le guide de diagnostic à l'échelle du petit bassin versant (Gril, Le Hénaff et al. 2010)² permet de positionner au mieux ces structures, et des recommandations sont fournies par l'USDA-NRCS (USDA 2000) ainsi que le CORPEN (2007) pour déterminer la largeur requise par les dispositifs enherbés ou boisés pour réduire de manière significative le transfert des pesticides. Toutefois, la largeur préconisée actuellement dépend uniquement de la longueur du versant intercepté, et n'est donc pas toujours adaptée. L'efficacité d'une zone tampon dépend en effet également des caractéristiques propres du site sur lequel elle est implantée : le type de sol, la présence ou non d'une nappe superficielle, la pente, le climat local, les conditions d'humidité initiales et le ruissellement entrant, lié aux caractéristiques des parcelles amont. A titre d'exemple, à largeur égale, une bande enherbée ou boisée située à l'aval d'un versant de 200 mètres de long n'aura pas la même efficacité si elle est située sur un sol limoneux hydromorphe ou sur un sol sableux sec. **Il est ainsi nécessaire de tenir compte des caractéristiques propres du site d'implantation de la zone tampon lors de son dimensionnement et cette étude doit être réalisée au cas par cas.**

1.2. Objectifs du guide

Ce guide a pour but de proposer une méthode simple de dimensionnement des zones tampons selon leur localisation et les caractéristiques du milieu environnant. Compte tenu de la complexité des processus affectant le fonctionnement de ces dispositifs, l'utilisation d'un modèle numérique de bande enherbée s'avère nécessaire et judicieux. VFSMOD, acronyme du nom anglais Vegetative Filter Strip Modeling system, est un modèle qui a été créé au Etats-Unis (Muñoz-Carpena, Miller et al. 1993) et validé en de nombreux sites. Il simule à l'échelle locale les processus hydrologiques ainsi que les transferts de sédiments et de pesticides (Sabbagh, Fox et al. 2009) au sein d'une zone tampon située à l'aval de cultures, pour un événement pluvieux ponctuel. La méthode ici proposée repose sur l'utilisation de ce modèle. Elle guide l'utilisateur dans la construction de scénarios visant à caractériser le ruissellement entrant et la zone tampon qui alimentent le modèle, dans le cas précis qui l'intéresse : **les paramètres** alimentant le modèle doivent en effet être **représentatifs du site d'étude**, et permettre de représenter des **événements de ruissellement « type » advenant dans la zone d'étude considérée**. La largeur optimale de la bande est alors déterminée en fonction des conditions renseignées.

¹ Ce guide est disponible en ligne sur <http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/Pollutions-diffuses/les-travaux-sur-les-zones-tampons>

² Ce guide est disponible en ligne sur <http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/Pollutions-diffuses/les-travaux-sur-les-zones-tampons>

⇒ Le présent guide fournit l'ensemble des outils et données nécessaires à la détermination des paramètres d'entrée du modèle et accompagne l'utilisateur dans les différentes phases d'utilisation du modèle et d'exploitation des résultats.

Un glossaire, situé à la fin de ce guide, définit les termes suivis d'une astérisque *

1.3. Destinataires

Ce guide s'adresse aux services de l'état, collectivités territoriales ou encore bureaux d'études qui seront amenés à participer à l'installation de zones tampons pour protéger les eaux de surface de la contamination en produits phytosanitaires, dans le cadre de la définition et la mise en place de plans d'action.

1.4. Structure du guide

Dans un premier temps, un rappel sur les transferts hydriques des produits phytosanitaires, la mise en place des zones tampons pour les limiter, ainsi que les facteurs influençant l'efficacité de ces dernières sera effectué (Partie **II**).

Dans un second temps, la méthodologie de dimensionnement proposée sera exposée (partie **III**) et des indications seront fournies à l'utilisateur pour acquérir les données nécessaires à la modélisation de son cas d'étude (Partie **IV**).

Enfin, une aide sera fournie pour exploiter les résultats du modèle et aboutir à un choix de largeur optimale pour la zone tampon à implanter (Partie **V**). En plus de ces informations, un certain nombre d'annexes serviront de support à ce guide et fourniront des explications supplémentaires, utiles à la bonne compréhension des processus impliqués.

Important : Il convient de rappeler que l'utilisation de ce guide de dimensionnement n'intervient qu'en seconde étape, lorsque la position de la zone tampon a d'ores et déjà été établie suite au diagnostic du bassin versant.

Si toutefois la mise en oeuvre de la démarche présentée ici aboutit à des dimensions trop importantes pour une bande enherbée donnée, on pourra reconsidérer ce positionnement, par exemple en complétant le dispositif par des bandes de moindres dimensions implantées plus en amont sur le versant, voire à l'intérieur des parcelles.

2. PRODUITS PHYTOSANITAIRES ET ZONES TAMPONS : RAPPELS

2.1. Le transfert des produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires désignent l'ensemble des produits chimiques utilisés pour lutter contre les parasites animaux et végétaux. Les plus communs sont les herbicides, utilisés pour traiter les mauvaises herbes, les insecticides, utilisés pour lutter contre les insectes, et les fongicides, utilisés pour lutter contre les champignons. La période d'application des produits phytosanitaires varie en fonction du type de culture (culture d'hiver ou d'été), de la date de semis de cette culture (qui varie selon les régions) et de l'organisme cible. Le traitement peut avoir lieu en pré-levée (Figure 1) ou post-levée (Figure 2) (Domange 2004; Tortrat 2005).



Figure 1. Traitement pré-levée³.



Figure 2. Traitement post-levée⁴.

Dans le cadre de l'implantation de zones tampons, nous nous intéressons principalement aux pollutions d'origine diffuse où les produits phytosanitaires transitent depuis l'ensemble du territoire traité jusqu'aux masses d'eau. Le risque de transfert des produits phytosanitaires est maximal après la période d'application et diminue au fur et à mesure du temps et des événements pluvieux (CORPEN, 2007). Les pesticides peuvent être adsorbés par les plantes ou dégradés à une vitesse qui dépend de la demi-vie de la molécule et des conditions environnementales (météorologiques notamment). Lors d'une pluie, les produits présents à la surface du sol ou des cultures peuvent être lessivés et s'infiltrer dans le sol jusqu'aux eaux souterraines, ou être transportés dans les écoulements hypodermiques ou le ruissellement de surface jusqu'aux cours d'eau (Louchart 1999; Domange 2004). Les zones tampons étant efficaces pour le ruissellement de surface, nous nous focaliserons sur ce mécanisme de transfert particulier dans la suite de cette brochure.

Il existe deux formes de ruissellement de surface : le **ruissellement hortonien** et le **ruissellement par saturation** (Figure 3) (CORPEN, 2007). Le premier apparaît lorsque l'intensité pluvieuse dépasse la capacité d'infiltration du sol, le second apparaît lorsque la pluie atteint une zone saturée où elle ne peut s'infiltrer (cas des nappes superficielles qui affleurent à la surface du sol). Ces deux types de ruissellement peuvent survenir dans la parcelle agricole ainsi que dans la zone tampon, et il est important de considérer l'ensemble des facteurs qui les contrôlent lors du dimensionnement de cette dernière.

³ Syndicat agricole (2009), Un désherbage réussi associe efficacité et sélectivité, disponible à l'adresse suivante : <http://www.syndicat-agricole.com/actualites/vie-pratique-lin-un-desherbage-reussi-associe-efficacite-et-selectivite&fldSearch=:O1X0XLEI.html> (consulté le 30 septembre 2010).

⁴ Conservatoire de l'eau en Bretagne (2009), Les transferts de pesticides vers les eaux, disponible à l'adresse suivante : <http://www.eaubretagne.fr/Pollutions-et-menaces/Les-polluants/Les-pesticides/Les-transferts-de-pesticides-vers-les-eaux> (consulté le 30 septembre 2010).

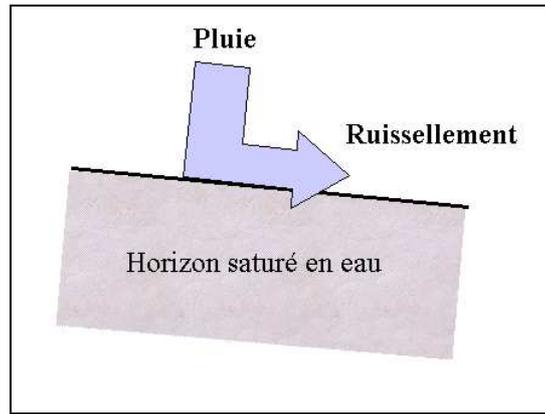
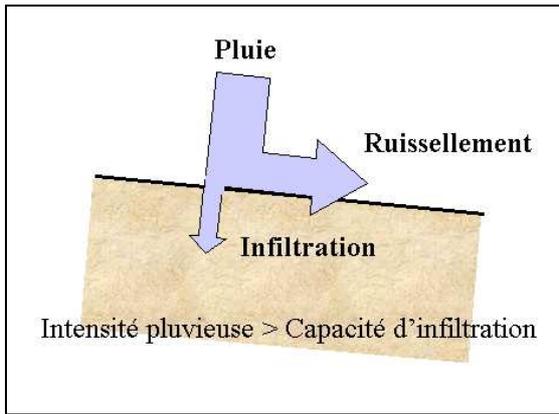


Figure 3. Genèse du ruissellement hortonien (à gauche) et du ruissellement par saturation (à droite).

Le ruissellement de surface est fonction du site étudié, et notamment du climat, du type de sol, de la couverture végétale, ainsi que des pratiques agricoles. En France, les pesticides sont transportés principalement sous forme dissoute (Lecomte 1999). Certaines molécules à K_{oc}^{5*} élevé (coefficient de partage carbone organique-eau) peuvent toutefois également être transportées sous forme adsorbée, à la surface des sédiments, de façon significative (CORPEN 2007; Alletto, Coquet et al. 2010). Dans la partie amont du versant, le ruissellement est plutôt diffus et se concentre progressivement vers l'aval (Figure 4 et Figure 5). Le principal élément régissant ce phénomène de concentration est la topographie, mais les pratiques agricoles et l'aménagement paysager peuvent influencer sur cette organisation (CORPEN, 2007).

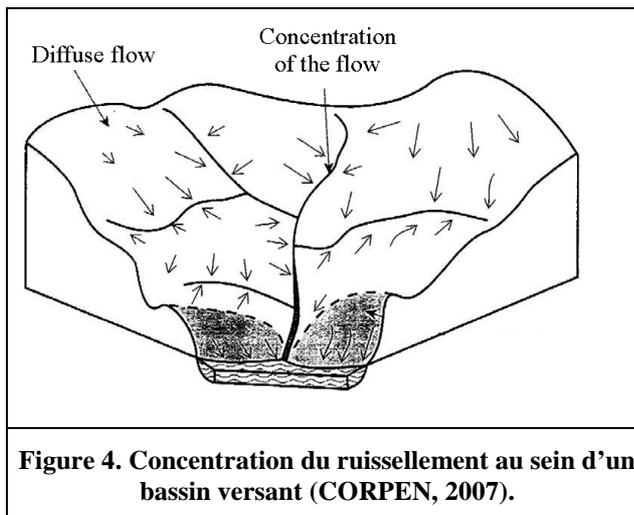


Figure 4. Concentration du ruissellement au sein d'un bassin versant (CORPEN, 2007).



Figure 5. Ruissellement concentré dans un talweg (CORPEN, 2007).

2.2. Les zones tampons et leur rôle

De manière à limiter le transfert des pesticides dans le ruissellement de surface, les autorités sollicitent de plus en plus l'installation de zones tampons entre les parcelles agricoles et le réseau hydrographique. Le CORPEN définit une **zone tampon** comme **toute surface végétalisée « maintenue ou mise en place expressément, susceptible d'intercepter des écoulements de surface diffus ou concentrés »** et donc de réduire le transfert de polluants et/ou de sédiments. Il peut s'agir de bandes enherbées, de prairies permanentes, de friches, de chemins enherbés, de talus ou de haies, de bois ou bosquets, de ripisylves, de parcelles agricoles non traitées et à couverture végétale significative, mais aussi de zones humides artificielles (Figure 6).

⁵ Certains termes techniques suivis d'une astérisque * sont définis dans le GLOSSAIRE

Ce guide concerne les zones tampons enherbées ou boisées ; les indications qu'ils fournissent peuvent toutefois être appliquées aux autres types de zones tampons végétalisées « sèches », les zones humides et les talus obéissant à d'autres processus.

Attention : Ne sont concernés dans cette brochure que les dispositifs enherbés et boisés et non les zones tampons humides qui présentent un tout autre type de fonctionnement.



Bande enherbée doublée d'une zone boisée



Haies en bordure de parcelles



Prairie



Ripisylve



Chemin enherbé



Talus arboré

Figure 6 : Quelques types de zones tampons.(CORPEN 2007)

Les zones tampons sont à même de réduire le transfert des pesticides dans le ruissellement via trois principaux mécanismes (Figure 7) :

Premièrement, la capacité d'infiltration de ces dispositifs est plus importante que celle des parcelles agricoles (Krutz, Senseman et al. 2005). La perméabilité du sol de la zone tampon se voit en effet augmentée grâce à son système racinaire dense et aux activités de la micro-faune qui contribuent à la formation de chemins d'écoulement rapides de l'eau (Lacas, Voltz et al. 2005). Pour un même type de sol, la conductivité hydraulique à saturation dans la zone tampon est supérieure à celle observée dans la parcelle agricole (si la bande enherbée est en place depuis quelques années).

Deuxièmement, la végétation de la zone tampon augmente la rugosité hydraulique et y réduit ainsi la vitesse du ruissellement (CORPEN, 2007). Ceci favorise l'infiltration de l'eau et des pesticides dissous dans le sol ainsi que la sédimentation des particules à l'amont de la zone tampon (Krutz et al., 2005).

Enfin, la capacité d'adsorption de ces dispositifs est accrue par la forte teneur en matière organique du sol comparé à celui de la parcelle agricole (Lacas et al., 2005).

Naturellement, plus la distance parcourue par le ruissellement dans la zone tampon est importante, plus les potentiels d'infiltration et d'adsorption sont élevés. Les produits phytosanitaires piégés sont ensuite dégradés suivant des mécanismes qui ne font pas l'objet de cette étude. Notons toutefois qu'aucune accumulation de produit phytosanitaire dans les sols de bande enherbée n'a été mise en évidence jusqu'à présent.

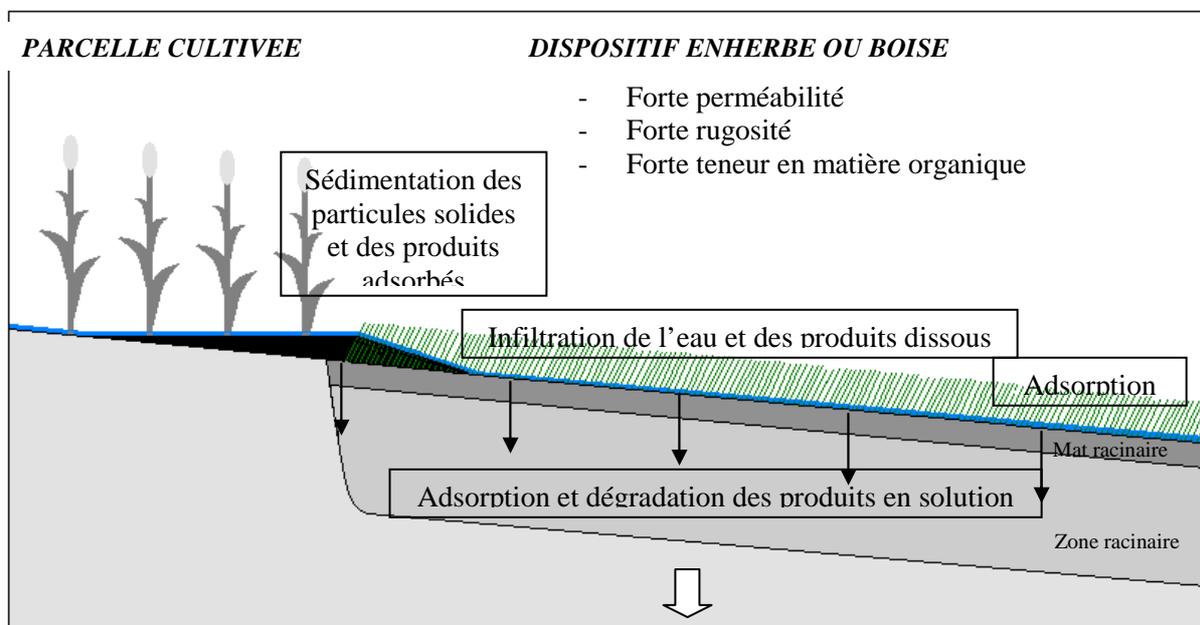


Figure 7. Processus d'interception des produits phytosanitaires par les dispositifs enherbés ou boisés. (Lacas, Voltz et al. 2005)

2.3. Efficacité des zones tampons

Les zones tampons ont un potentiel d'interception des produits phytosanitaires qui peut varier d'un site à l'autre et au cours de l'année. D'après les expérimentations menées en France, les bandes enherbées retiennent généralement plus de 50 %, voire 90 % des pesticides, selon les conditions du milieu. Cette efficacité dépend de nombreux facteurs, incluant le type de sol, la molécule étudiée, les dimensions de la zone tampon, le climat local ou encore les conditions d'humidité. En cas de conditions défavorables, l'efficacité des zones tampons peut considérablement diminuer (CORPEN 2007).

Le principal facteur déterminant le potentiel d'interception des produits phytosanitaires d'une zone tampon est sa capacité d'infiltration. Les molécules étant principalement transportées sous forme dissoute (Alletto, Coquet et al. 2010), le taux de rétention des pesticides sera fortement lié au taux d'abattement de la lame de ruissellement. Dans le cas de molécules à fort Koc qui peuvent être transportées sous forme adsorbée en plus d'être transportées sous forme dissoute, le taux de sédimentation pourra également contribuer à l'abattement des pesticides.

La capacité d'infiltration du ruissellement de la zone tampon est fonction de plusieurs paramètres :

➤ **Le type de sol**

La perméabilité du sol varie en fonction de sa texture. De manière générale, les sols à texture grossière (sable par exemple) ont une conductivité hydraulique à saturation supérieure à celle des sols à texture fine (limons et argiles par exemple) (USDA-NRCS, 2000). De ce fait, la capacité d'infiltration d'une zone tampon située sur un sol à texture grossière sera plus importante que celle d'une zone tampon située sur un sol à texture fine.

➤ **L'état structural du sol**

En plus de la texture, la structure du sol influe également sur sa perméabilité.

Premièrement, certains sols à texture fine, tels que les limons, peuvent être sujets à des phénomènes de battance. Ceci correspond à une désagrégation de la structure du sol en surface et au colmatage de la porosité de sa partie superficielle sous l'effet de l'intensité pluvieuse (Figure 8). La formation d'une croûte de battance réduit la perméabilité du sol, diminuant alors sa capacité d'infiltration (Lecomte, Barriuso et al. 2000). Au sein d'une zone tampon, la végétation protège généralement le sol des fortes intensités pluvieuses mais les phénomènes de battance peuvent s'observer dans les parcelles agricoles en amont, lieu de genèse du ruissellement entrant dans la zone tampon.

Deuxièmement, le tassement du sol peut également constituer un frein à l'infiltration de l'eau. Il n'est pas rare que les agriculteurs utilisent des chemins enherbés comme zone de passage pour les engins agricoles et la compaction du sol qui en résulte diminue significativement sa perméabilité (Figure 9). A contrario, l'activité de la microfaune et le développement d'un « mat » racinaire peuvent augmenter très significativement la perméabilité dans les premiers centimètres.



Figure 8 : Sol battant (CORPEN, 2007)



Figure 9 : Enherbement d'un chemin rendu inefficace par le passage des engins (CORPEN, 2007).

➤ **Les conditions d'humidité initiales du sol**

Les conditions d'humidité initiales du sol influent fortement sur la capacité d'infiltration de ce dernier. Si le sol est humide, la porosité disponible est inférieure à celle du sol sec et le volume d'eau pouvant s'infiltrer est donc moins important. (Souiller, Coquet et al. 2002) ont montré qu'à volume ruisselé entrant égal, la quantité d'eau infiltrée dans une zone tampon est plus importante en été lorsque le sol est sec, qu'en hiver, lorsque le sol est humide. L'engorgement des zones tampons en hiver, ou l'humidité résultant d'un événement pluvieux antérieur, constituent des facteurs limitant l'infiltration de la lame ruisselée et donc l'interception des produits phytosanitaires. Ainsi, la présence d'une nappe superficielle sous la zone tampon est susceptible de diminuer significativement son efficacité, d'autant plus lorsqu'elle affleure et peut induire du ruissellement par saturation (Carlier, Giannone et al. 2008). La capacité d'infiltration des sols hydromorphes est limitée et ce paramètre doit donc être pris en compte lors de l'évaluation de l'efficacité d'une zone tampon, de son positionnement et de son dimensionnement.

➤ Le ruissellement entrant

Le ruissellement entrant dans la zone tampon dépend de l'événement pluvieux, de la surface contributive en amont et des propriétés d'infiltration du sol de cette dernière. Il est caractérisé par le volume total d'eau transporté et par son débit. De manière générale, plus ces deux paramètres sont importants, moins la zone tampon est efficace. En effet, le débit de ruissellement peut excéder la capacité d'infiltration du sol, générant du ruissellement hortonien, ou le volume d'eau ruisselé peut excéder la porosité disponible de sols déjà presque saturés, produisant du ruissellement par saturation.



Le ruissellement concentré peut également s'avérer être un facteur limitant de l'efficacité des zones tampons Figure 10. La lame de ruissellement est en effet plus épaisse et la surface de contact entre l'eau et le sol plus faible (CORPEN, 2007). Ceci diminue la capacité de la zone tampon à infiltrer le ruissellement entrant et l'interception des produits phytosanitaires dissous en sera réduite d'autant.

Figure 10 : Bande enherbée submergée par le ruissellement concentré (CORPEN, 2007).

➤ La pente

La pente peut avoir deux effets contrastés sur l'efficacité de la bande enherbée. D'une part, elle est susceptible d'augmenter la vitesse du ruissellement de surface et de réduire le temps de contact entre la lame ruisselée et le sol, ce qui diminue la part d'eau infiltrée et la rétention des produits phytosanitaires (USDA-NRCS, 2000). D'autre part, elle peut également accélérer les écoulements de subsurface, accélérer le ressuyage d'une éventuelle nappe sous jacente, augmenter la porosité disponible et donc le volume d'eau capable de s'infiltrer.

➤ La couverture végétale de la zone tampon

La densité de la végétation des zones tampons accroît la rugosité hydraulique, qui diminue la vitesse d'écoulement de l'eau en surface. Ceci augmente le temps de contact entre le ruissellement et le sol ainsi que la pression exercée par le flot d'eau, élevant le taux d'infiltration dans le sol. Le système racinaire associé à la zone tampon, et l'accroissement de l'activité de la macrofaune qui y est associée, créent des chemins d'infiltration privilégiée pour l'eau. En conséquent, l'âge de la zone tampon peut également avoir une influence sur son fonctionnement.

Finalement, un certain nombre d'auteurs (Patty 1997; Schmitt, Dosskey et al. 1999; USDA 2000; Krutz, Senseman et al. 2005; CORPEN 2007) s'accordent à dire, de façon logique, que plus la zone tampon est large⁶, plus l'interception des produits phytosanitaires est importante. Il est important de rappeler que la largeur requise pour intercepter les pesticides transportés sous forme adsorbée est inférieure à celle qui serait requise pour intercepter le même flux de pesticides, transportés sous forme dissoute ; et ce d'autant plus que l'érosion dans la zone considérée est marquée et/ou que la capacité d'adsorption de la molécule d'intérêt est élevé.

2.4. Positionnement des zones tampons

Le positionnement des zones tampons requiert le diagnostic intégré du bassin versant agricole. Une zone tampon est potentiellement efficace s'il y a du ruissellement, et doit logiquement se situer entre la zone d'application des produits phytosanitaires et le cours d'eau. Plus elle est proche de la source de contamination, plus elle est susceptible d'être efficace (Lacas, Voltz et al. 2005). Les fossés ou drains concentrent le ruissellement et peuvent constituer des court-circuits pour les zones tampons, qui ne sont alors pas traversées par les eaux collectées et ne peuvent intercepter les produits phytosanitaires contenus.

Le guide de diagnostic à l'échelle du petit bassin versant (Gril, Le Hénaff et al. 2010) propose une méthodologie de positionnement des zones tampons en tenant compte de l'ensemble de ces critères. Il

⁶ On appelle ici largeur la dimension dans le sens de l'écoulement

convient également de considérer ce qui est économiquement et politiquement faisable sur la zone considérée. Actuellement, compte tenu à la fois des différentes mesures réglementaires et de l'acceptation sociale, les zones tampons sont majoritairement situées en bordure de cours d'eau. Pourtant, elles peuvent également être situées dans le versant, au sein ou à la sortie des parcelles, de manière à intercepter le ruissellement lorsque celui-ci n'est pas encore trop concentré et à l'abattre progressivement d'amont en aval. La Figure 11 illustre les différentes localisations possibles pour une zone tampon au sein d'un bassin versant.

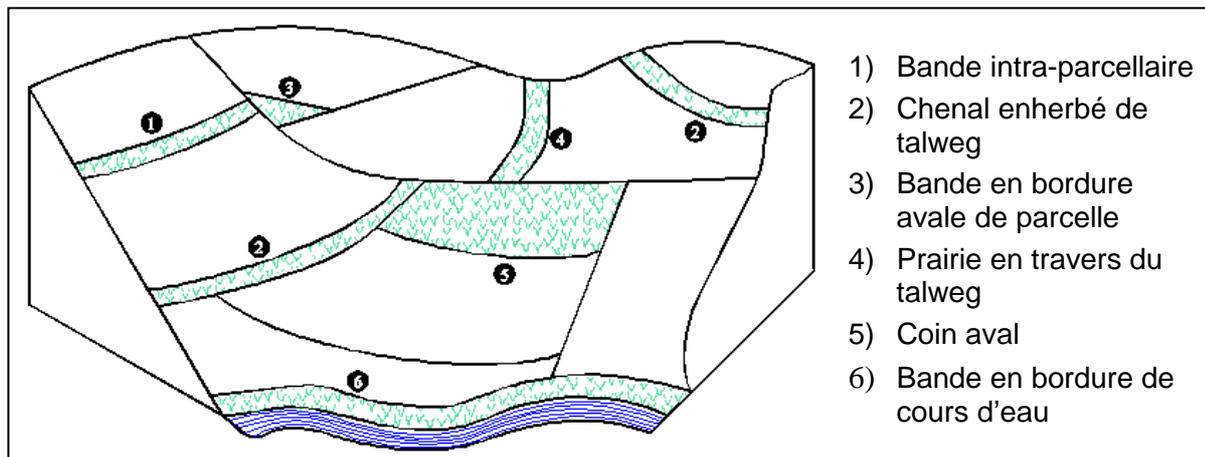


Figure 11. Localisation des zones tampons au sein d'un bassin versant (CORPEN, 1997).

2.5. Dimensionnement des zones tampons

Une fois la localisation de la zone tampon déterminée, il est nécessaire de définir les dimensions de cette structure en fonction des caractéristiques environnantes. Une zone tampon peut avoir différentes formes (triangulaire, rectangulaire, trapézoïdale...) en fonction de son implantation. L'objet du présent guide est de fournir des outils et méthodes pour aider à ce dimensionnement : on se limitera ici aux cas de zones tampons « rectangulaires », c-a-d de dimension approximativement constante dans le sens de l'écoulement (cas 1, 2, (4), 5 et 6 sur la Figure 11).

Actuellement, la réglementation impose la mise en place de zones tampons d'une largeur minimale de 5 mètres le long des cours d'eau, notamment pour les protéger de la contamination par la dérive. Ces bandes sont également susceptibles d'intercepter le ruissellement chargé en pesticides et, selon les résultats obtenus à l'aide de la présente méthode, leur largeur pourra être augmentée sur certains sites pour atteindre l'efficacité souhaitée.

3. METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement d'une zone tampon est une problématique complexe, dont la réponse dépend en partie des attentes de l'utilisateur. Celui-ci doit définir le type d'événement pluvieux auquel il souhaite que la zone tampon puisse faire face (période de retour) et le degré d'efficacité qu'il souhaite la voir atteindre. Ce dernier dépend des enjeux et de la philosophie du plan d'action à mettre en place.

Les hypothèses émises et la démarche proposée pour évaluer l'efficacité d'une zone tampon et déterminer sa largeur optimale sont présentées ci-dessous.

De façon très schématique, la méthode proposée consiste, pour un emplacement de zone tampon donné :

- à évaluer le ruissellement entrant sur la zone. Ce ruissellement est estimé via les pluies caractéristiques de la zone considérée (de durée choisie par l'utilisateur et de période de retour 6 mois, car on cherche à intercepter des événements relativement courants), la taille du versant intercepté par la zone tampon, le type de sol et l'occupation du sol des parcelles du versant considéré.

- à simuler l'abattement du ruissellement au sein de la zone tampon, via le modèle numérique, VFSSMOD (Muñoz-Carpena, Parsons et al. 1999) et proposer une dimension optimale, en fonction de l'efficacité visée.

3.1. Hypothèses majeures

Hypothèse 1 : La largeur de la zone tampon est définie en fonction de sa capacité à limiter le ruissellement.

L'hypothèse faite ici est que l'infiltration est le processus majeur d'efficacité des zones tampons végétalisées (voir §2.3. Efficacité des zones tampons). Ainsi, notre démarche se focalise sur les processus hydrologiques, et la largeur optimale de la zone tampon est définie en fonction de sa capacité d'infiltration.

De ce fait, ses dimensions sont maximisées, car l'approche ne tient pas compte du dépôt des matières en suspension transportant potentiellement une part des pesticides mobilisés dans le ruissellement, ni l'adsorption à la surface de la zone tampon. S'il dispose des données nécessaires et s'il le souhaite, l'utilisateur peut aussi tenir compte des processus de transport des sédiments, voire des pesticides, et optimiser encore la largeur de la zone tampon ; le modèle utilisé le permet en effet.

Hypothèse 2 : La largeur de la zone tampon est définie en accord avec le(s) type(s) de culture présent(s) en amont. Si l'occupation du sol change, il faut réadapter ses dimensions.

La largeur optimale de la zone tampon est définie en lien avec les paramètres d'entrée du modèle qui doivent représenter au mieux les conditions du milieu au moment où les produits phytosanitaires sont transférés. Ceci a majoritairement lieu lors des premières pluies efficaces après la période de traitement, qui est elle-même liée au type de culture à protéger. Le ruissellement entrant dans la zone tampon est également fonction de l'occupation du sol de la surface contributive, d'où la nécessité de dimensionner ces dispositifs en accord avec le type de culture présent en amont.

La culture amont joue donc sur deux facteurs : la ou les saison(s) à considérer, ainsi que les caractéristiques du ruissellement entrant (durée, débit).

Hypothèse 3 : La méthode de dimensionnement s'applique aux zones tampons enherbées et boisées.

Selon le CORPEN (2007), les zones tampons enherbées et boisées présentent des modes de fonctionnement similaires, notamment d'un point de vue hydrologique. Ainsi, il est possible d'utiliser le modèle de bande enherbée fourni pour dimensionner ces deux types de zone tampon en adaptant les paramètres d'entrée aux propriétés des zones boisées (épaisseur de litière plus importante, accroissement de la perméabilité de surface).

Hypothèse 4 : La zone tampon est supposée rectangulaire et la méthode proposée permet de déterminer la largeur optimale du dispositif.

Hypothèse 5 : Il n'y a pas de stockage d'eau à la surface de la zone tampon.

3.2. Modèle utilisé

VFSSMOD, le modèle mis à disposition pour le dimensionnement des zones tampons est présenté en détail en **Annexe A**. Pour déterminer l'efficacité d'une zone tampon, il convient d'y renseigner un certain nombre de paramètres associés au ruissellement entrant et à la capacité d'infiltration du dispositif enherbé ou boisé.

Une analyse de sensibilité a été menée pour déterminer les paramètres les plus sensibles du modèle (Annexe A). Les indications fournies plus loin pour renseigner le modèle intègrent les résultats de cette analyse, en insistant sur les données/paramètres les plus sensibles.

IMPORTANT

Le dossier « Zone_Tampon » qui a été téléchargé comprend :

- Le présent guide, explicitant les différentes étapes de la démarche à suivre
- Un dossier nommé **Hydrodem**, qui contient un logiciel permettant de définir les caractéristiques topographiques d'une zone tampon, ainsi que de sa zone contributive (voir 4.1.1. Dimensions et pente de la surface contributive)
- Un fichier OpenOffice nommé **HyetoHydro**, permettant de définir des scénarios de pluie et de ruissellement sur la zone tampon. (voir 4.1.5. Evènement pluvieux ou 4.1.6. Ruissellement sortant de la surface contributive)

Ce dossier peut être placé n'importe où sur l'ordinateur de l'utilisateur.

En parallèle, le modèle numérique VFSSMOD et l'ensemble des modules qui y sont attachés sont à télécharger à l'adresse suivante : <http://abe.ufl.edu/carpenna/vfssmod/index.shtml>. Cela permet d'assurer à l'utilisateur qu'il utilise la dernière version du logiciel, et bénéficie ainsi de toutes les améliorations qui y sont régulièrement apportées : il est donc souhaitable que l'utilisateur actualise assez régulièrement la version de VFSSMOD qu'il utilise. **NB : de façon provisoire, la version française du modèle VFSSMOD est fournie dans le dossier « Zone_tampon » : la version multilingue ne sera en effet disponible en ligne que prochainement.**

Pour des raisons techniques et pratiques, il est impératif d'installer le dossier « vfssmod-w » sur le disque local C de l'ordinateur (directement à la racine).

Ce dossier comprend :

- un **fichier .exe** nommé « **vfssmod-w** » qui constitue le modèle numérique de bande enherbée à utiliser.
- la documentation relative au modèle (en anglais),
- un **sous-dossier « inputs »** dans lequel est stocké l'ensemble des fichiers d'entrée créés lors de l'utilisation de VFSSMOD,
- un **sous-dossier « output »** dans lequel est stocké l'ensemble des fichiers de sortie créés lors de l'utilisation de VFSSMOD,

3.3. Démarche à suivre

De manière à déterminer la largeur optimale d'une zone tampon, il convient de construire des scénarios agro-pédo-climatiques caractérisant le ruissellement entrant dans la zone tampon et la capacité d'infiltration de cette dernière lors des périodes de transfert des produits phytosanitaires, en fonction des caractéristiques propres de la zone considérée.

- Le ruissellement entrant dans la zone tampon est fonction des dimensions de la surface contributive, de l'évènement pluvieux qui survient et du potentiel de génération du ruissellement.
- La capacité d'infiltration de la zone tampon, et donc d'interception des produits phytosanitaires (*Hypothèse 1*), dépend principalement du type de sol, des conditions d'humidité initiales, de ses dimensions et de la présence ou non d'une nappe superficielle.

La construction d'un scénario agro-pédo-climatique requiert la détermination de l'ensemble de ces paramètres, présentés sur l'organigramme de la Figure 12. Les outils et méthodes proposés pour leur détermination sont indiqués en italique sur l'organigramme et présentés en détail dans la quatrième partie de cette brochure.

⇒ **Idéalement, l'utilisateur est à même de réaliser des mesures de terrain à l'échelle locale. Toutefois, ceci peut s'avérer difficilement applicable dans un contexte opérationnel et des méthodes empiriques sont proposées à l'utilisateur pour se procurer les informations nécessaires.**

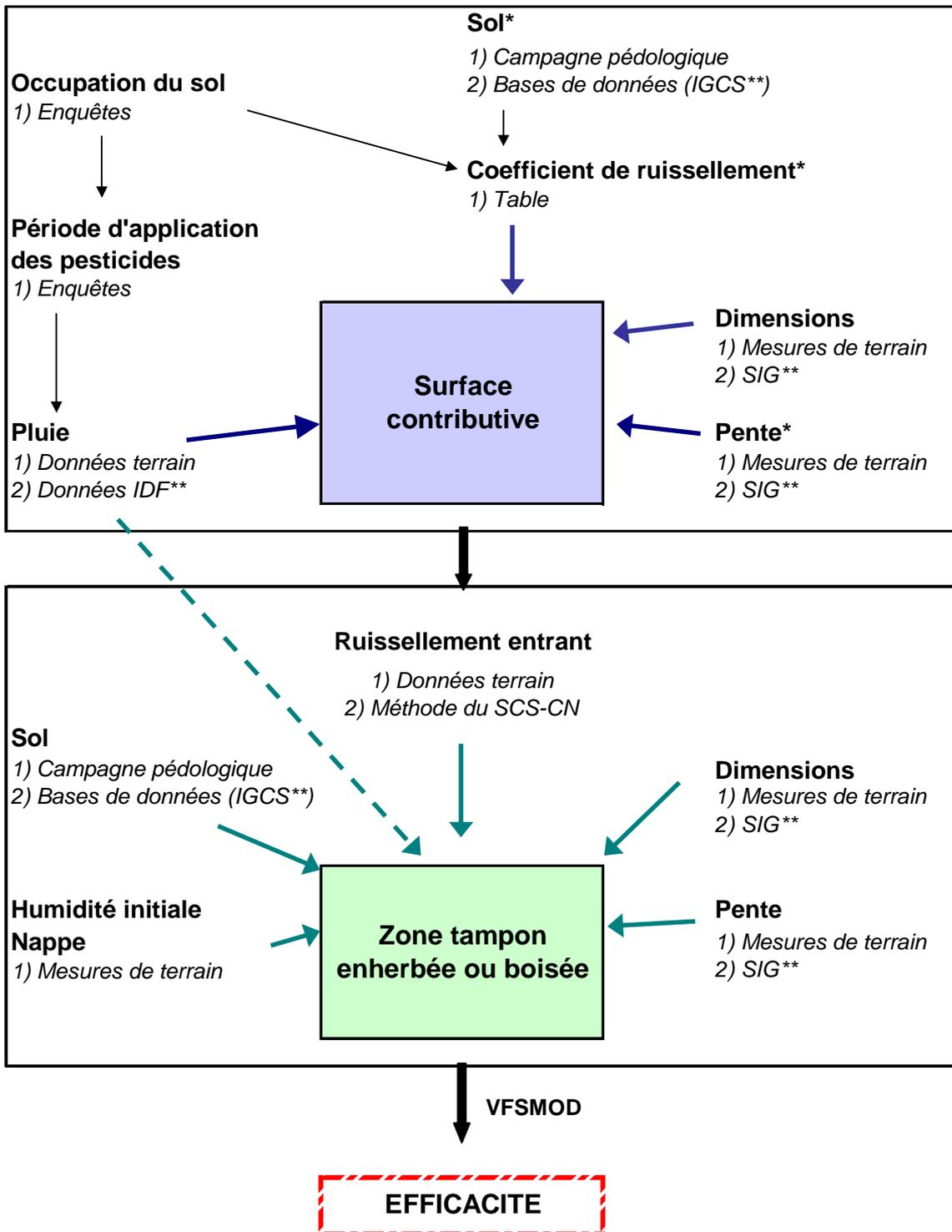
Globalement on peut considérer que la période de transfert des produits phytosanitaires correspond à la période de traitement des cultures (*Hypothèse 2*). En effet, les pesticides sont principalement transportés lors des premières pluies efficaces (qui génèrent du ruissellement) suivant la phase de traitement. La

période d'application des produits phytosanitaires dépend des types de culture et de la région (en lien avec le climat). Ainsi, il convient de déterminer l'occupation du sol de la surface contributive et de définir les différentes périodes de traitement associées. Au sein d'une même surface, l'occupation du sol peut varier dans l'espace et dans le temps, d'où la nécessité de considérer l'ensemble des découpages parcellaires et rotations culturales qui y sont pratiqués.

Pour un site donné, il est recommandé de construire un scénario agro-pédo-climatique par période de transfert des produits phytosanitaires identifiée. En France, celles-ci auront principalement lieu en automne et au printemps, mais ceci est à définir plus précisément en fonction des pratiques agricoles régionales. Selon les caractéristiques locales et les motivations de l'utilisateur, celui-ci peut construire davantage de scénarios et tester, pour une période de transfert donnée, différents types d'événements pluvieux ou différents états d'humidité initiale.

Lorsque l'occupation du sol de la surface contributive est hétérogène, il est probable que les parcelles agricoles ne soient pas toutes traitées à la même époque de l'année. Toutefois, lors de la construction des scénarios agro-pédo-climatiques, et notamment **pour la caractérisation du ruissellement entrant dans la zone tampon, il faut bien tenir compte de l'ensemble de la surface contributive**. En effet, même s'il n'est pas chargé en pesticides, le ruissellement issu des parcelles non traitées s'ajoute à celui de la parcelle traitée et les produits phytosanitaires sont dilués dans la totalité du volume d'eau sortant.

Une fois les scénarios agro-pédo-climatiques construits, ils pourront être testés via VFSSMOD pour évaluer l'efficacité de la zone tampon en fonction de sa largeur.



* Si l'utilisateur choisit la méthode du SCS-CN pour caractériser le ruissellement entrant

**SIG : Système d'Information Géographique

IDF : Intensité-Durée-Fréquence

IGCS : Inventaire Gestion et Conservation des Sols

Figure 12. Méthode de caractérisation de la zone tampon et de la surface contributive pour dimensionner les dispositifs enherbés ou boisés.

4. ACQUISITION DES DONNEES ET PARAMETRES D'ENTREE

Les outils et méthodes proposés à l'utilisateur pour caractériser le ruissellement entrant et la zone tampon de son site d'étude sont présentés dans cette quatrième partie.

Important : La liste proposée est non exhaustive et, s'il le souhaite, l'utilisateur peut avoir recours à d'autres outils ou méthodes de détermination.

4.1. Surface contributive

Un organigramme de la méthode à suivre et des outils mobilisables est proposé sur la Figure 13 :

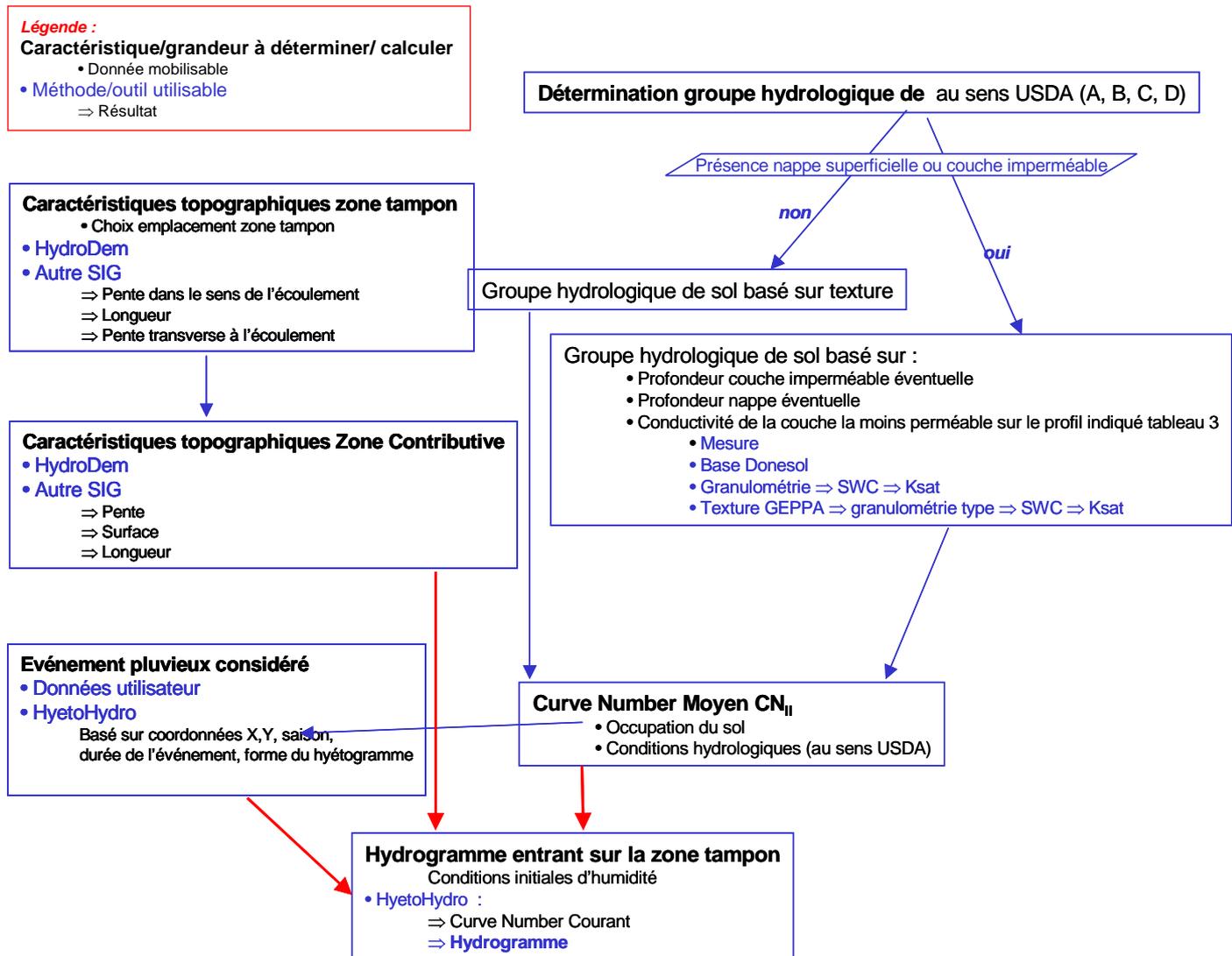


Figure 13 : Organigramme de la démarche à suivre et des outils méthodes et outils mobilisable pour déterminer l'hydrogramme entrant sur la zone tampon.

4.1.1. DIMENSIONS ET PENTE DE LA SURFACE CONTRIBUTIVE

♦ METHODE 1 : UTILISATION D'OUTILS SIG

Pour déterminer les dimensions et la pente de la surface contributive, l'utilisateur peut avoir recours à un Système d'Information Géographique développé au Cemagref de Lyon par Etienne Leblois : HydroDem. A partir de modèles numériques de terrain, le logiciel permet de déterminer approximativement les limites du versant d'alimentation d'une bande enherbée existante ou prévue et d'en calculer diverses caractéristiques.

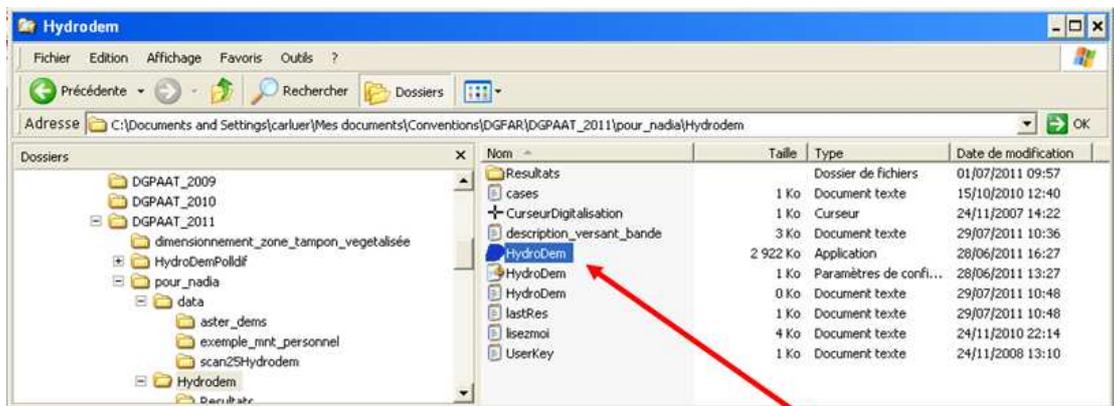
Ceci suppose :

1. le prétraitement d'un modèle numérique de terrain (dans la suite : mnt) de la région d'intérêt,
2. le tracé de la bande enherbée ,
3. l'étude des caractéristiques de son versant d'alimentation.

Une version d'Hydrodem limitée aux fonctionnalités utiles pour la définition de la zone contributive à une section de versant est disponible gratuitement dans le package « Zone_Tampon ».

Les pages qui suivent présentent la démarche à suivre.

a - Lancer Hydrodem. L'exécutable se trouve dans Hydrodem/HydrodemDev



Exécutable Hydrodem

1 - Sélection et prétraitement du modèle numérique de terrain.

La sélection du MNT à traiter se fait dans le menu « Application » :

⇒ Option 1a : dossier déjà prétraité

On peut bien sûr reprendre un dossier déjà prétraité. C'est l'opération (1a) du menu. Le logiciel propose de choisir dans la liste des projets existants, qui se trouve dans le répertoire Hydrodempollidif\wkhd



⇒ Option 1b : mnt existant au format grid-ascii

Sinon, il convient dans l'idéal de s'appuyer sur un mnt à la résolution la plus fine possible, fourni au format **grid-ascii**, extension **.asc**.

Un tel fichier est fourni en exemple dans **Hydrodem\data\mnt_personnel**. Il s'agit d'un mnt à 5 mètres construit à partir de données de télédétection Lidar, et concernant un petit bassin des monts du Lyonnais, fourni comme simple exemple de mnt personnalisé.

```

ncols      876 ← Nombre de colonnes du MNT
nrows     488 ← Nombre de lignes du MNT
xllcorner 778059 ← Abscisse du coin bas gauche
yllcorner 2085478 ← Ordonnée du coin bas gauche
cellsize   5 ← Taille des cellules
nodata_value -9999 ← Code pour cellule sans données
              Données (ncols données par ligne)
-9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000
-9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000
-9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000 -9999,000

```

On conseille de stocker les données correspondantes dans le répertoire **Hydrodem/data/nom_du_MNT**. Le MNT est alors importé dans le logiciel et prétraité. C'est l'opération **(1b)** du menu.

Notons que les altitudes ne doivent pas avoir été tronquées ou arrondies d'aucune manière⁷, sous peine de compromettre la pertinence des résultats.

⇒ Option 1c : données SRTM, résolution 50m

NB : Si on ne dispose pas de mieux, la NASA a élaboré un MNT de résolution 30 m, couvrant tout le territoire. Ces données sont issues d'internet et sont *en pratique* libres de droit.

*Le téléchargement de ces données pouvant être fastidieux, nous pouvons vous fournir le « carré » correspondant à votre zone d'étude, sous réserve de disposer de la latitude et de la longitude d'un point de cette zone (taille approximative d'une « planche » : 75 km en x * 110 km en y). Adresser votre demande à ZT_eq_PollDiff@cemagref.fr Ces données sont à stocker dans Hydrodem\data\aster_dems, et seront exploitées via l'opération **(1c)** du menu.*

La planche correspondant à la zone située entre le 45^{ème} et le 46^{ème} parallèles Nord et entre le 4^{ème} et le 5^{ème} méridiens Est est fournie à titre d'exemple. Elle correspond aux points pour lesquels $731\ 196 < x < 806\ 276$ et $2\ 001\ 314 < y < 2\ 114\ 579$.

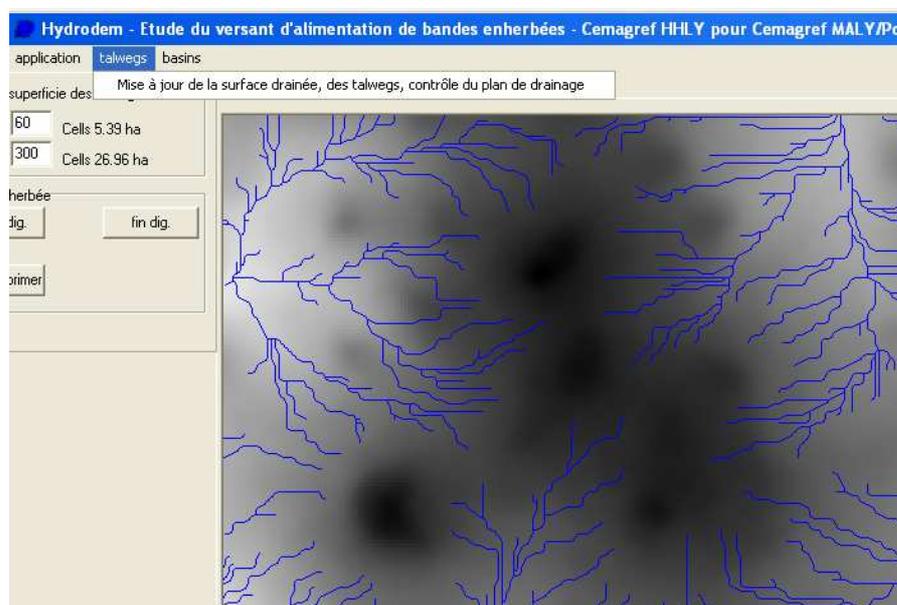
Quelque soit l'option choisie (1a, 1b ou 1c), le logiciel prétraite alors le MNT, c-a-d qu'il détermine les lignes d'écoulement probables en fonction des pentes locales. Le logiciel propose un

⁷ Il est attendu que le mnt de l'IGN à 5 mètres soit mis à disposition des services techniques de l'Etat ; il conviendra de s'assurer à ce moment là du comportement du logiciel. Pour l'heure on a supposé que ce modèle numérique de terrain que l'utilisateur serait en mesure d'en extraire les fragments à lui utiles et de les convertir au format grid-ascii (comme le mnt fourni en exemple).

schéma d'écoulement de surface cohérent, après avoir éliminé les minimums locaux fréquemment observables sur les mnt.

Le prétraitement se termine en présentant le mnt et une ébauche du réseau de talwegs (ce réseau est une indication de l'emplacement des cours d'eau si les conditions hydrologiques le permettent).

L'utilisateur peut choisir la surface drainée (indiquée en nombre de cellules), seuil au dessus de laquelle on visualise les talwegs secondaires (seuil 1) ou principaux (seuil 2). La surface drainée correspondant à chacun de ces seuils est indiquée à droite des cellules modifiées. Pour mettre à jour le plan de drainage ainsi modifié, il faut aller dans l'onglet « talwegs / Mise à jour de la surface drainée, des talwegs, contrôle du plan de drainage », puis cliquer sur « Redessiner ». Un seuil élevé permettra de ne visualiser que les cours d'eau existants réellement ; un seuil plus bas permettra de repérer les talwegs susceptibles de concentrer les écoulements en cas de ruissellement. Il est difficile de donner des valeurs type pour ces seuils, car elles varient en fonction de la nature du terrain(plus ou moins perméable) et sa pente.



Remarques :

Taille maximale de mnt pouvant être prise en charge : 2000x2000 cellules (soit 10x10 km à 5 m de résolution).

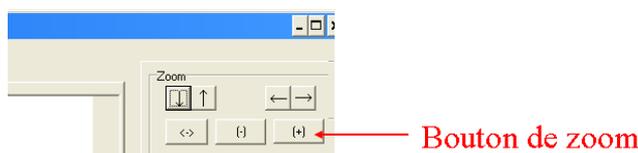
L'idéal est de pouvoir télécharger les Scan 25 de la zone d'intérêt, afin de mieux « visualiser » le terrain.

Chaque dossier est physiquement situé dans un répertoire et un seul, que l'on trouvera comme ..\wkhd\[sigle]. Ces dossiers peuvent être supprimés (sous windows) quand ils ne sont plus utiles.

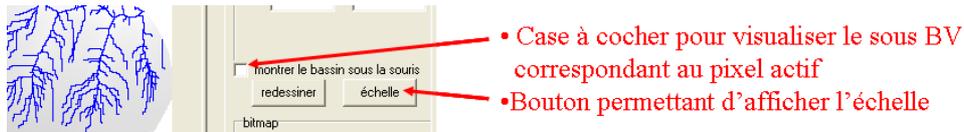
2 - Tracé de la bande enherbée.

Une fois le MNT déterminé, on peut commencer à tracer l'implantation des zones tampons dont on veut étudier la zone contributive.

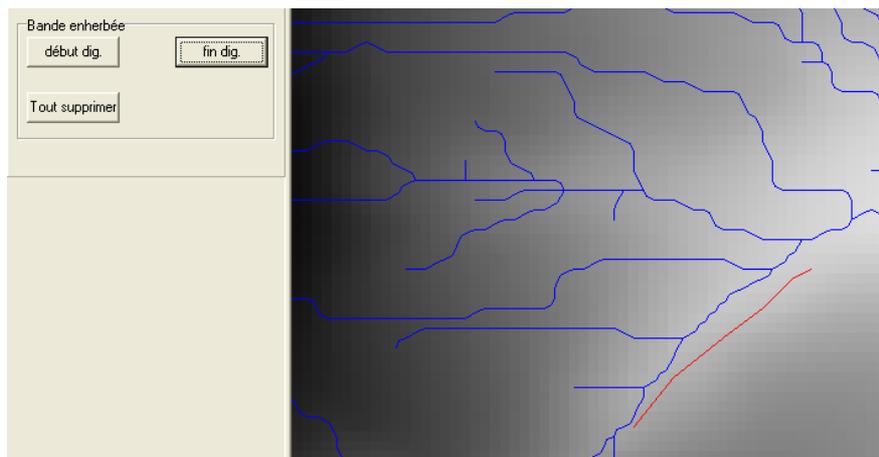
Pour ce faire, il peut être utile de zoomer sur une zone du bassin versant : cliquer deux-trois points de la zone d'intérêt, puis cliquer sur le bouton de zoom.



Il est possible, en cochant la case « montrer le bassin sous la souris » de visualiser les pixels drainés pour chaque pixel où l'on déplace la souris. On peut également visualiser l'échelle afin d'avoir une idée des distances, en cliquant sur le bouton « échelle ». Pour effacer l'échelle, cliquer sur « redessiner »



Le tracé de la bande se fait par digitalisation à l'écran : <début dig> clic... clic... <fin dig>. Le tracé doit être effectué d'un coup. Méorisé, il figure comme un trait rouge fin. On conseille de ne pas tracer la bande sur un pixel jouxtant directement un cours d'eau : tout le bassin versant amont est sinon englobé dans la zone drainée par la bande.

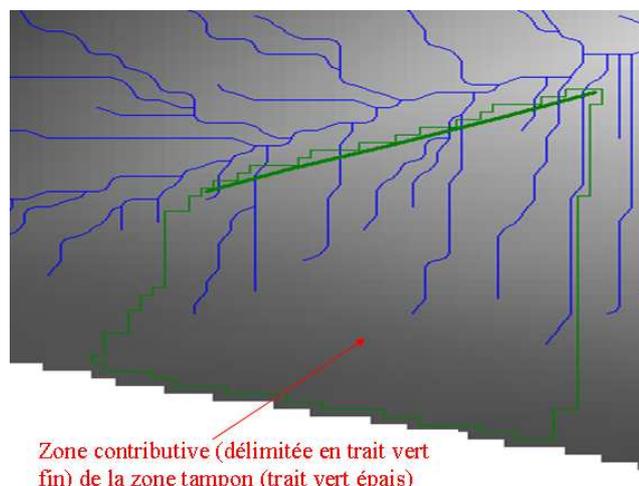


On peut digitaliser plusieurs bandes d'affilée. On conseille de ne pas dépasser 5 à 6 bandes, pour que les résultats restent facilement lisibles et exploitables.

3 – Examen du versant.

Une fois le tracé des bandes potentielles réalisé, cliquer sur « Examen du versant d'une bande enherbée » (opération 3. dans le menu « Application ») : le logiciel détermine alors la zone d'alimentation de chaque bande enherbée définie en étape 2.

Les résultats (surface contributive, pente, longueur bande, concentration des écoulements...) sont figurés sous forme de texte (panneau « texte ») et sous forme figurée (panneau « carte » et « profil »).



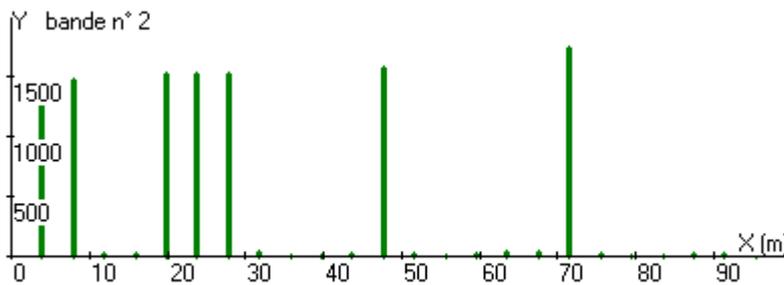
Rem : Il faut sauvegarder immédiatement ces éléments (« save image », « save text ») car l'affichage du panneau texte change dès qu'une nouvelle action (ex : zoom) est réalisée.

Voici les résultats contenus dans **le panneau « texte »** :

Détermination de la zone d'alimentation de la bande enherbée no # 2

Bande enherbée		Caractéristiques propres à la bande enherbée de la bande n°2	
Longueur	99.31 m :	longueur de la bande enherbée, dans le sens transverse à l'écoulement	
eqZ moyen	entre cellules successives :	1.410 soit une pente de	28.196 % pentes moyennes et
eqZ maximum	entre cellules successives :	1.844 soit une pente de	36.880 % maximales dans le sens
			de l'écoulement, au niveau de la bande
Zone d'alimentation		Caractéristiques propres à la zone contributive	
* Superficie de	5641 cellules soit 14.10 ha	Nombre de cellules concernées, surface correspondante (en ha)	
* Pente moyenne	26.50 %	Pente moyenne de la zone	
Distance entre la zone d'alimentation et la bande, le long de l'écoulement			
* moyenne	332.62 m	Distance moyenne et maximale entre la zone contributive et la bande	
* écart-type	176.92 m	Ecart type de cette distance	
* maximum	807.04 m		
* pente transverse évaluée au lieu de la bande	17.20 %	Pente transverse, c-a-d pente le long du tracé de la bande	
homogénéité de la superficie drainée par les cellules de la bande		caractérisation de la concentration de l'écoulement parvenant à la bande	
histogramme des superficies interceptées			
17 mailles de la bande enherbée drainent entre	1 et	500 m ² /m	nombre de mailles interceptant une gamme de surface donnée
7 mailles de la bande enherbée drainent entre	500 et	2000 m ² /m	
0 mailles de la bande enherbée drainent entre	2000 et	5000 m ² /m	
0 mailles de la bande enherbée drainent plus de	5000	m ² /m	
moyenne :	458.5 m ² /m	Moyenne, Ecart type et Coefficient de Variation (CV) de la superficie drainée par chaque pixel de bande.	
écart-type :	706.5 m ² /m		
CV :	1.541	Le CV seuil à partir duquel on considère qu'il y a flux concentré	
un CV élevé suggère l'interception de flux concentrés (point bas, talweg) est à fixer par l'utilisateur, en fonction des mesures usuelles observées sur son site d'étude			

Les résultats contenus dans le panneau « profil » renseignent sur la concentration des écoulements : pour chaque bande, un histogramme indique la surface drainée par cette maille, comme figuré ci-dessous :



X : abscisse le long de la bande

Y : superficie drainée par chaque maille le long de la bande (en m² par mètre de bande)

Pour démarrer un nouvel ensemble de digitalisation, cliquer sur « Tout supprimer » et recommencer à l'étape 2.

Contacts :

- Aspects informatiques et algorithmiques : etienne.leblois@cemagref.fr
- Aspects hydrologiques : nadia.carluer@cemagref.fr

◆ METHODE 2 :

S'il en dispose et s'il le souhaite, l'utilisateur peut utiliser d'autres Systèmes d'Information Géographique (ArcGIS, MapInfo...).

4.1.2. OCCUPATION DES SOLS ET PERIODES DE TRAITEMENT

Une fois que la surface contributive a été délimitée, il convient de déterminer les différents types d'occupation du sol présents en son sein. On peut distinguer les cultures pérennes (vergers, vignes), les cultures annuelles (à grand écartement telles que le maïs, la betterave ou la pomme de terre ; à petit écartement, telles que le blé, l'orge ou l'avoine), les prairies, les broussailles, les zones boisées et les zones urbaines.

Pour déterminer les périodes de traitement en produits phytosanitaires associées aux types de culture identifiés, il est possible de se renseigner auprès d'organismes locaux ayant une bonne connaissance des pratiques agricoles régionales :

- les Chambres d'agriculture,
- les DRAAF-SRAL,
- les instituts techniques agricoles (Arvalis, Cetium, CTIFL, ITB, IFV),
- les partenaires des groupes « phyto » (CORPEP, CROPPP, GRAPPE, GREPPES...).

A partir des informations recueillies, l'utilisateur peut définir les scénarios à construire et déterminer, pour chacun d'eux, les paramètres évoqués sur la Figure 17 : **occupation du sol** et conséquences pour **l'état de surface**, qui servira ensuite à estimer la lame ruisselée ; **périodes principales de traitement**.

Pour la suite, il convient également de déterminer la surface occupée par chaque type de couverture du sol. L'utilisateur peut consulter des cartes IGN (pour les cultures pérennes), des photos aériennes récentes, ou, pour les cultures soumises à déclaration à la PAC, consulter Géoportail (couche « usage des sols »).

4.1.3. SOLS DE LA SURFACE CONTRIBUTIVE

La méthode du SCS-CN (USDA-SCS, 1972), décrite en Annexe B, peut permettre d'estimer le ruissellement généré sur les parcelles cultivées et entrant dans la zone tampon.

Il faut pour cela auparavant déterminer certaines propriétés du sol de la surface contributive, qui vont servir à définir le groupe hydrologique du sol et à caractériser son potentiel de ruissellement. Dans le premier mètre de sol, l'utilisateur doit estimer la **conductivité hydraulique à saturation** des différents horizons, détecter la présence éventuelle d'un **horizon imperméable** ainsi que la présence d'une **éventuelle nappe superficielle** (voir le paragraphe suivant). Différentes méthodes sont proposées ci-dessous pour déterminer ces paramètres.

4.1.3.1. CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A SATURATION

◆ METHODE 1 : MESURES DIRECTES

L'utilisateur peut mesurer la conductivité hydraulique à saturation des différents horizons du premier mètre de sol de la surface contributive à l'aide de la méthode de Müntz (Adamiade, 2004). Cette méthode consiste à mesurer sur le terrain la vitesse d'infiltration de l'eau sous une charge constante de 3 cm. Un double anneau imperméable est enfoncé dans le sol sur une hauteur d'environ 6 cm, et 3 cm d'eau sont versés dans ce double anneau à la surface du sol. De l'eau est régulièrement ajoutée jusqu'à obtenir une vitesse d'infiltration stable. L'opération consiste alors à mesurer la quantité infiltrée en fonction du temps et déterminer ainsi la conductivité hydraulique du sol. Compte tenu de l'hétérogénéité spatiale des sols, il est préférable de réaliser plusieurs mesures (au moins 3, si possible) pour pouvoir définir une conductivité moyenne.

L'utilisateur peut aussi mesurer la conductivité hydraulique à saturation d'un sol en laboratoire. Il convient de prélever des échantillons dans chaque horizon de sol de la surface contributive et de déterminer leur coefficient de perméabilité à l'aide de perméamètres à charge constante ou variable. Il est important que les échantillons soient non remaniés de manière à conserver la structure originelle du sol.

♦ **METHODE 2 : UTILISATION DE LA BASE DE DONNEES DONESOL**

S'il ne peut réaliser de mesures sur le terrain ou en laboratoire, l'utilisateur peut consulter la base de données DONESOL (programme IGCS), présentée en Annexe C. Il convient de contacter l'INRA d'Orléans (dominique.arrouays@orleans.inra.fr ; benoit.toutain@orleans.inra.fr) pour prendre connaissance des études pédologiques réalisées au sein de la zone considérée et, le cas échéant, de demander à les consulter. La mise en relation avec l'auteur de l'étude est effectuée par l'INRA et, selon les études, l'accès aux données peut être gratuit ou payant. Dans ce dernier cas, avant de procéder à la commande, il convient de s'assurer que les paramètres recherchés ont bien été renseignés dans l'étude.

Une fois en possession de l'étude, l'utilisateur peut consulter des informations collectées par l'auteur, notamment sur la perméabilité des différents horizons du sol. La conductivité hydraulique mesurée sur le terrain est indiquée dans le champ COND_HYDRO_TER de la table ANALYSES et celle mesurée en laboratoire est indiquée dans le champ COND_HYDRO_LAB de la même table. Les méthodes utilisées pour leur détermination sont respectivement fournies dans les champs MET_CONDUCT_TER et MET_CONDUCT_LAB de la table ANALYSES.

Note : Le dictionnaire de données permettant de visualiser le contenu d'une étude et de comprendre l'organisation de DONESOL est disponible gratuitement sur le site suivant :

http://www.gissol.fr/outil/donesol/dictionnaire-donesol-igcs_2010_09_23.pdf

♦ **METHODE 3 : UTILISATION DE REGLES DE PEDO-TRANSFERT**

Si l'utilisateur n'a pas trouvé d'étude pédologique au niveau de la zone considérée dans la base de données DONESOL, il peut avoir recours à des règles de pédo-transfert. Celles-ci permettent d'estimer la conductivité hydraulique à saturation d'un sol à partir de sa texture, de sa teneur en carbone organique et de son degré de compaction. **Les résultats obtenus à l'aide de cette méthode sont moins précis que les autres et peuvent ne pas être représentatifs de la réalité. Toutefois, ils peuvent fournir un ordre de grandeur de la perméabilité des sols étudiés.**

Différentes méthodes de détermination de la granulométrie et texture d'un sol sont proposées en Annexe D.

Cas 1 : L'utilisateur connaît les pourcentages d'argile, de limon et de sable

L'utilisateur peut :

- Télécharger gratuitement le logiciel « Soil Water Characteristics » à l'adresse suivante : <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/newregistration.html>. Choisir Units/Metric dans le menu « Options ». **NB :** Ignorer les messages d'erreurs successifs
- Renseigner les pourcentages d'argile et de sable du sol de la surface contributive dans les espaces prévus à cet effet, sur la partie gauche de l'écran (Figure 14).
- Renseigner le pourcentage de matière organique contenu dans le sol de la surface contributive dans l'encart prévu à cet effet, sur la partie droite de la fenêtre (Figure 14). La teneur en matière organique dépend du type de culture présent et de son stade de croissance.
- Indiquer le degré de compaction du sol dans l'encart prévu à cet effet sur la partie droite de la fenêtre (Figure 14). Celui-ci doit tenir compte de la compaction naturelle du sol, de la compaction due aux activités anthropiques (passage d'engins...) et être appréciée sur le terrain.
- Visualiser la conductivité hydraulique à saturation calculée en haut à droite de la fenêtre (Figure 14). Celle-ci se nomme « Sat. Hydraulic Cond. ».

NB : C'est ici la capacité de ruissellement de la surface contributive que l'on cherche à caractériser : on utilisera donc plutôt les données de granulométrie de l'horizon superficiel.

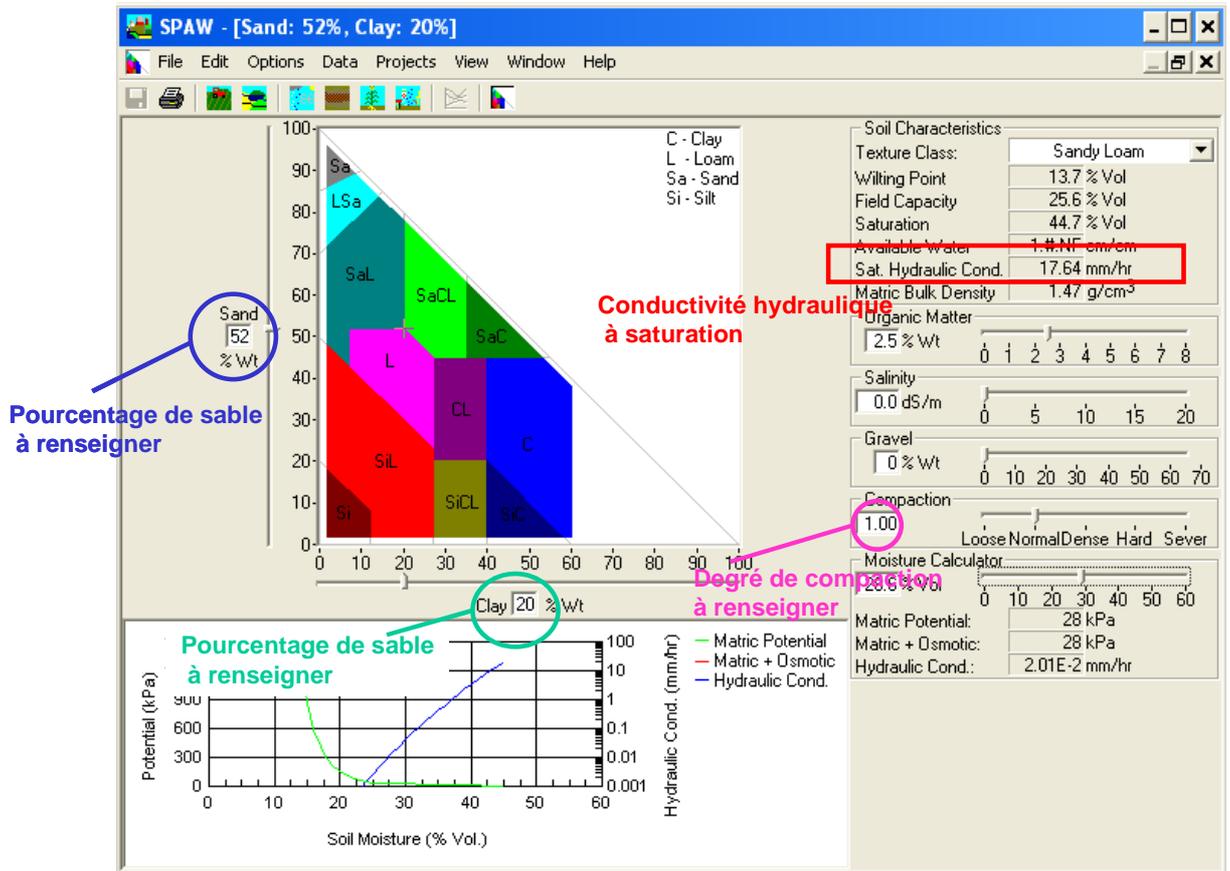


Figure 14 : Interface du module « Soil Water Characteristics » pour la détermination de la conductivité hydraulique à saturation.

Cas 2 : L'utilisateur connaît seulement la classe texturale du sol

Si l'utilisateur ne connaît pas les pourcentages d'argile, de limon et de sable (utilisation de la Base de Données des Analyses de Terres, détermination de la texture par le pédologue sur le terrain), il ne peut utiliser directement le module « Soil Water Characteristics ». Bien que celui-ci présente un volet déroulant permettant de sélectionner directement la classe texturale du sol, **il ne peut être utilisé directement dans la mesure où les classes proposées sont liées au triangle de l'USDA utilisé aux États-Unis et non au triangle du GEPPA utilisé en France** (Annexe D). Les classes texturales de ces deux triangles diffèrent beaucoup, en particulier pour les sols à texture équilibrée (« bonne terre franche » dans le langage agricole) (Figure 15).

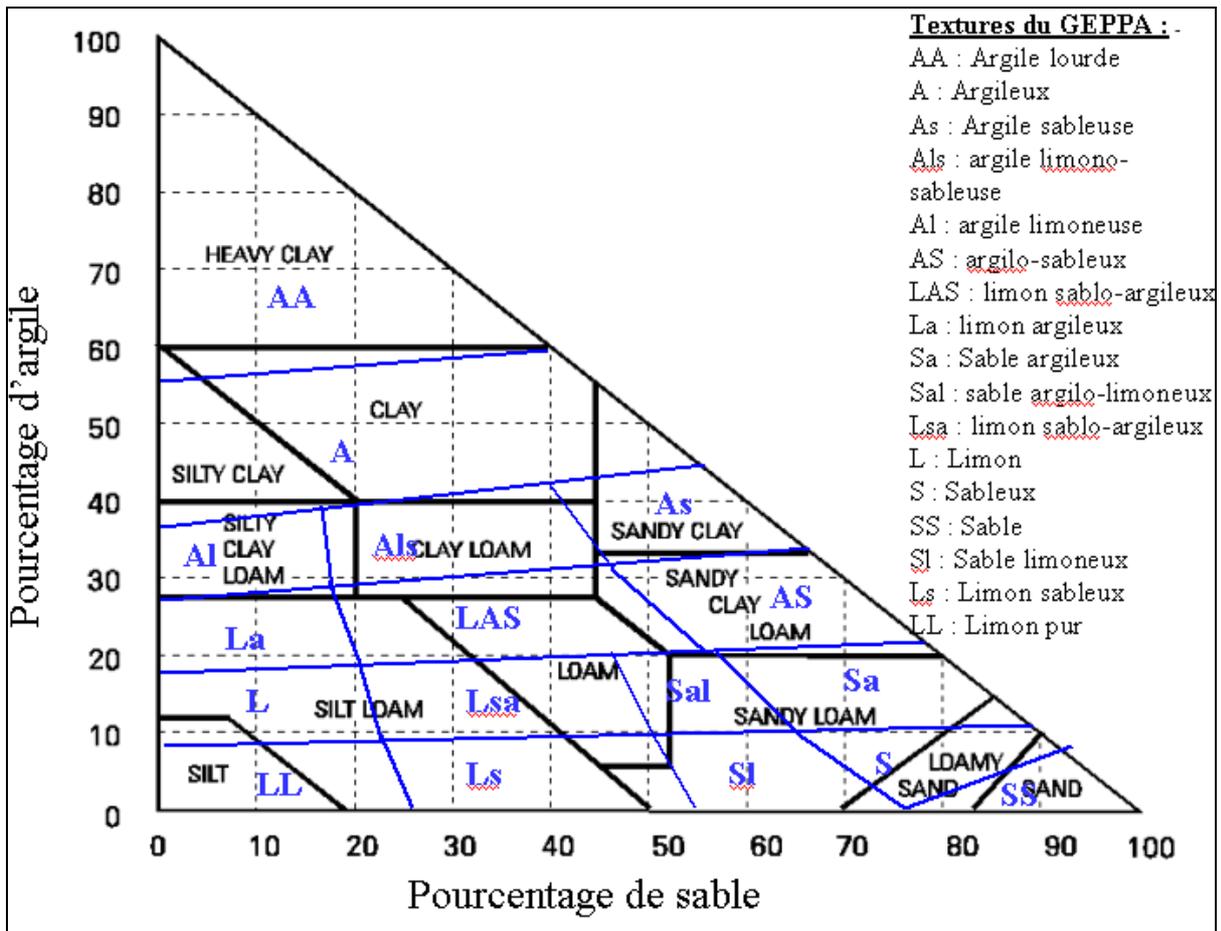


Figure 15. Superposition du triangle des textures du GEPPA (bleu) à celui de l'USDA (noir).

Dans ce contexte, une combinaison de pourcentages en argile et en sable « type » a été définie pour chaque classe de texture du triangle du GEPPA (Tableau 1). L'utilisateur peut renseigner ces pourcentages dans le module « Soil Water Characteristics » et suivre les indications fournies précédemment pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation associée.

Attention : Les pourcentages proposés correspondent au point central de chaque classe de texture. Ainsi, la conductivité hydraulique associée peut être très différente de celle du vrai sol étudié si la composition de ce dernier s'éloigne beaucoup de ce point central (teneur en argile plus élevée, teneur en sable plus faible...).

Texture		Pourcentages	
Symbole GEPPA	Nom	Sable	Argile
AA	Argile lourde	13	72
A	argileux	24	51
As	argile sableuse	51	38
Als	argile limono-sableuse	27	36
Al	argile limoneuse	7	33
AS	argilo-sableux	60	26
LAS	limon argilo-sableux	33	25
La	limon argileux	10	23
Sa	sable argileux	72	16
Sal	sable argilo-limoneux	53	16
Lsa	limon sablo-argileux	34	14
L	limon	11	13

S	sableux	85	8
SS	sable	90	3
SI	sable limoneux	60	5
Ls	limon sableux	37	5
LL	limon pur	12	4

Tableau 1. Pourcentages types d'argile et de sable pour chaque classe texturale du triangle du GEPPA.

Note : La conductivité hydraulique à saturation peut varier en fonction de l'évolution de la couche superficielle pour des sols battants. Dans ce cas, il peut s'avérer nécessaire de consulter les experts locaux pour estimer les capacités d'infiltration à différentes époques de l'année (Cf 4.1.2).

4.1.3.2. PROFONDEUR EVENTUELLE DE LA COUCHE IMPERMEABLE

Selon l'USDA-SCS (1972), un horizon est considéré imperméable si sa conductivité hydraulique à saturation est inférieure à 0.035 mm/h. Ainsi, à partir des conductivités hydrauliques à saturation de chaque horizon, définies à l'aide des indications fournies au paragraphe 4.1.3.1, l'utilisateur peut déterminer s'il existe une couche imperméable dans le premier mètre de sol et, le cas échéant, indiquer sa profondeur.

4.1.3.3. PROFONDEUR DE LA NAPPE

Une nappe superficielle peut influencer sur la capacité d'infiltration du sol et est susceptible d'être présente notamment dans les zones situées en bordure de cours d'eau, situées sur les points topographiques bas ou présentant un horizon imperméable peu profond.

La présence d'une nappe peut être révélée par des tâches de couleur rouille ou bleue grise dans le sol. Les tâches de couleur rouille sont caractéristiques du fer à l'état oxydé et indiquent que le sol est actuellement non saturé, mais sujet à des remontées périodiques de la nappe (en saison humide ou suite à des événements pluvieux intenses). Les tâches de couleur bleue grise (Figure 20), quant à elles, sont caractéristiques du fer à l'état réduit et indiquent que le sol est actuellement saturé. La limite supérieure de la zone

d'observation de ces tâches de couleur définit la profondeur de la nappe en période sèche ou humide.



Figure 16. Sol hydromorphe (Photographie d'Alain Ruellan).

♦ METHODE 1 : ETUDE DE PROFIL PEDOLOGIQUE

L'utilisateur peut repérer les tâches de couleur rouille et bleue grise en étudiant des profils pédologiques (Figure 20) ou en réalisant des sondages à la tarière au niveau de la surface contributive.

♦ METHODE 2 : UTILISATION DE LA BASE DE DONNEES DONESOL

Si l'utilisateur ne peut pas étudier de profil pédologique ou réaliser de sondage à la tarière dans la surface contributive, il peut avoir recours à la base de données DONESOL (programme IGCS), présentée en Annexe C. Il convient de contacter l'INRA d'Orléans (dominique.arrouays@orleans.inra.fr ; benoit.toutain@orleans.inra.fr) pour prendre connaissance des études pédologiques qui ont pu être réalisées dans la zone considérée et, le cas échéant, de demander à les consulter. La mise en relation avec l'auteur de l'étude est effectuée par l'INRA et selon les études, l'accès aux données peut être gratuit ou payant.

Une fois en possession de l'étude, l'utilisateur peut consulter des informations collectées par l'auteur, notamment sur la présence de tâches d'oxydation ou de réduction dans l'horizon.

L'abondance des tâches d'oxydation de l'horizon, leur couleur, leur forme, leur dimension et leur distribution sont présentées dans les champs ABON_TACH_OXY, COUL_TACH_OXY, DIM_TACH_OXY, FORME_TACH_OXY et DISTRI_TACH_OXY de la table HORIZON.

L'abondance des tâches de réduction de l'horizon, leur couleur, leur forme, leur dimension et leur distribution sont présentées dans les champs ABON_TACH_RED, COUL_TACH_RED, DIM_TACH_RED, FORME_TACH_RED et DISTRI_TACH_RED de la table HORIZON.

Attention : Le Gissol (2009) indique que la présence de tâches d'oxydation n'implique pas « forcément » un engorgement du sol. Celles-ci peuvent simplement être dues à l'altération d'éléments ferrugineux ou de minéraux ferrifères.

Note : Le dictionnaire de données permettant de visualiser le contenu de chaque étude et de comprendre l'organisation de DONESOL est disponible gratuitement sur le site suivant :

http://www.gissol.fr/outil/donesol/dictionnaire-donesol-igcs_2010_09_23.pdf

4.1.4. POTENTIEL DE GENERATION DU RUISSELLEMENT

4.1.4.1. LA THEORIE DU CURVE NUMBER

La méthode du SCS-CN (USDA-SCS, 1972), décrite en Annexe B, permet de déterminer le ruissellement de surface à partir d'un événement pluvieux et des caractéristiques du versant / bassin versant dans lequel il survient. Celle-ci met en jeu un paramètre empirique représentant le potentiel de génération de ruissellement du sol : le **Curve Number (CN)**. **Plus celui-ci est élevé, plus la lame ruisselée est importante.**

La valeur du **Curve Number** dépend **du groupe hydrologique du sol**, de **l'occupation du sol**, des **conditions hydrologiques** et des **conditions d'humidité initiale**.

➤ Groupe hydrologique du sol

Les sols sont répartis en quatre grands groupes en fonction de leur capacité d'infiltration. La perméabilité des sols décroît de la classe A à la classe D et cette dernière présente donc les Curve Numbers les plus élevés.

D'un point de vue de la texture et de la structure des sols, l'USDA-SCS (1972) décrit les quatre grands groupes de la manière suivante :

- Le **groupe A** contient des sols dont le potentiel de génération du ruissellement est très faible même lorsqu'ils sont extrêmement humides. Généralement, ces sols présentent un fort pourcentage de sable (90 %) mais certains sables limoneux, sables argileux, sables argilo-limoneux, sols sableux, limons argileux, limons argilo-sableux, limons sablo-argileux et limons sableux peuvent s'inscrire dans ce groupe s'ils sont bien agrégés et s'ils présentent une faible densité.
- Le **groupe B** contient des sols dont le potentiel de génération du ruissellement est plutôt faible même lorsqu'ils sont extrêmement humides. Généralement, ces sols contiennent 50 à 90 % de sable et 10 à 20 % d'argile (sols sableux, sables limoneux, sables argileux, sables argilo-limoneux). Cependant, certains limons purs, limons argileux, limons, limons sablo-argileux,

limons sableux, limons argilo-sableux et sols argilo-sableux peuvent s’inscrire dans cette classe s’ils sont bien agrégés et s’ils présentent une faible densité.

- Le **groupe C** contient des sols dont le potentiel de génération du ruissellement est plutôt élevé lorsqu’ils sont extrêmement humides. Généralement, ces sols contiennent moins de 50 % de sable et 20 à 40 % d’argile (argiles limoneuses, argiles limono-sableuses, limons argileux, limons argilo-sableux, limons sablo-argileux, limons sableux, sols argilo-sableux). Cependant, certains sols argileux et certaines argiles sableuses peuvent s’inscrire dans cette classe s’ils sont bien agrégés et s’ils présentent une faible densité.
- Le **groupe D** contient des sols dont le potentiel de génération du ruissellement est élevé lorsqu’ils sont extrêmement humides. Généralement, ces sols contiennent moins de 50 % de sable et plus de 40 % d’argile (textures argileuses).

Le Tableau 2 synthétise les informations présentées ci-dessus :

Groupe hydrologique	Potentiel de ruissellement	Texture
A	Minimal	Sable
B	Faible	Sol sableux Sable limoneux Sable argileux Sable argilo-limoneux
C	Moyen	Argile limoneuse Argile limono-sableuse Limon argileux Limon argilo-sableux Limon sablo-argileux Limon sableux Sol argilo-sableux
D	Maximal	Argile

Tableau 2. Caractérisation des groupes hydrologiques de sol.

Toutefois, d’autres caractéristiques telles que la présence d’une couche imperméable ou la présence d’une nappe superficielle influent sur la capacité d’infiltration d’un sol et conditionnent le choix du groupe hydrologique. Par exemple, si un sol sableux contient une nappe superficielle à moins de 50 cm de profondeur, sa capacité d’infiltration se trouve réduite, et l’on peut passer de la classe A à la classe D. De même, si un sol limono-argileux est fortement compacté, il est possible de passer de la classe B à la classe C, voire D, en fonction du degré de compaction et de la diminution de la perméabilité de surface.

Ainsi, **on ne peut déterminer la classe hydrologique d’un sol sur la seule base de sa texture et de sa structure**. Il convient de tenir compte de la profondeur du premier horizon imperméable, de la présence ou non d’une nappe superficielle, de sa profondeur, ainsi que de la capacité d’infiltration du sol. Le Tableau 3 présente la clé de détermination créée par l’USDA-SCS (1972) pour définir le groupe hydrologique d’un sol.

Profondeur de la couche imperméable	Profondeur de la nappe superficielle	Ksat de la couche la moins perméable dans le profil indiqué		Groupe
		Profil	Ksat min	
< 50 cm	-	-	-	D
50 à 100 cm	< 60 cm	0 - 60 cm	> 144 mm/h	A/D
		0 - 60 cm	36 à 144 mm/h	B/D
		0 - 60 cm	3.55 à 36 mm/h	C/D
		0 - 60 cm	< 3.55 mm/h	D
	> 60 cm	0 - 50 cm	> 144 mm/h	A
		0 - 50 cm	36 à 144 mm/h	B
		0 - 50 cm	3.55 à 36 mm/h	C
		0 - 50 cm	< 3.55 mm/h	D
> 100 cm	< 60 cm	0 - 100 cm	36 mm/h	A/D
		0 - 100 cm	14.48 à 36 mm/h	B/D
		0 - 100 cm	1.52 à 14.48 mm/h	C/D
		0 - 100 cm	< 1.52 mm/h	D
	60 à 100 cm	0 - 50 cm	> 144 mm/h	A
		0 - 50 cm	36 à 144 mm/h	B
		0 - 50 cm	3.55 à 36 mm/h	C
		0 - 50 cm	< 3.55 mm/h	D
	> 100 cm	0 - 100 cm	36 mm/h	A
		0 - 100 cm	14.48 à 36 mm/h	B
		0 - 100 cm	1.52 à 14.48 mm/h	C
		0 - 100 cm	< 1.52 mm/h	D

Tableau 3. Clé de détermination du groupe hydrologique d'un sol.

Note : Lorsque deux classes sont proposées à l'utilisateur, il convient de choisir la première si le sol est drainé et la seconde si le sol est non drainé.

➤ L'occupation du sol

L'USDASCS –1972) a déterminé des Curve Numbers type pour une grande variété de couvertures du sol. Y sont inclus :

- les surfaces agricoles, dont :
 - o les cultures à grand écartement (maïs, betteraves, pommes de terre...),
 - o les cultures à petit écartement (blé, orge, avoine...),
 - o les prairies,
 - o les vergers,
 - o les vignes,
- les surfaces urbaines, dont :
 - o les routes, parkings, toits,
 - o les pelouses, parcs, parcours de golf, cimetières,
- les bois et broussailles,
- les régions arides et semi-arides,
- les canes à sucre d'Hawaii,
- les surfaces nues.

➤ Conditions hydrologiques

Les conditions hydrologiques sont fonction d'un certain nombre de facteurs affectant les capacités d'infiltration et le ruissellement, tels que la densité de la canopée des couvertures végétales, le pourcentage de la surface qui est couverte toute l'année, la présence de couverts herbacés ou encore le pourcentage de résidus agricoles jonchant le sol. Selon l'USDA-SCS (1972), les conditions hydrologiques

sont favorables lorsqu'elles encouragent l'infiltration et tendent à réduire le volume ruisselé (forte densité de la canopée, fort pourcentage de la surface couverte toute l'année, important couvert herbacé). A l'inverse, elles sont défavorables lorsqu'elles gênent l'infiltration et tendent à augmenter le ruissellement (faible densité de la canopée, faible pourcentage de la surface couverte toute l'année, absence de ou faible couvert herbacé).

Concernant les prairies et pâturages, les conditions hydrologiques sont dites :

- Favorables, si la végétation couvre plus de 75 % de la surface du sol et que le pacage est faible ou rare,
- Moyennes, si la végétation couvre 50 à 75 % de la surface du sol et que le pacage n'est pas important,
- Défavorables, si la végétation couvre moins de 50 % de la surface du sol ou que le pacage est important et qu'il n'y a pas de paillis.

Concernant les broussailles, les conditions hydrologiques sont dites :

- Favorables, si la végétation couvre plus de 75 % de la surface du sol,
- Moyennes, si la végétation couvre 50 à 75 % de la surface du sol,
- Défavorables, si la végétation couvre moins de 50 % de la surface du sol.

Concernant les surfaces boisées, les conditions hydrologiques sont dites :

- Favorables, si les bois sont protégés du pacage et si les détritiques et la broussaille couvrent le sol,
- Moyennes, si les bois sont sujets au pacage et si une partie des détritiques couvre toujours le sol (non brûlée),
- Défavorables, si les détritiques, petits arbres et la broussaille sont détruits par le pacage ou régulièrement incinérés.

➤ **Conditions d'humidité initiale**

Le choix du Curve Number dépend aussi des conditions d'humidité initiale du sol. Celles-ci peuvent être **sèches (I), moyennes (II) ou humides (III)**. Les valeurs fournies dans le Tableau 4 sont représentatives de conditions d'humidité initiales moyennes (CN_{II}) et les Curve Number CN_I et CN_{III} sont calculés directement par le programme HYETOHYDRO à l'aide des équations présentées en Annexe B.

Le Tableau 4 indique les Curve Numbers définis aux Etats-Unis pour différents types d'occupation du sol pouvant être rencontrés dans la surface contributive. Si l'utilisateur souhaite obtenir des Curve Numbers plus détaillés, notamment pour les zones urbanisées, celui-ci peut se référer au National Engineering Handbook de l'USDA-SCS (1972).

Couverture		Conditions hydrologiques	Groupe hydrologique du sol			
			A	B	C	D
Jachère	Sol nu	-	77	86	91	94
	Résidus au sol	Défavorables	76	85	90	93
		Favorables	74	83	88	90
Grandes cultures	Sol nu	-	77	86	91	94
	Cultures à grand écartement (<i>Row crops</i>)	Défavorables	72	81	88	91
		Favorables	67	78	85	89
	Cultures à petit écartement (<i>Small grain</i>)	Défavorables	65	76	84	88
		Favorables	63	75	83	87
Vignes*		Défavorables	57	72	81	86
		Favorables	34	58	72	79
Vergers*		Défavorables	57	73	82	86
		Moyennes	43	65	76	82
		Favorables	32	58	72	79
Prairies, pâturages		Défavorables	68	79	86	89
		Moyennes	49	69	79	84
		Favorables	39	61	74	80
Broussailles		Défavorables	48	67	77	83
		Moyennes	35	56	70	77
		Favorables	30	48	65	73
Bois		Défavorables	45	66	77	83
		Moyennes	36	60	73	79
		Favorables	30	55	70	77
Zones urbaines (parkings, maisons...)		-	98	98	98	98

* Valeurs composites. A modifier si les proportions végétation ligneuse - végétation herbacée ne sont pas de 50 - 50 %.

Voir le cas des occupations hétérogènes du sol.

Tableau 4. Curve Numbers pour les zones agricoles et urbaines (USDA-SCS, 1972).

4.1.4.2. LA DETERMINATION DU CURVE NUMBER

Le Curve Number doit être déterminé en fonction des caractéristiques du milieu à la saison de transfert des produits phytosanitaires considérée dans le scénario en construction. Il convient de :

- 1) Définir le **groupe hydrologique du sol de la surface contributive** à partir des informations recueillies dans la **section 4.1.3**.
- 2) Définir **l'occupation du sol de la surface contributive** à cette époque de l'année, en :
 - o tenant compte des hétérogénéités et éventuelles rotations culturales,
 - o distinguant les cultures à grand écartement (maïs, betteraves, pommes de terre...), les cultures à petit écartement (blé, orge, avoine...), les vignes, les vergers, les prairies, les broussailles et les bois,
 - o distinguant les applications pré-lévées (sol nu) et post-lévées (sol couvert).
- 3) Définir les conditions hydrologiques en tenant compte de l'ensemble des critères présentés précédemment et du stade de croissance des cultures. Dans ce dernier cas, les conditions sont dites favorables si la végétation est bien développée et défavorables si la végétation en est aux premiers stades de croissance.
- 4) Estimer les conditions d'humidité initiales en fonction de ce qui est le plus probable à la période de l'année considérée et de ce que l'utilisateur souhaite tester. Les trois conditions pouvant être rencontrées toute l'année, il est possible de tester les trois scénarios.

➤ Cas 1 : Occupation homogène du sol

Si l'occupation du sol est homogène, il suffit de sélectionner dans le Tableau 4 le **Curve Number** qui correspond aux caractéristiques du site étudié à la période de transfert des produits phytosanitaires considérée.

➤ **Cas 2 : Occupation hétérogène du sol**

Dans la majeure partie des cas, l'occupation du sol de la surface contributive sera hétérogène. Une partie de la surface pourra être occupée par des parcelles agricoles et une autre par des prairies, bois, broussailles, ou encore des aménagements urbains. Dans ce cas, il convient d'estimer la surface couverte par chacun de ces types d'occupation et de calculer un **Curve Number composite**.

Calcul d'un Curve Number composite – Exemple :

a. Culture grand écartement (28%)	b. Bois (22%)	La surface contributive est couverte à 43 % de cultures à petit écartement ($CN_{II d} = 88$), à 28 % de cultures à grand écartement ($CN_{II a} = 91$), à 22 % de bois ($CN_{II b} = 83$) et à 7 % d'aménagements urbains ($CN_{II c} = 98$).
	c. Maisons (7%)	
d. Culture petit écartement (43%)		Le Curve Number composite de cette surface est : $CN_{II} = 0.28 * CN_{II a} + 0.22 * CN_{II b} + 0.07 * CN_{II c} + 0.43 * CN_{II d} = 88$

 **Cas des vignes et des vergers**

Comme il est précisé sous le Tableau 4, les Curve Numbers définis pour les vergers et les vignes sont des valeurs composites calculées en supposant que les végétaux ligneux couvrent 50 % de la surface du sol et que les 50 % restants sont couverts d'herbe (USDA-SCS, 1972). Toutefois, cette situation n'est pas systématique et il est possible que le Curve Number associé aux vignes ou vergers doive être recalculé en fonction de la couverture du sol. Les inter-rangs des vignes n'étant pas souvent enherbés, il peut s'avérer nécessaire de calculer un Curve Number composite à partir de celui associé aux végétaux ligneux et celui associé au sol nu. Il en est de même pour les vergers ou toute répartition différente de la suivante : 50 % de couvert ligneux – 50 % de couvert herbacé.

Important : Le Curve Number est un paramètre très sensible et une légère variation de sa valeur peut entraîner une forte variation du volume ruisselé.

Le Curve Number est un paramètre empirique extrêmement sensible et il convient donc de le choisir avec soin. Toutefois, ceux-ci ayant été déterminés à partir de mesures sur le territoire américain, il est possible qu'ils ne soient pas toujours adaptés aux conditions Européennes.

(Martin, Ouvry et al. 2009) ont montré que les Curve Numbers fournis dans le Tableau 1 pouvaient en effet être sous-estimés de plusieurs points pour certains sites français et ce, surtout lorsque les événements pluvieux étudiés présentent une faible période de retour. Sur la Morcille et la Jaillière, où nous disposons de données de terrain, les Curve Numbers calculés sont également plus grands que ceux fournis dans le Tableau 4 (5 à 10 points).

Ainsi, **il est fortement recommandé à l'utilisateur d'augmenter la valeur du Curve Number de 5 à 10 points en fonction des caractéristiques du site étudié et des connaissances qu'il a du ruissellement. Par défaut, nous conseillons d'augmenter le CN de 10 points.**

4.1.5. EVENEMENT PLUVIEUX

Pour le dimensionnement des zones tampons, on s'intéresse aux événements pluvieux courants (de faible période de retour*) qui interviennent peu de temps après la période de traitement des cultures. Il convient de sélectionner un (ou plusieurs) événement(s) pluvieux représentatif(s) de la région d'étude pendant la saison de transfert des produits phytosanitaires dont le scénario fait l'objet.

◆ METHODE 1 : MESURES DE TERRAIN

Si l'utilisateur dispose de données pluviométriques enregistrées sur une station proche de la zone d'implantation de la zone tampon, celles-ci peuvent être utilisées pour caractériser les types d'événements pluvieux survenant dans la région au cours de la saison étudiée.

◆ METHODE 2 : SIMULATION

Si l'utilisateur ne dispose pas de données pluviométriques, il peut utiliser le programme **HYETOHYDRO** fourni dans le package « **Zone tampon** » et décrit en Annexe E. Celui-ci a été conçu notamment pour simuler des hyétoigrammes* et utilise des données d'Intensité-Durée-Fréquence (IDF) fournies par le bureau d'études Hydris Hydrologie (<http://www.hydris-hydrologie.fr/index.html>).

Cet utilitaire intègre les Intensités-Durée-Fréquence saisonnalisées calculées sur la France métropolitaine et la Corse, en tout point (taille des pixels de 16 km²), pour une période de retour de 1 an (saisonalisé) et des durées de 1 à 48 heures. En d'autres termes, pour chaque pixel de 16 km², et chaque saison (hiver – décembre à mai- et été –juin à novembre-), HyetoHydro fournit l'intensité pluvieuse qui a une chance par année de se produire ou d'être dépassée pendant la saison considérée, pour chaque durée de 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24 ou 48 heures. Pour un climat qui serait équivalent en été et hiver, cela revient donc à une période de retour de 6 mois : le choix d'événements très courants est motivé par le fait que l'on cherche à dimensionner les zones tampons pour des événements non extrêmes (du point de vue hydrologique, le risque lié aux événements ruisselants dépend également de la concentration en pesticides dans le ruissellement). La Figure 17 illustre la cartographie des quantiles calculés, pour des durées de 1 heure (en haut) ou en 24 heures (en bas), en hiver (à gauche) ou en été (à droite).

Le logiciel HYETOHYDRO doit impérativement être ouvert sous OpenOffice (version 3). Il faut accepter d'activer les Macros à l'ouverture du fichier.

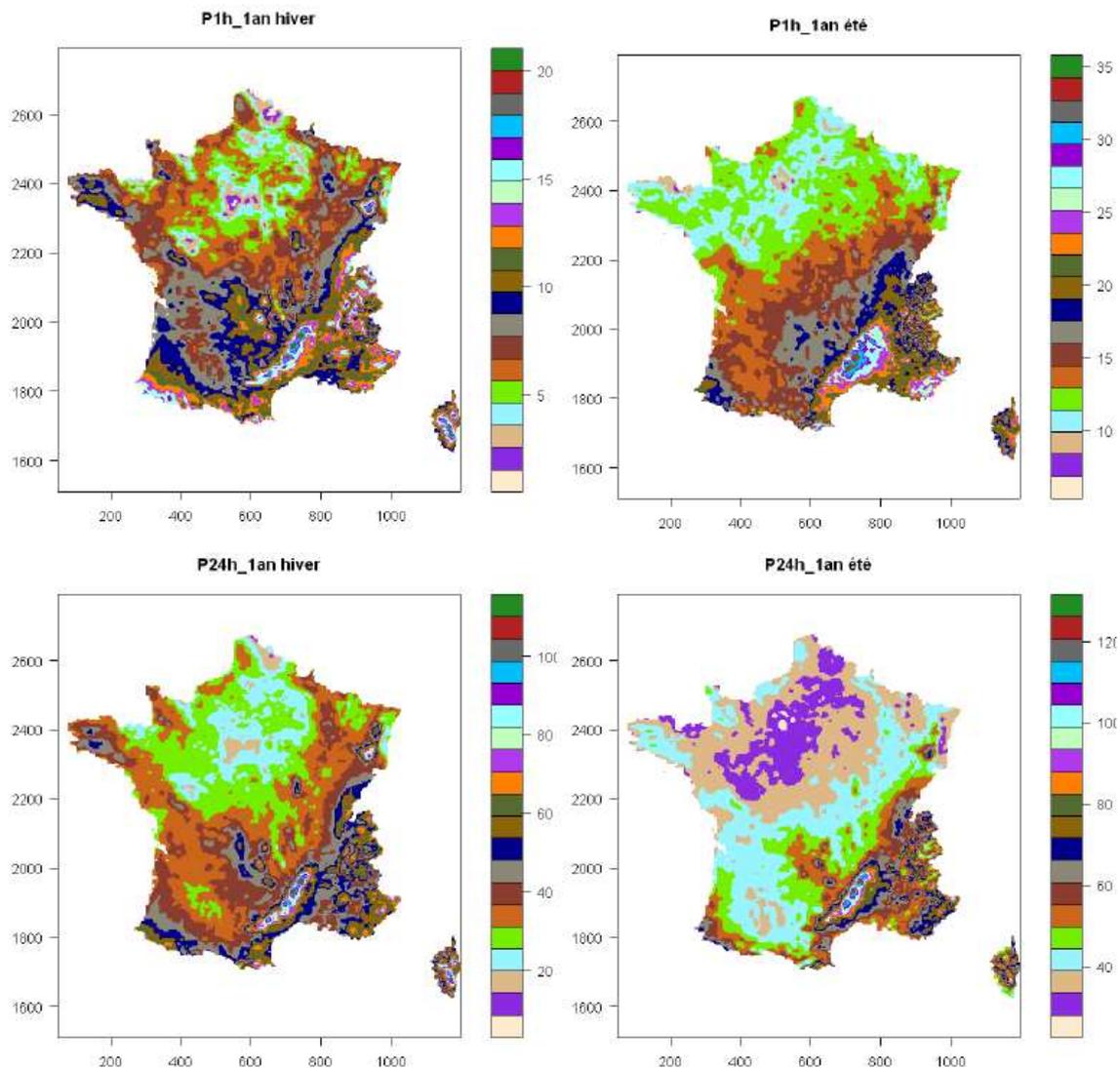


Figure 17. Cartographie des quantiles relatifs aux durées 1h et 24h.

Pour simuler un événement pluvieux à l'aide de HYETOHYDRO, l'utilisateur doit :

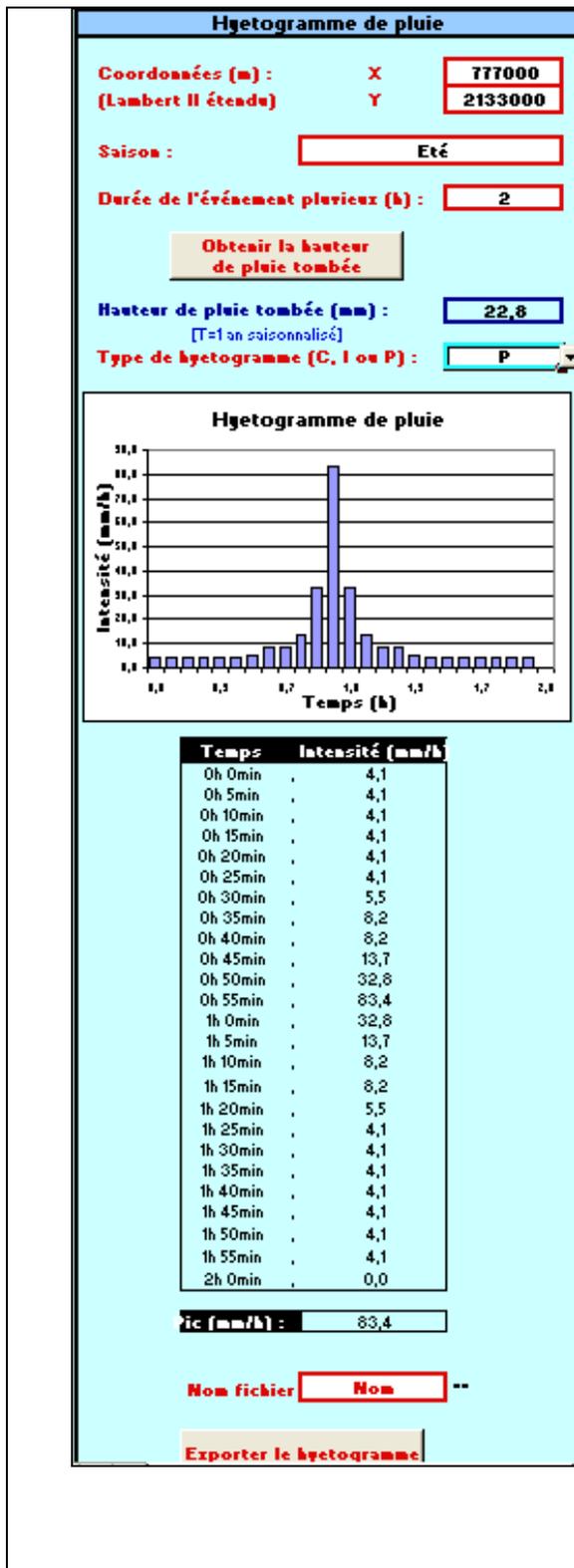
1. Ouvrir le fichier Excel HYETOHYDRO qui se trouve dans le sous-dossier « Cemagref » du dossier « vfsmod-w ». « Activer les macros » et **sélectionner l'onglet « Scénarios pluie et ruissellement »**.
2. Utiliser la partie gauche de l'interface du programme qui est destinée à la construction du hyétogramme de pluie. La partie droite a été conçue pour construire des hydrogrammes de ruissellement et sera utilisée à l'étape suivante.
3. Renseigner les coordonnées de la zone considérée (Lambert II étendu).
4. Sélectionner la saison « Eté » ou « Hiver » dans le menu déroulant du programme HYETOHYDRO (Figure 18) en fonction de la période de transfert des produits phytosanitaires qui est étudiée. Comme indiqué précédemment, si la période de transfert se situe entre décembre et mai, alors il convient de sélectionner la saison « Hiver ». Sinon, si la période de transfert se situe entre juin et novembre, alors il convient de sélectionner la saison « Eté ».
5. Sélectionner la durée de l'évènement pluvieux à représenter dans le menu déroulant du programme HYETOHYDRO prévu à cet effet (Figure 18). De manière générale, on peut avoir recours à des durées plutôt courtes en été (1 à 2 heures) et des durées plus longues en hiver (12 à 24 heures). Cependant, ces valeurs sont à adapter selon les connaissances que l'on a du climat local.

6. Cliquer sur l'onglet « obtenir la hauteur de pluie tombée », la hauteur de pluie correspondant s'affiche en dessous.
7. Choisir la forme du hyétogramme en fonction du type d'évènement à représenter (Annexe E) et la sélectionner dans le menu déroulant prévu à cet effet (Figure 18). On recommande l'utilisation de la forme P (« Pic ») pour des évènements de courte durée (1 à 2 heures) alors que la forme C (« Créneau ») est à utiliser pour des évènements de longue durée (12 à 48 heures). La forme I (« Intermédiaire ») peut être utilisée pour des durées de 2 à 6 heures.
8. Lorsque l'ensemble de ces paramètres est renseigné, le hyétogramme de pluie est construit et les valeurs qui lui sont associées sont visibles en dessous (Figure 18).
9. Pour exporter les données obtenues vers un fichier texte (.irn) compatible avec VFSMOD , il suffit de :
 - Nommer le fichier texte qui va être créé et utilisé dans VFSMOD (Figure 18).
 - Cliquer sur le bouton « Exporter le hyétogramme » en bas de l'interface (Figure 18) et cliquer sur « OK » pour remplacer le fichier Excel utilisé (cela rafraîchit le programme).

Le fichier texte (.irn) créé est directement copié dans le sous-dossier « inputs » du dossier « vfsmod-w » et est prêt à l'emploi.

Important : Si l'utilisateur souhaite tester l'efficacité de la zone tampon pour des évènements pluvieux de période de retour différente, il peut s'adresser à Hydris Hydrologie (<http://www.hydris-hydrologie.fr>).

Si l'utilisateur a recours à d'autres données, alors il devra construire lui-même son hyétogramme de pluie dans l'onglet « Scénario ruissellement seul ».



← Coordonnées Lambert II étendu d'un point de la zone considérée

← Zone de sélection de la saison

← Zone de sélection de la durée de la pluie

← Hauteur de pluie correspondant (cf. IDF)

← Zone de sélection de la forme du hyetogramme

← Graphique présentant la répartition de la pluie dans le temps en fonction des paramètres d'entrée définis

← Tableau présentant les couples Temps – Intensité pluvieuse qui permettent de construire le graphique ci-dessus.

Ces valeurs sont à incrémenter dans VFSMOD.

← Intensité maximale de l'événement pluvieux. *Cette valeur est à incrémenter dans VFSMOD.*

← Zone de renseignement du nom du fichier texte créé

← Bouton permettant d'exporter les données précédentes vers un fichier texte alimentant VFSMOD.

Figure 18. Interface du programme HyetoHydro pour la construction des hyetogrammes de pluie.

Note : VFSMOD dispose d'un module nommé « Hydrogramme Unitaire » permettant aussi de simuler des évènements pluvieux. Celui-ci s'appuie sur l'analyse de données pluviométriques américaines et, s'il le souhaite, l'utilisateur peut avoir recours à ce module en suivant la procédure décrite en Annexe F.

4.1.6. RUISSELLEMENT SORTANT DE LA SURFACE CONTRIBUTIVE

Le ruissellement entrant dans la zone tampon doit être caractéristique du site étudié, de la saison d'application des produits phytosanitaires considérée et être lié à l'événement pluvieux sélectionné pour le scénario.

◆ METHODE 1 : MESURES DE TERRAIN

Si l'utilisateur dispose de données de ruissellement enregistrées à l'exutoire de la surface contributive et associées à l'événement pluvieux naturel sélectionné précédemment, celui-ci peut les utiliser pour caractériser le ruissellement entrant dans la zone tampon.

◆ METHODE 2 : SIMULATION

Si l'utilisateur ne dispose pas de données enregistrées, il peut utiliser le programme HYETOHYDRO fourni dans le package « Zone tampon » et décrit en Annexe E. Celui-ci a été conçu notamment pour simuler des hydrogrammes de ruissellement et utilise pour entrée des hyétogrammes construits (Onglet « Scénarios pluie et ruissellement ») ou des hyétogrammes renseignés par l'utilisateur (Onglet « Scénario ruissellement seul »).

Le logiciel HYETOHYDRO doit impérativement être ouvert sous OpenOffice (version 3). Il faut accepter d'activer les Macros à l'ouverture du fichier.

Pour simuler un événement ruisselant à l'aide de HYETOHYDRO, l'utilisateur doit :

1. Ouvrir le programme HYETOHYDRO qui se trouve dans le sous-dossier « Cemagref » du dossier « vfsmod-w » et « Activer les macros ».
2. Sélectionner l'onglet « Scénarios pluie et ruissellement » si le hyétogramme de pluie a été construit à l'aide du programme HYETOHYDRO comme indiqué dans le paragraphe 4.1.5). Sélectionner l'onglet « Scénario ruissellement seul » si :
 - le hyétogramme de pluie a été sélectionné à partir des données pluviométriques enregistrées sur le site d'étude et que l'hydrogramme de ruissellement associé n'a pas été mesuré,
 - si l'utilisateur a recours à des données d'Intensité-Durée-Fréquence différentes de celles fournies dans HYETOHYDRO.
3. Si l'onglet sélectionné est « **Scénarios pluie et ruissellement** », alors l'utilisateur doit ouvrir le fichier créé lors de la construction de son hyétogramme de pluie (paragraphe 4.1.5). Ce dernier servira d'entrée pour la construction de l'hydrogramme de ruissellement. Si l'onglet sélectionné est « **Scénario ruissellement seul** », alors l'utilisateur doit :
 - Indiquer la durée de l'événement pluvieux qu'il a sélectionné dans l'encart prévu à cet effet (Figure 23).
 - Pour chaque intervalle de temps imposé par le programme (voir Annexe E), indiquer l'intensité pluvieuse correspondante dans les encarts prévus à cet effet (Figure 23).
 - Visualiser le hyétogramme de pluie nette construit en dessous des paramètres d'entrée et exporter les données vers un fichier texte (.irn) compatible avec VFSMOD en cliquant sur le bouton « Exporter le hyétogramme » (Figure 19).
4. Utiliser la partie droite de l'interface du programme qui est destinée à la construction de l'hydrogramme de ruissellement.
5. Renseigner le Curve Number associé à la surface contributive (déterminé à l'aide des indications fournies dans le paragraphe 4.1.4) dans l'encart prévu à cet effet (Figure 20).

6. Indiquer les conditions d'humidité initiales testées dans l'encart prévu à cet effet (Figure 20). On rappelle que I désigne des conditions initiales sèches, II des conditions initiales moyennes et III des conditions initiales humides.

Important : Le Curve Number révisé, la pluie nette calculée et le coefficient de ruissellement associé sont présentés en bleu sous ces paramètres d'entrée. **Si l'utilisateur juge les résultats peu représentatifs de son site d'étude, il peut moduler le Curve Number pour obtenir les résultats escomptés.**

7. Renseigner l'aire de la surface contributive, sa longueur maximale et sa pente transversale moyenne (déterminées à l'aide des indications fournies dans le paragraphe 4.1.1) dans les encarts prévus à cet effet (Figure 20).
8. Cliquer sur le bouton « Construire l'hydrogramme » sous les derniers paramètres d'entrée. Ceci permet de remplir le tableau de valeurs Temps-Débit situé à droite des paramètres d'entrée et de construire l'hydrogramme de ruissellement associé situé en bas de l'interface (Figure 20).
9. Pour exporter les données obtenues vers un fichier texte (.iro) compatible avec VFSSMOD, il suffit de :
 - Nommer le fichier texte qui va être créé et utilisé dans VFSSMOD (Figure 20).
 - Cliquer sur le bouton « Exporter l'hydrogramme » (Figure 20) et cliquer sur « OK » pour remplacer le fichier Excel utilisé (pour rafraîchir le programme).

Le fichier texte (.iro) créé est directement copié dans le sous-dossier « Input » du dossier « vfmmod-w » et est prêt à l'emploi.

Hyetogramme de pluie

Durée de l'événement pluvieux (h) : 3,00

Temps	Intensité (mm/h)
0h 0min	0,0
0h 8min	2,0
0h 15min	3,0
0h 23min	3,0
0h 30min	3,0
0h 38min	4,0
0h 45min	5,0
0h 53min	5,0
1h 0min	6,0
1h 8min	7,0
1h 15min	7,0
1h 23min	6,0
1h 30min	5,0
1h 38min	4,0
1h 45min	3,0
1h 53min	2,0
2h 0min	1,0
2h 8min	1,0
2h 15min	1,0
2h 23min	1,0
2h 30min	1,0
2h 38min	1,0
2h 45min	1,0
2h 53min	1,0
3h 0min	0,5

Pic (mm/h) : 7,0

Hyetogramme de pluie

Nom fichier : Nom **

Exporter le hyetogramme

⇐ Zone de renseignement de l'intensité pluvieuse moyenne associée à chaque intervalle de temps défini.
Les valeurs contenues dans le tableau Temps – Intensité pluvieuse sont à incrémenter dans VFSMOD-Dim.

⇐ Intensité maximale de l'événement pluvieux.
Cette valeur est à incrémenter dans VFSMOD-Dim.

⇐ Graphique présentant la répartition de la pluie dans le temps.

⇐ Bouton permettant d'exporter les données relatives au hyetogramme de pluie vers un fichier texte alimentant VFSMOD-Dim.

Figure 19. Interface du programme HyetoHydro pour renseigner soi-même le hyetogramme de pluie.

Zone de renseignement du Curve Number associé à la surface drainée ⇒
 Zone de sélection des conditions d'humidité initiales du sol. ⇒
 Curve Number recalculé à partir des conditions d'humidité ⇒
 Pluie nette et coefficient de ruissellement déterminés à partir de la pluie et du Curve Number révisé.

HyétoGramme de pluie nette construit à l'aide des équations de (Chow, Maidment et al. 1988) (voir Annexe F). ⇒

Zone de renseignement de la surface drainée ⇒
 Zone de renseignement de la longueur maximale ⇒
 Zone de renseignement de la pente transversale moyenne ⇒
 Bouton permettant de construire l'hydrogramme ⇒

Graphique présentant ⇒ l'hydrogramme de ruissellement construit
 (Sur la droite, tableau présentant les couples Temps-Débit à incrémenter dans VFSMOD-Dim).

Débit de ruissellement maximal durant l'événement. ⇒

Bouton permettant d'exporter les données requises vers VFSMOD-Dim. ⇒

Hydrogramme de ruissellement

Curve Number CN_{II} :

Conditions d'humidité (I,II ou III) :

Curve Number révisé CN :

Pluie nette (mm) :

Coefficient de ruissellement (%) :

Temps	Débit (mm/h)
0h 0min	0,000000
0h 3min	0,000000
0h 5min	0,000000
0h 7min	0,000000
0h 8min	0,000000
0h 10min	0,000000
0h 10min	0,000000
0h 12min	0,000000
0h 13min	0,000000
0h 14min	0,000000
0h 15min	0,000000
0h 15min	0,000000
0h 17min	0,000000
0h 17min	0,000000
0h 18min	0,000000
0h 19min	0,000000
0h 20min	0,000000
0h 20min	0,000000
0h 22min	0,000000
0h 22min	0,000000
0h 23min	0,000000
0h 24min	0,000000
0h 25min	0,000000
0h 25min	0,000000
0h 27min	0,000000
0h 27min	0,000000
0h 27min	0,000000
0h 28min	0,000000
0h 29min	0,000000
0h 30min	0,000000
0h 30min	0,000000
0h 32min	0,000000
0h 32min	0,000000
0h 33min	0,000000
0h 34min	0,000000
0h 35min	0,000000
0h 35min	0,000000
0h 37min	0,000000
0h 37min	0,000000
0h 38min	0,000000
0h 39min	0,000000
0h 40min	0,000000
0h 40min	0,000000
0h 42min	0,000000
0h 42min	0,000000
0h 43min	0,000000
0h 44min	0,000000
0h 45min	0,000000
0h 45min	0,074186
0h 47min	0,433324
0h 47min	0,507510
0h 48min	0,792461
0h 49min	0,736821
0h 50min	0,523108
0h 50min	1,171239
0h 52min	4,308845
0h 52min	4,997778
0h 53min	7,842978

Surface contributive (m²) :

Longueur de la surface contributive :

Pente de la surface contributive (%) :

Construire l'hydrogramme

Pic (mm/h) :

Nom fichier : **Nom :**

Exporter l'hydrogramme

Figure 20. Interface du programme HyetoHydro pour la construction d'hydrogrammes de ruissellement.

Note : VFSMOD dispose d'un module nommé « Hydrogramme Unitaire » permettant aussi de simuler des évènements ruisselants à l'aide de la méthode du SCS-CN. S'il souhaite utiliser directement ce module sans visualiser les étapes et les hypothèses émises pour la construction des hydrogrammes, alors l'utilisateur peut suivre la procédure décrite en Annexe F.

42

4.2. Zone Tampon enherbée ou boisée

4.2.1. LONGUEUR ET PENTE DE LA ZONE TAMPON

On rappelle que la **longueur de la zone tampon** est perpendiculaire au sens de l'écoulement et qu'elle doit avoir été définie préalablement lors du positionnement de la zone tampon. Cependant, pour évaluer l'efficacité de la zone tampon à l'aide de VFSSMOD, il convient de tenir compte de la concentration du ruissellement qui peut réduire la surface de contact entre l'eau et le dispositif enherbé ou boisé.

Dans le cas d'écoulements diffus, où le ruissellement est réparti uniformément sur la longueur de la zone tampon, la valeur à retenir est bien celle définie pour l'implantation du dispositif enherbé ou boisé (Figure 21). Dans le cas d'écoulements concentrés, où le ruissellement traverse la zone tampon en une zone réduite bien définie, il convient de prendre pour longueur de zone tampon la largeur effective de l'écoulement (Figure 21).

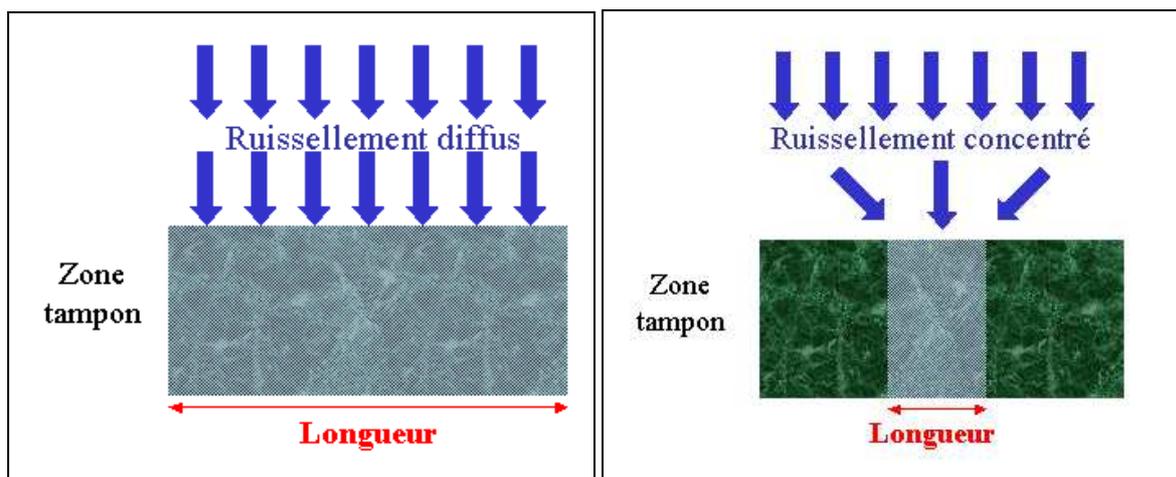


Figure 21. Longueur de la zone tampon à considérer en fonction de la concentration du ruissellement.

♦ METHODE 1 : MESURES DE TERRAIN

La longueur « effective » de la zone tampon peut être déterminée sur le terrain en cherchant des marqueurs de la concentration du ruissellement tels que des zones d'herbe couchées sous l'effet du passage d'une forte lame d'eau ou des zones caractérisées par un important dépôt de sédiments.

Si de tels artefacts sont observés, alors il convient d'en mesurer la longueur (perpendiculaire au sens de l'écoulement) et de retenir cette valeur pour la modélisation. Si l'utilisateur n'observe pas d'artefacts de la concentration du ruissellement, alors il peut retenir comme valeur la longueur de zone tampon définie lors de la phase de positionnement.

L'utilisateur peut ensuite déterminer la **pente transversale de la zone tampon** sur le terrain en se servant de points topographiques ou en utilisant une boussole.

♦ METHODE 2 : UTILISATION D'OUTILS SIG

Si l'utilisateur ne peut se rendre sur le terrain pour détecter une possible concentration du ruissellement, celle-ci peut être décelée à l'aide d'HydroDem. L'une des sorties du modèle présente un profil de la surface drainée interceptée par chaque segment de la zone tampon (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**). Ainsi, il est possible de localiser les points de concentration du ruissellement et de déterminer la longueur « effective » de la zone tampon (en multipliant le nombre de pixels impliqués par la longueur d'un pixel, qui dépend de la résolution du MNT).

La pente transversale moyenne de la zone tampon peut également être obtenue en consultant les variables de sortie fournies par HydroDem lors de la digitalisation de la zone tampon.

Attention : Dans le cas de ruissellements concentrés, on réduit la longueur de la zone tampon pour modéliser son efficacité mais il n'est pas question d'en faire autant sur le terrain lors de

l'implantation du dispositif enherbé ou boisé. Celui-ci doit être implanté sur toute la longueur prévue par les résultats du diagnostic de bassin versant réalisé et la largeur peut être augmentée (selon les résultats du modèle) au niveau de la zone de concentration du ruissellement. Il est également possible de mettre en place des dispositifs tels que les banquettes d'adsorption-diffusion ou les fascines végétales, qui permettent la diffusion du ruissellement (CORPEN, 2007).

4.2.2. PROPRIETES D'INFILTRATION DU SOL DE LA ZONE TAMPON

4.2.2.1. PRESENCE D'UNE NAPPE SUPERFICIELLE

Les moyens à mettre en œuvre pour détecter la présence d'une nappe superficielle sous la zone tampon sont identiques à ceux présentés pour détecter une nappe superficielle au niveau de la surface contributive (voir paragraphe 4.1.3).

4.2.2.2. CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A SATURATION

La conductivité hydraulique à saturation du sol de la zone tampon est le paramètre le plus sensible du modèle (Muñoz-Carpena, Parsons et al. 1999). Il convient donc de lui attribuer une valeur qui est aussi proche que possible de la réalité. Pour tenir compte de la présence d'un mat racinaire dans les bandes enherbées ou boisées, deux horizons distincts sont considérés dans VFSMOD (Figure 22).

Le premier représente la zone racinaire de la zone tampon qui a une perméabilité beaucoup plus importante que le reste du sol (réseau racinaire, trous de ver...). C'est elle qui confère à la zone tampon son pouvoir d'infiltration du ruissellement lors d'évènements pluvieux courants. D'après les experts, cet horizon a une profondeur qui varie entre 12 et 15 cm dans les bandes enherbées et qui peut atteindre 40 cm de profondeur dans les bandes boisées. Pour simplifier les calculs dans le modèle numérique, on peut considérer que la limite inférieure de cet horizon se situe à 15 cm de profondeur.

Le second représente les couches de sol situées sous la zone racinaire. Pour simplifier les calculs, on considère que cette partie du sol est homogène et que la conductivité hydraulique à saturation fournie est représentative de l'ensemble du profil.

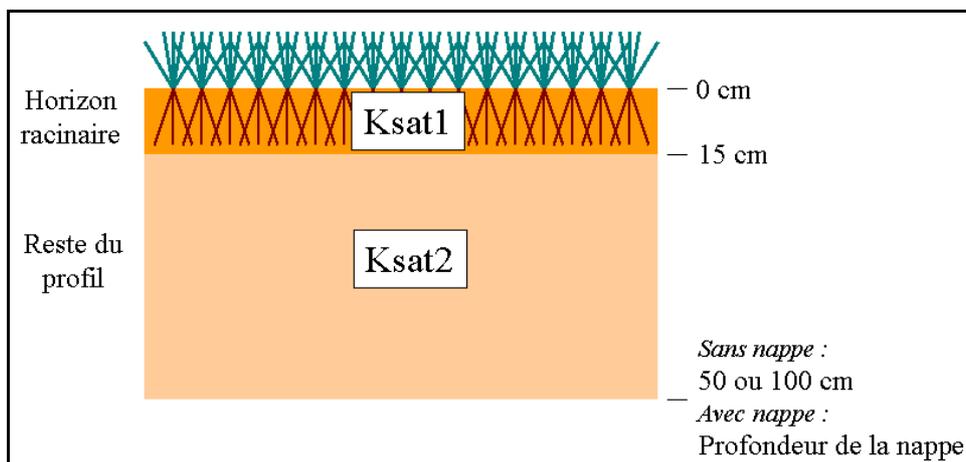


Figure 22. Profil de sol de la zone tampon considéré dans VFSMOD.

L'utilisateur doit estimer la conductivité hydraulique à saturation ainsi que la profondeur de la limite inférieure de ces deux couches. Une moyenne harmonique est alors calculée par le modèle pour obtenir une conductivité hydraulique représentative du profil selon l'équation suivante (Bouwer 1969) :

$$K_s = \frac{H_1 + H_2}{\frac{H_1}{K_{sat_1}} + \frac{H_2}{K_{sat_2}}}$$

➤ Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire

◆ METHODE 1 : MESURES DE TERRAIN

L'utilisateur peut mesurer la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire de la zone tampon à l'aide de la méthode de Müntz. (Cf 4.1.3.1. Conductivité hydraulique à saturation).

◆ METHODE 2 : DONNEES D'EXPERTS

S'il ne peut mesurer la conductivité hydraulique à saturation du premier horizon de la zone tampon sur le terrain, l'utilisateur peut consulter les ordres de grandeur de perméabilité mesurée sur différents types de sol et rapportés par les experts (Tableau 5). Ces valeurs valent au moins pour les 15 premiers centimètres de sol, sous réserve que la zone tampon soit en place depuis quelques années. Ensuite, on considère que les horizons plus profonds ont approximativement les mêmes caractéristiques que les sols cultivés environnants. Cette hypothèse conduit probablement à sous estimer la conductivité hydraulique à saturation des horizons sous jacents (présence de racines, activité biologique ...).

Remarque : S'il s'agit de l'implantation d'une nouvelle bande enherbée, pour les premières années de fonctionnement de la bande, la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon de la bande sera plus proche de celle des sols cultivés avoisinants que des valeurs indiquées ci-dessous. Se reporter alors au paragraphe 4.1.3.1 pour estimer l'efficacité initiale de la zone tampon.

Type de zone tampon	Type de sol	Conductivité hydraulique à saturation (mm/h)
Enherbé	Limoneux	100
	Sableux	400
Boisé	Limoneux	≥ 100
	Sableux	≥ 400

Tableau 5. Conductivités hydrauliques moyennes du premier horizon des zones tampons enherbées et boisées en fonction du type de sol.

➤ Conductivité hydraulique à saturation du reste du profil

La conductivité hydraulique à saturation du reste du profil peut être estimée à l'aide des mêmes méthodes que celles proposées pour la surface contributive (paragraphe 4.1.3.1) :

- par des mesures directes,
- en consultant la base de données DONESOL,
- en utilisant des règles de pédo-transfert.

Notons que pour ces deux dernières solutions (utilisation base DONESOL et fonctions de pédotransfert, on a également accès à d'autres valeurs qui sont nécessaires à l'utilisation de VFSSMOD, et qu'il convient donc de noter pour gagner en efficacité : **teneur en eau à saturation*** ; **capacité au champ*** ; **triplets [teneur en eau – potentiel matriciel* – conductivité hydraulique]** pour une gamme de teneurs en eau allant de la teneur en eau résiduelle* à la teneur en eau à saturation. Ces dernières données ne sont toutefois nécessaires qu'en cas de présence d'une nappe superficielle sous la zone tampon. Voir l'organigramme Figure 23

L'utilisateur doit ensuite renseigner la profondeur de la limite inférieure de la deuxième couche de sol considérée.

- ◆ En l'absence de nappe superficielle, on peut recommander à l'utilisateur de prendre une profondeur totale de 100 cm pour des sols à texture grossière (sableux) et de 50 cm pour des sols à texture plus fine (argileux ou limoneux). Selon (Salvucci and Entekhabi 1995), c'est en effet la profondeur atteinte par le front d'humidité au bout de 3 à 4 heures de pluie.

♦ En présence d'une nappe superficielle, il convient de prendre pour profondeur celle du toit de la nappe superficielle.

Attention : Il convient de tenir compte de la compaction du sol de la zone tampon dans l'estimation de la conductivité hydraulique à saturation. Si la zone tampon est le siège de passages d'engins agricoles qui provoquent le tassement du sol, alors sa capacité d'infiltration sera diminuée (cette diminution peut aller jusqu'à un facteur 10 sur la zone tassée).

Important : Une moyenne harmonique des conductivités hydrauliques à saturation des deux couches considérées peut ne pas être totalement représentative de la dynamique au sein des bandes enherbées ou boisées. Le pouvoir d'infiltration simulé peut en effet être fortement diminué au début de l'événement pluvieux par rapport à la perméabilité réelle de l'horizon racinaire. Cependant, ce point sera amélioré dans une version ultérieure du modèle.

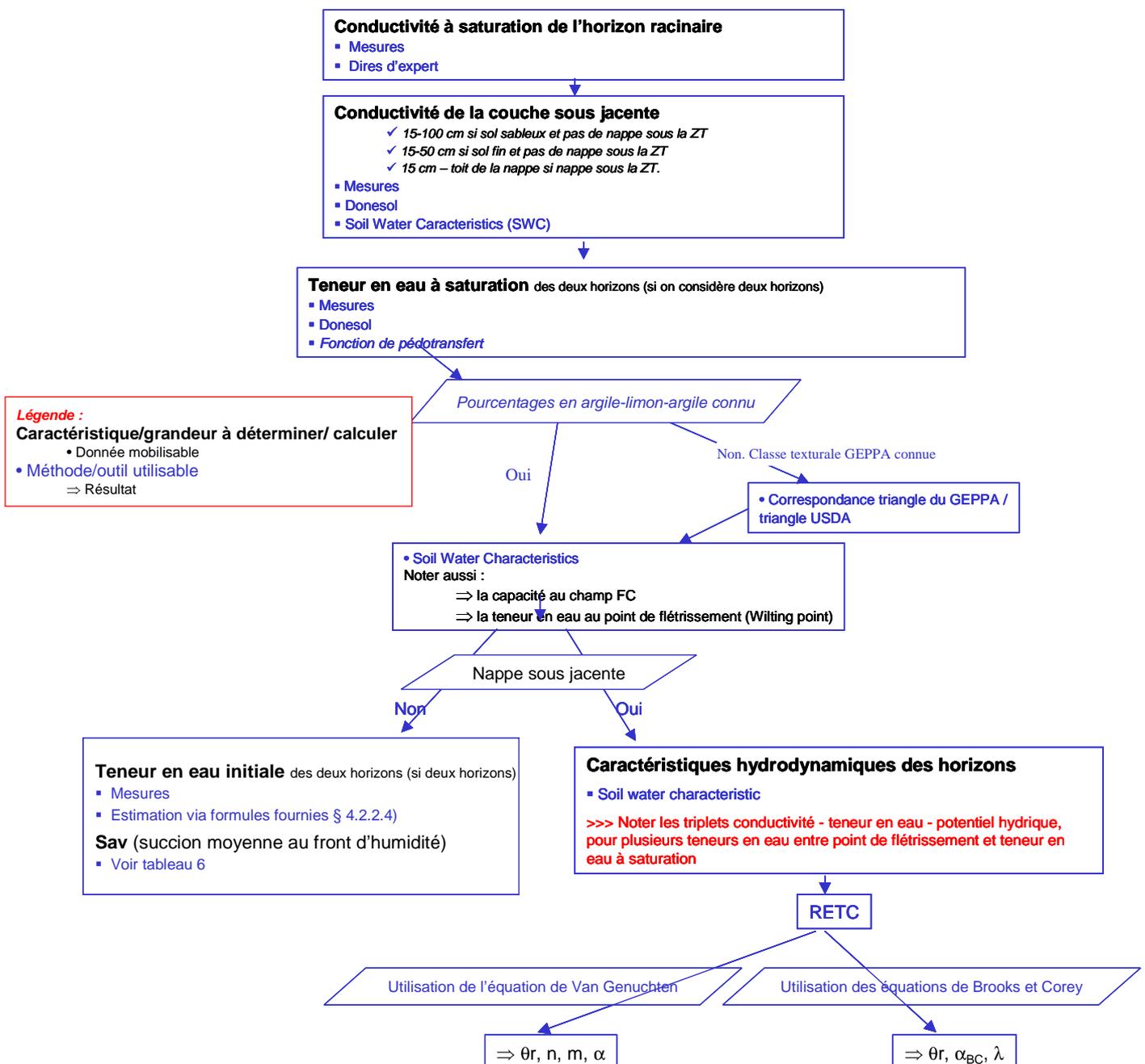


Figure 23 : Récapitulatif des paramètres relatifs au sol de la bande enherbée à renseigner et des outils mobilisables, selon qu'une nappe est ou non présente.

4.2.2.3. TENEUR EN EAU A SATURATION

La teneur en eau à saturation d'un sol correspond à sa porosité. Celle-ci est égale au volume des vides divisé par le volume total de la roche. Il existe différents moyens pour déterminer la porosité du sol de la zone tampon et quelques-uns sont présentés ci-dessous.

Selon la description que l'on fait du sol (un ou deux horizons), les différents paramètres sont, logiquement, à déterminer pour un ou deux horizons.

◆ METHODE 1 : MESURES

L'utilisateur peut prélever les échantillons de sol dans la zone tampon et, pour chaque échantillon, déterminer son volume total et le volume des vides (ou des particules solides) au laboratoire (méthode d'immersion, méthode de la poussée d'Archimède...).

◆ METHODE 2 : UTILISATION DE REGLES DE PEDO-TRANSFERT

Si l'utilisateur ne peut mesurer la porosité d'échantillons prélevés sur le site de la zone tampon, alors il peut avoir recours à des règles de pédo-transfert permettant d'estimer la porosité d'un sol à partir de sa texture.

Différentes méthodes de détermination de la granulométrie et texture d'un sol sont proposées en Annexe D.

Cas 1 : L'utilisateur connaît les pourcentages d'argile, de limon et de sable

L'utilisateur peut :

- 1) Télécharger gratuitement le logiciel « Soil Water Characteristics » à l'adresse suivante : <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/newregistration.html>. Choisir Units/Metric dans le menu « Options ».
- 1) Renseigner les pourcentages d'argile et de sable du sol de la zone tampon dans les espaces prévus à cet effet sur la partie gauche de la fenêtre (Figure 24).
- 2) Renseigner le pourcentage de matière organique contenu dans le sol de la zone tampon dans l'encart prévu à cet effet sur la partie droite de la fenêtre (Figure 24).
- 3) Indiquer le degré de compaction du sol dans l'encart prévu à cet effet sur la partie droite de la fenêtre (Figure 24). Si la zone tampon est utilisée pour le passage des engins agricoles, alors il convient de sélectionner « Dense », « Hard » ou « Sever » selon le degré de tassement induit.
- 4) Visualiser la teneur en eau à saturation définie en haut à droite la fenêtre (Figure 24).

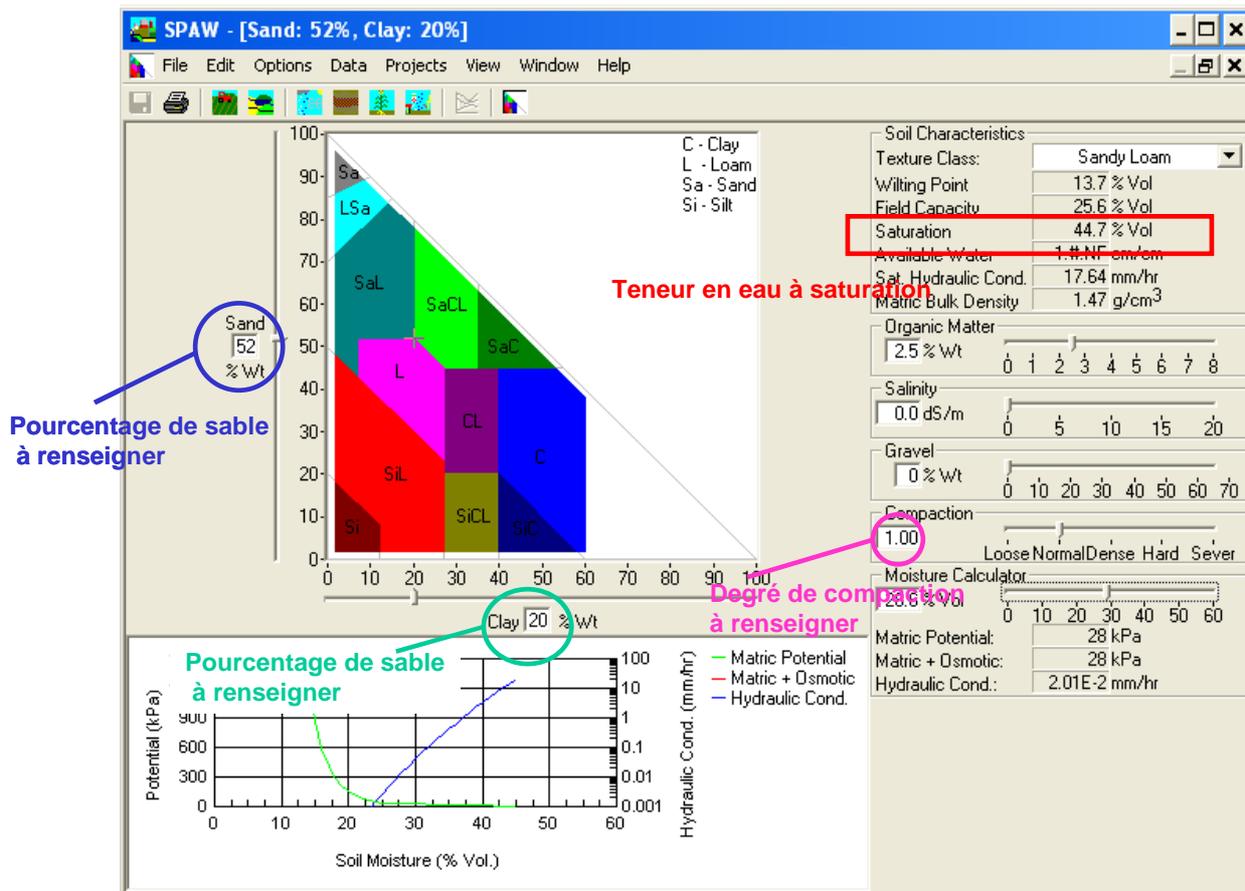


Figure 24. Interface du module « Soil Water Characteristics » pour déterminer la teneur en eau à saturation.

Cas 2 : L'utilisateur connaît seulement la classe texturale du sol

Si l'utilisateur ne connaît pas les pourcentages d'argile, de limon et de sable (utilisation de la Base de Données des Analyses de Terres, détermination de la texture par le pédologue sur le terrain), il ne peut utiliser directement le module « Soil Water Characteristics ». Bien que celui-ci présente un volet déroulant permettant de sélectionner directement la classe texturale du sol, celles-ci sont liées au triangle de l'USDA et non au triangle du GEPPA. Les classes texturales de ces deux triangles diffèrent beaucoup, en particulier pour les sols à texture équilibrée (« bonne terre franche » dans le langage agricole) (Figure 15).

Dans ce contexte, une combinaison de pourcentages en argile et en sable « type » a été définie pour chaque classe de texture du triangle du GEPPA (Tableau 1). L'utilisateur peut renseigner ces pourcentages dans le module « Soil Water Characteristics » et suivre les indications fournies précédemment pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation associée.

4.2.2.4. TENEUR EN EAU INITIALE

Attention : Ce paramètre n'est à déterminer qu'en l'ABSENCE d'une nappe superficielle.

◆ METHODE 1 : MESURES

Si l'utilisateur a recours à des événements pluvieux et ruisselants mesurés sur le site d'étude, alors il convient de mesurer sur place la teneur en eau initiale de la zone tampon au début de ces événements.

◆ METHODE 2 : ESTIMATION

La teneur en eau initiale du sol dépend de la saison considérée, des événements pluvieux antérieurs et de la présence éventuelle d'une nappe superficielle.

De manière générale, on peut supposer que :

- s'il a plu dans les deux jours précédant l'événement ruisselant, le sol est humide et sa teneur en eau initiale est égale à $FC + 0.5$ (POR-FC), où FC est la teneur en eau du sol à la capacité au champ (Field Capacity) et POR est la teneur en eau à saturation du sol (Saturation),
- s'il a plu dans les cinq jours précédant l'événement ruisselant, le sol présente une humidité moyenne et sa teneur en eau initiale est égale à sa teneur en eau à la capacité au champ,
- s'il n'a pas plu dans les cinq jours précédant l'événement ruisselant, le sol est sec et sa teneur en eau initiale est égale à $FC - 0.5$ (FC-PWP), où PWP est sa teneur en eau au point de flétrissement permanent (Wilting Point),
- si un sol est hydromorphe, quel que soit la saison et les antécédents pluvieux, sa teneur en eau initiale est proche de la saturation.

Les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent peuvent être obtenues à l'aide du module « Soil Water Characteristics ». Les résultats sont indiqués en haut à droite de l'écran sous les noms de « Field capacity » et « Wilting point » respectivement.

4.2.2.5. SUCCION MOYENNE AU FRONT D'HUMIDITE

Attention : Ce paramètre n'est à déterminer qu'en l'ABSENCE d'une nappe superficielle.

La succion moyenne au front d'humidité (Sav) est un paramètre conceptuel lié à l'équation de Green & Ampt (1911) qui est utilisée dans VFSSMOD pour calculer le taux d'infiltration. Le Tableau 6 fournit les valeurs de ce paramètre à sélectionner en fonction de la texture du sol de la zone tampon (texture GEPPA, Annexe D).

Type de sol	Sav (m)	Gamme de valeurs possibles	Texture de sol USDA correspondante
AA : Argile lourde	0.3163	0.0639-1.565	Clay
A : Sol argileux	0.3163	0.0639-1.565	Clay
As : Argile sableuse	0.2390	0.0408-1.402	Sandy-clay
Als : Argile limono-sableuse	0.2088	0.0479-0.9110	Clay-loam
Al : Argile limoneuse	0.2730	0.0567-1.315	Silty-clay-loam
AS : Sol argilo-sableux	0.2185	0.0442-1.080	Sandy-clay-loam
LAS : Limon argilo-sableux	0.1279	0.0212-0.7739	Silt-loam / Loam
La : Limon argileux	0.1668	0.0292-0.9539	Silt loam
Sa : Sable argileux	0.0613	0.0135-0.2794	Loamy-sand
Sal : Sable argilo-limoneux	0.1101	0.0267-0.4547	Sandy loam
Lsa : Limon sablo-argileux	0.1279	0.0212-0.7739	Silt-loam / Loam
L : Limon	0.1668	0.0292-0.9539	Silt loam
S : Sol sableux	0.0495	0.0097-0.2536	Sand
SS : Sable	0.0495	0.0097-0.2536	Sand
SI : Sable limoneux	0.1101	0.0267-0.4547	Sandy-loam
Ls : Limon sableux	0.1668	0.0292-0.9539	Silt-loam
LL : Limon pur	Il n'y a pas de valeur pour ce sol, sur lequel on ne pourrait implanter de bande enherbée, compte tenu de son caractère très peu perméable.		

Tableau 6. Valeurs du paramètre Sav en fonction du type de sol.

4.2.2.6. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES HORIZONS DE SOL

Attention : Les paramètres qui suivent ne sont à déterminer qu'en PRESENCE d'une nappe superficielle.

Pour caractériser le comportement hydrodynamique du sol (ou de l'horizon considéré), notamment la teneur initiale en eau en fonction de la profondeur de la nappe superficielle et la suction au front d'humidité (Cf 5.1.1.2. Renseignement des « Propriétés d'infiltration du sol »), l'utilisateur peut choisir entre l'équation de Van Genuchten et celle de Brooks & Corey (présentées en Annexe A). En cas d'hésitation, on peut proposer à l'utilisateur d'utiliser **l'équation de Van Genuchten**.

VAN GENUCHTEN

Si l'équation de Van Genuchten est choisie, 3 paramètres sont à renseigner : θ_r (la teneur en eau résiduelle), α_{VG} (un paramètre empirique de Van Genuchten) et n (un paramètre de forme de Van Genuchten). Ceux-ci peuvent s'obtenir à l'aide de l'outil « RETC ». Il suffit de :

1- Utiliser le module « Soil Water Characteristics » pour construire le tableau suivant (1 cm d'eau = 0.1 hPa.) :

Teneur en eau (fraction)	Pression h (kPa) (unité utilisée par SWC)	Pression h (mm) (unité utilisée par RETC. 1 mm d'eau = 10^{-2} kPa)	Conductivité hydraulique (mm/h)

Il convient de renseigner les pourcentages de sable et d'argile, la teneur en matière organique et le degré de compaction du sol, comme indiqué dans le paragraphe 4.1.3.1, et de relever la pression matricielle ainsi que la conductivité hydraulique pour un ensemble de valeurs de la teneur en eau du sol (Figure 25). Plus il y a de mesures, plus les résultats seront précis ; **on conseille un minimum de 10 points**. Il convient notamment de relever un maximum d'informations dans l'intervalle [Teneur en eau à saturation - Teneur en eau à la capacité au champ].

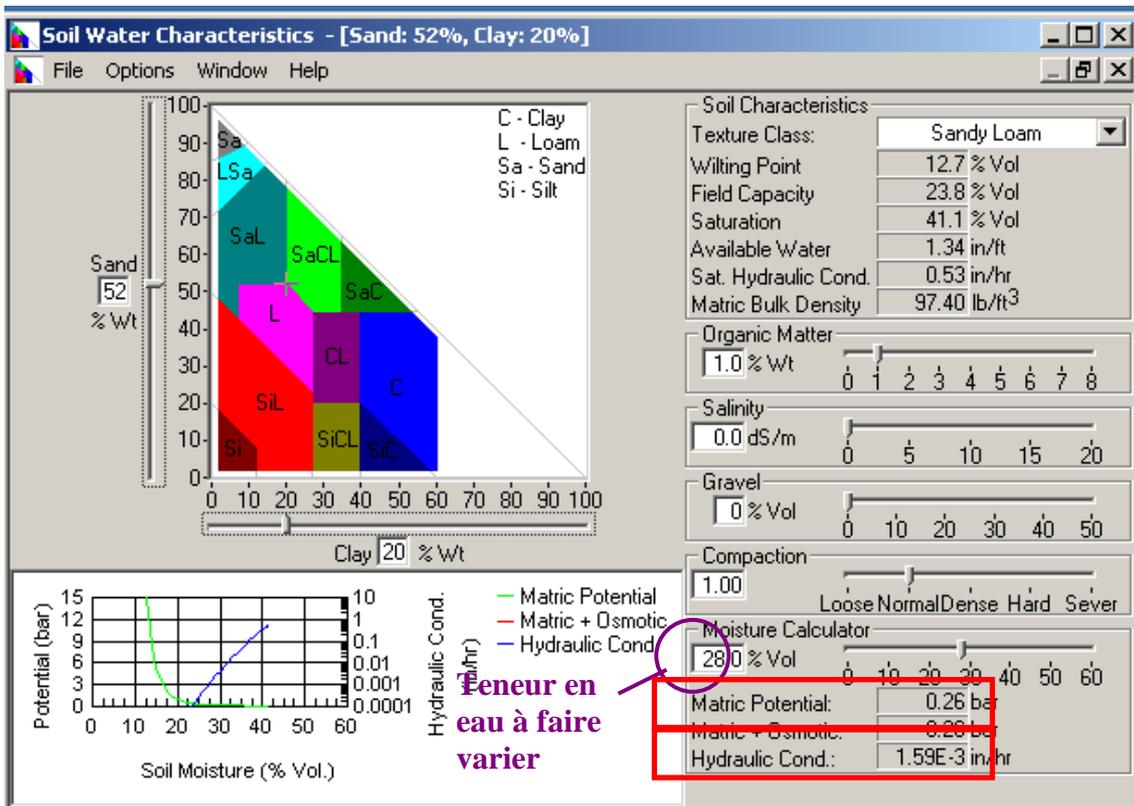


Figure 25. Interface du module « Soil Water Characteristics » pour déterminer la pression matricielle et la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau du sol.

2- Télécharger le module « RETC » à l'adresse suivante : <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc-downloads>.

3- Ouvrir un nouveau fichier et double cliquer sur « Type of Problem » (Figure 26).

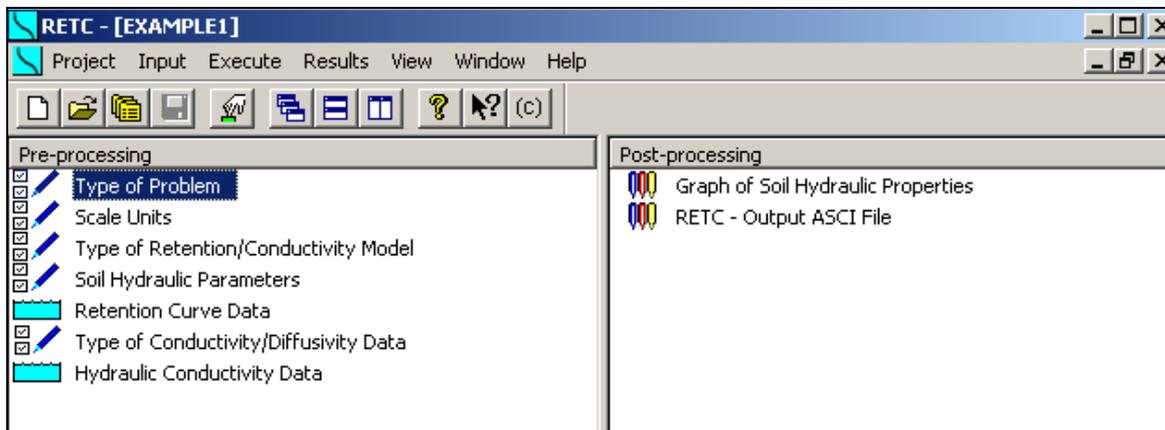


Figure 26. Interface d'accueil du module « RETC ».

4- Sélectionner « Both retention data and conductivity/diffusivity data » et cliquer sur « Next » (Figure 27).

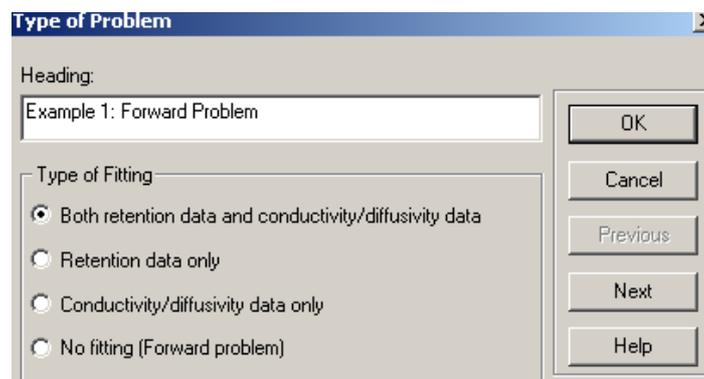


Figure 27. Sélection des données utilisées dans le module « RETC ».

5- Sélectionner les unités utilisées pour construire le tableau et cliquer sur « Next » (Figure 28).

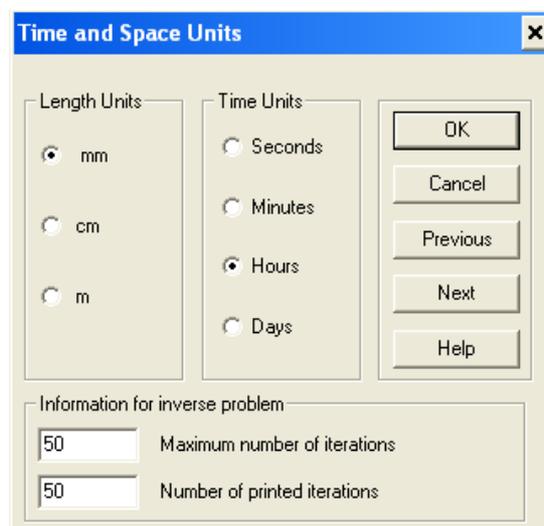


Figure 28. Sélection des unités utilisées dans le module « RETC ».

6- Sélectionner « Van Genuchten et Mualem » et indiquer en bas le nombre de lignes du tableau construit lors de la première étape (« Number of retention data points ») (Figure 29). Puis, cliquer sur « Next ».

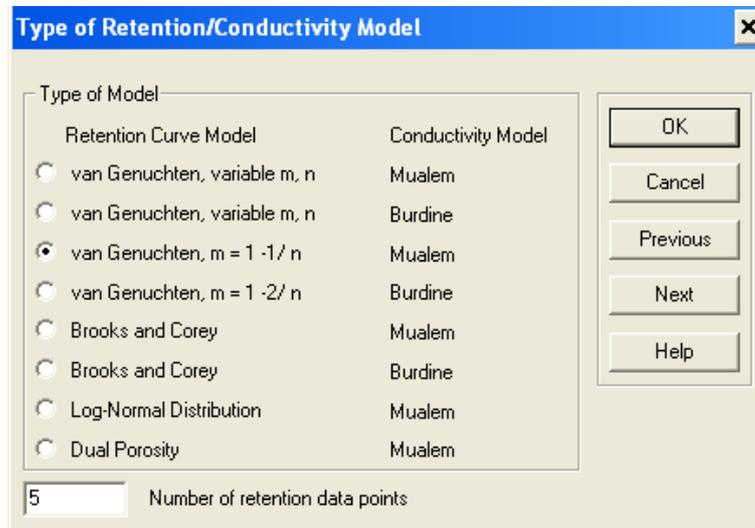


Figure 29. Sélection du type de courbe de rétention utilisé dans le module « RETC ».

7- Renseigner la teneur en eau à saturation du sol Q_s et la conductivité hydraulique à saturation K_s dans les unités indiquées lors de l'étape 5. Cocher les cases sous Q_r (teneur en eau résiduelle θ_r), alpha (paramètre α_{VN} de Van Genuchten), n et l pour demander le calcul de ces paramètres (Figure 30). Cliquer sur « Next ».

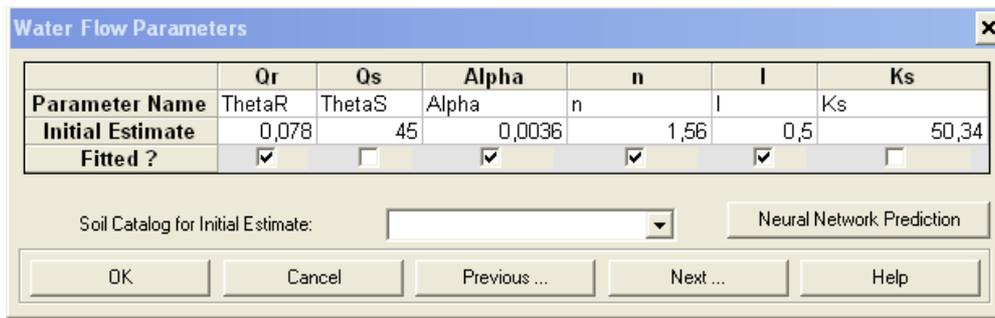


Figure 30. Renseignement et sélection des paramètres à optimiser dans le module « RETC ».

8- Indiquer les valeurs de pression matricielle (« Pressure ») et de teneur en eau (« Theta ») définies lors de l'étape 1 (Utilisation de SWC) et cliquer sur « Next » (Figure 31).

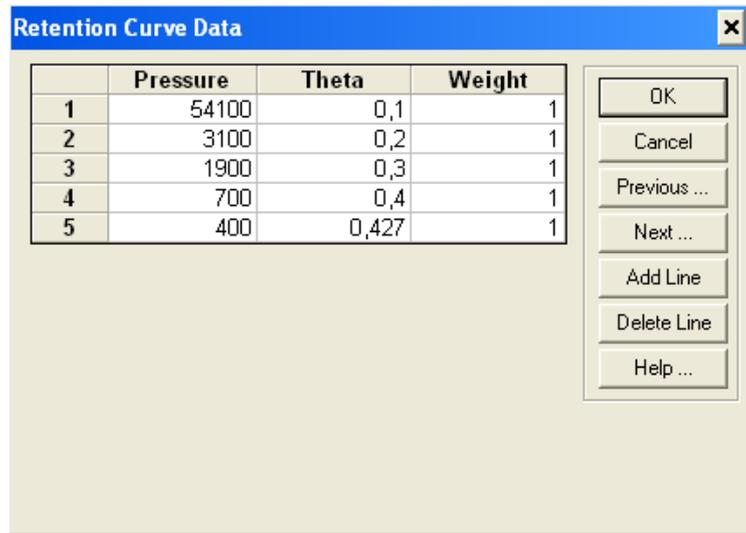


Figure 31. Renseignement des points de la courbe de rétention dans le module « RETC ».

9- Sélectionner « Conductivity versus Pressure Head ». Renseigner le nombre de ligne contenues dans le tableau construit lors de l'étape 1 (« Number of conductivity/diffusivity data points ») et cliquer sur « Next » (Figure 32).

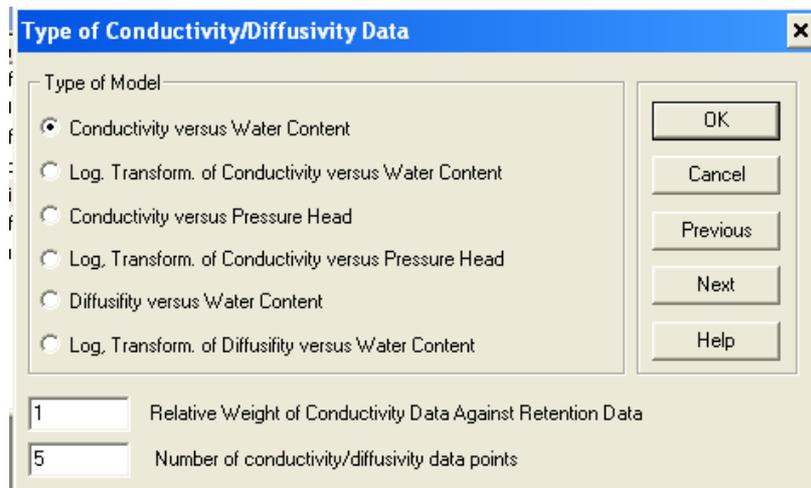


Figure 32. Sélection du type de données sur la conductivité dans le module « RETC ».

10- Indiquer les valeurs de teneur en eau (« Water content », compris entre 0 et 1) et de conductivité hydraulique (« Conductivity ») définies lors de l'étape 1 et cliquer sur « Next » (Figure 33).

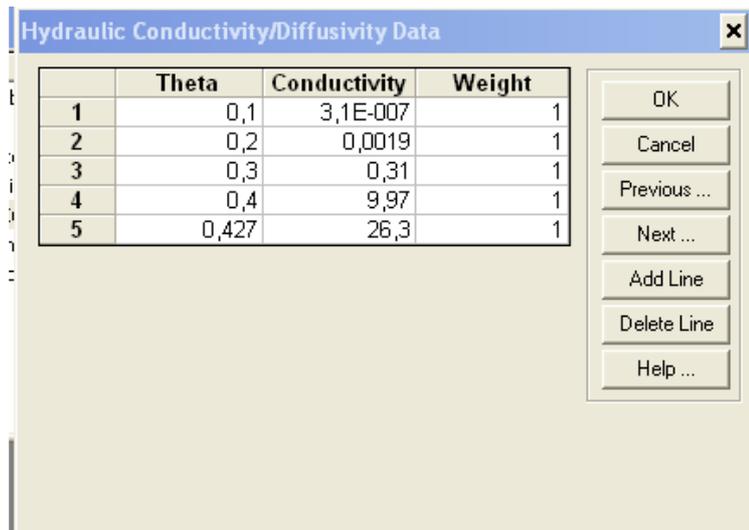


Figure 33. Sélection des points de la courbe de conductivité dans le module « RETC ».

11- Enregistrer les données et lancer le calcul en cliquant sur « OK » sur les fenêtres qui s’ouvrent. Double cliquer sur « RETC – Output ASCII File » pour prendre connaissance des paramètres calculés, qu’il faudra utiliser lors de la mise en œuvre de VFSSMOD (chapitre suivant) (Figure 34).

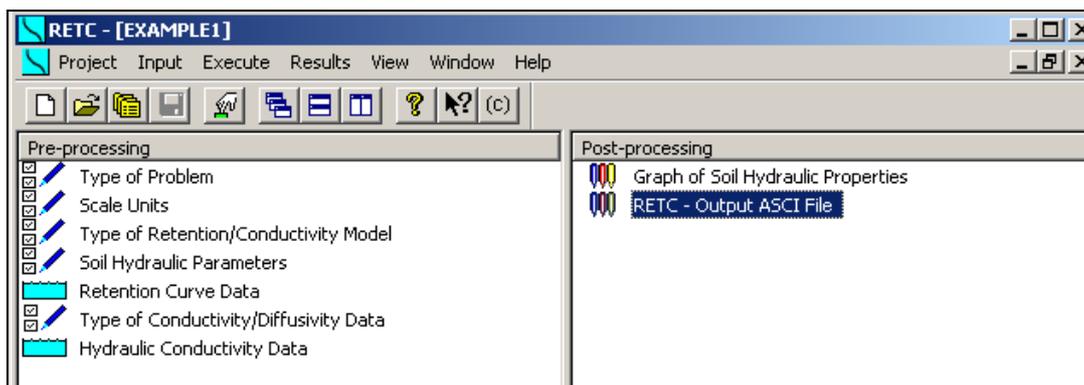
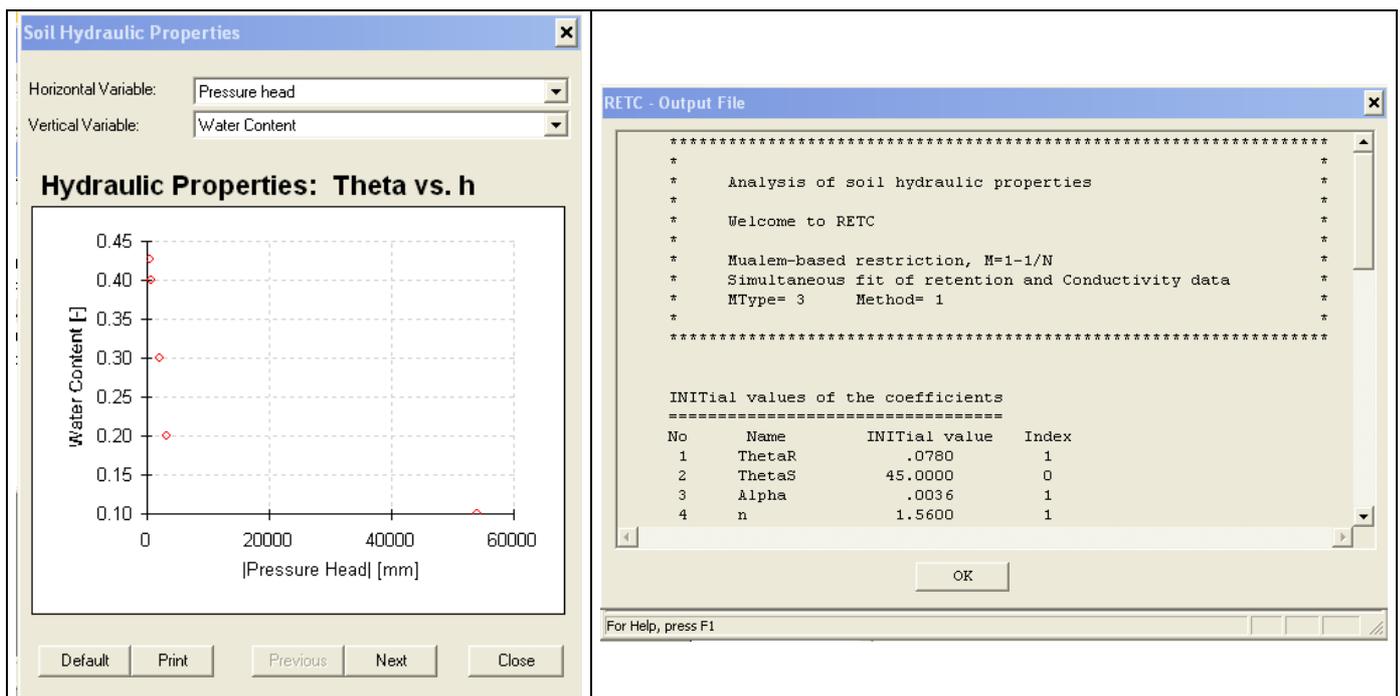


Figure 34. Interface de sortie du module « RETC ».



Exemple de courbe obtenue : teneur en eau en fonction du potentiel capillaire	Fichier comprenant les valeurs calées des paramètres
---	--

Notons que l'on trouve également les paramètres calés dans la fenêtre « Water Flow Parameters », où ils auront été actualisés après le calage.

BROOKS & COREY

Si l'équation de Brooks & Corey est choisie, 3 paramètres sont à renseigner : θ_r (la teneur en eau résiduelle), α_{BC} (paramètre caractéristique inverse de la pression d'entrée d'air) et λ (un paramètre de forme de Brooks & Corey). Ceux-ci peuvent s'obtenir en suivant les mêmes étapes que pour la détermination des paramètres de Van Genuchten. Il suffit simplement de sélectionner « Brooks and Corey » à l'étape 6. Il est à noter que dans le module « RETC », le paramètre n est assimilé au paramètre λ .

5. DIMENSIONNEMENT DE LA ZONE TAMPON

Les procédures à suivre pour modéliser les scénarios construits dans VFSMOD et définir la largeur optimale de la zone tampon étudiée sont exposées dans cette cinquième partie.

Les indications sont fournies à l'utilisateur pour renseigner l'ensemble des fichiers d'entrée du modèle et réaliser des simulations « uniques ». (**5.1. Modélisation**).

Dans un deuxième temps, on présente la méthode permettant de déterminer la largeur optimale pour une bande enherbée, compte tenu de l'ensemble des événements que l'on souhaite simuler. (**5.2. Dimensionnement de la zone tampon. Optimisation**)

5.1. Modélisation.

5.1.1. CREATION D'UN PROJET

Dans le langage informatique, un projet correspond à un scénario défini dans le paragraphe 3.3. L'utilisateur renseigne l'ensemble des paramètres qu'il a déterminés pour caractériser le ruissellement entrant et l'état de la zone tampon à une période donnée de transfert des produits phytosanitaires.

Pour créer un nouveau projet, il convient de :

1 - Ouvrir VFSMOD.

2 - Cliquer sur l'onglet « Fichier » en haut à gauche et sélectionner « Nouveau projet de zone tampon » (Figure 35).

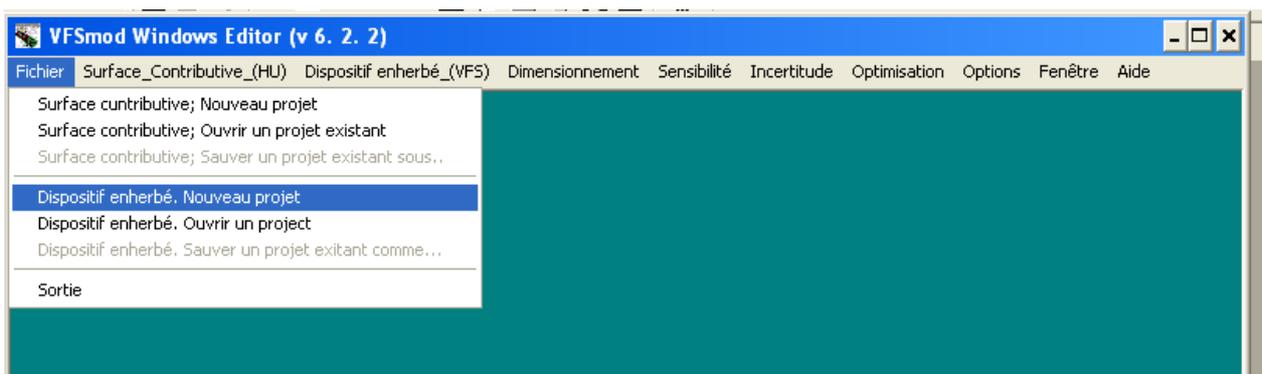


Figure 35. Créer un nouveau projet sous VFSMOD.

3- Nommer le projet à créer.

4- Renseigner les six fichiers d'entrée requis (Figure 36).

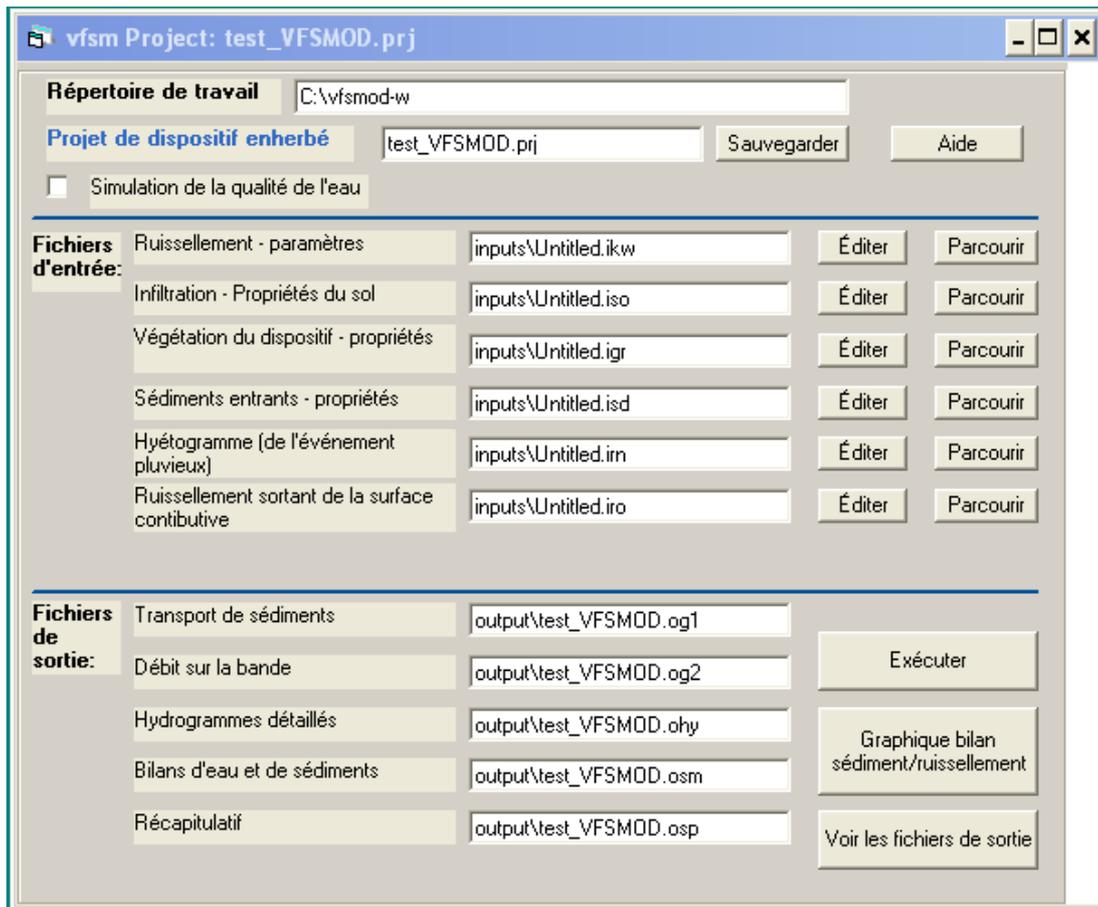


Figure 36. Interface de VFSMOD présentant les fichiers d'entrée à renseigner (en haut).

5.1.1.1. RENSEIGNEMENT DES « PROPRIETES DU RUISSELLEMENT DE SURFACE »

Dans un premier temps, il convient de nommer le fichier d'entrée, en attribuant de préférence le même nom que celui choisi pour le projet. Ceci permet de retrouver facilement les données renseignées pour une utilisation ultérieure.

Dans un second temps, il convient de renseigner l'ensemble des paramètres requis, visibles sur la Figure 37.

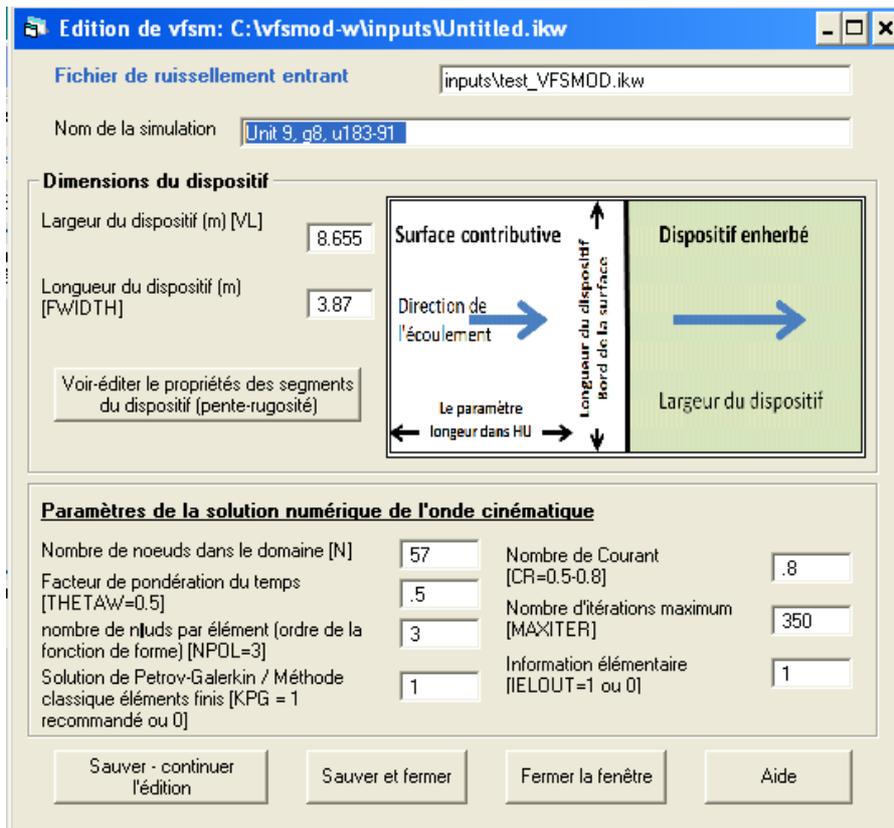


Figure 37. Fichier de renseignement des propriétés du ruissellement entrant.

- La **longueur de la zone tampon FWIDTH** a été déterminée à l'aide des indications fournies au paragraphe 4.2.1.
- La **largeur de zone tampon VL** à renseigner est celle pour laquelle l'utilisateur souhaite tester l'efficacité du dispositif enherbé ou boisé. S'il souhaite tester l'efficacité de la zone tampon pour tout une gamme de largeurs, alors l'utilisateur peut renseigner ce paramètre par défaut (5 mètres par exemple). Celui-ci prendra successivement les valeurs à tester lors de l'utilisation du module « Design analysis » après la création du projet (paragraphe 5.1.3).
- La **pente** et la **rugosité** sont à renseigner en cliquant sur le bouton « Voir/Indiquer les propriétés des segments de la bande ». Pour chaque segment de la zone tampon, l'utilisateur renseigne la pente (déterminée à partir des indications fournies au paragraphe 4.2.1) et la rugosité. Cette dernière étant un paramètre peu sensible du modèle, elle peut être fixée par défaut, pour de la **végétation herbacée égale à 0.2**.

Attention : La pente est à renseigner en fraction. Par exemple, pour une pente de 30%, indiquer 0.3.

- Les paramètres d'entrée liés à la **solution numérique de l'équation de l'onde cinématique** peuvent être renseignés comme suit :
 - Nombre de nœuds dans le domaine : 57
 - Facteur de pondération du temps : 0.5
 - Nombre de nœuds par élément : 3
 - Solution de Petrov-Galerkin : 1
 - Nombre de courant : 0.8
 - Nombre d'itérations maximum : 350
 - Information sur les éléments de sortie : 1

Si le souhaite, l'utilisateur peut consulter le fichier d'aide associé à VFSMOD et incrémenter les valeurs de son choix.

5.1.1.2. RENSEIGNEMENT DES « PROPRIETES D'INFILTRATION DU SOL »

Dans un premier temps, il convient de nommer le fichier d'entrée, en attribuant de préférence le même nom que celui choisi pour le projet.

Ensuite, il convient de renseigner l'ensemble des paramètres requis, visibles sur la Figure 38. On précise ici que l'on ne s'occupe plus à ce niveau que **du sol de la bande enherbée**, et plus des sols de la zone contributive, dont les caractéristiques ont servi à déterminer le ruissellement entrant sur la bande.

The screenshot shows a software window titled "Éditeur v fsm: C:\v fsm\mod-w\inputs\Untitled.iso". The main content area is titled "fichier infiltration - propriétés du sol (*.iso)" and contains the file path "inputs\test_VFSMOD.iso". There are two radio buttons for "Nombre de couches de sol" (1 and 2), and a checkbox for "Présence d'une nappe superficielle?". Below this, there are two sections for "Couche 1" and "Couche 2". Each section has input fields for "Conductivité hydraulique à saturation verticale, VKS" (with units m/s or cm/h), "Succion moyenne au front d'infiltration, Sav (m)", "Teneur en eau initiale, OI", "Teneur en eau à saturation, OS", and "Profondeur de la base de la couche". The "Couche 1" section has a depth of 15, while "Couche 2" has a depth of 100. At the bottom, there are buttons for "Sauver -Continuer l'édition", "Sauver et fermer", "Fermer la fenêtre", and "Aide".

Figure 38. Fichier de renseignement des propriétés d'infiltration du sol de la zone tampon.

PAS DE NAPPE SUPERFICIELLE

- ✓ Dans le cas où les investigations menées dans la partie 4 n'ont pas mis en évidence la présence d'une nappe superficielle sous la bande enherbée, ne pas cocher la case « Présence d'une nappe superficielle ? ». Cocher le **nombre de couches** (un ou deux) que l'on choisit pour représenter le sol de la bande enherbée.
- ✓ Pour chaque couche, renseigner la **conductivité hydraulique à saturation** (utiliser l'unité m/s ou cm/h que l'on préfère, le logiciel complètera l'autre unité) ; **la profondeur de la base de la couche considérée** (en cm), **la teneur en eau initiale**, **la succion moyenne au front d'humidité (Sav)** et **la teneur en eau à saturation**.

Le chapitre précédent (4.2.2) a présenté les méthodes utilisables pour déterminer ces paramètres.

PRESENCE D'UNE NAPPE SUPERFICIELLE

- ✓ Si les investigations menées conformément au paragraphe 4.2.2.1 ont montré qu'il existe une **nappe superficielle** sous la zone tampon, alors l'utilisateur doit cocher la case en face de la question « Présence d'une nappe superficielle ? » comme sur la Figure 38.
- ✓ On obtient alors la fenêtre présentée Figure 39. Il faut renseigner **la profondeur de la nappe superficielle** (déterminée au paragraphe 4.2.2.1)

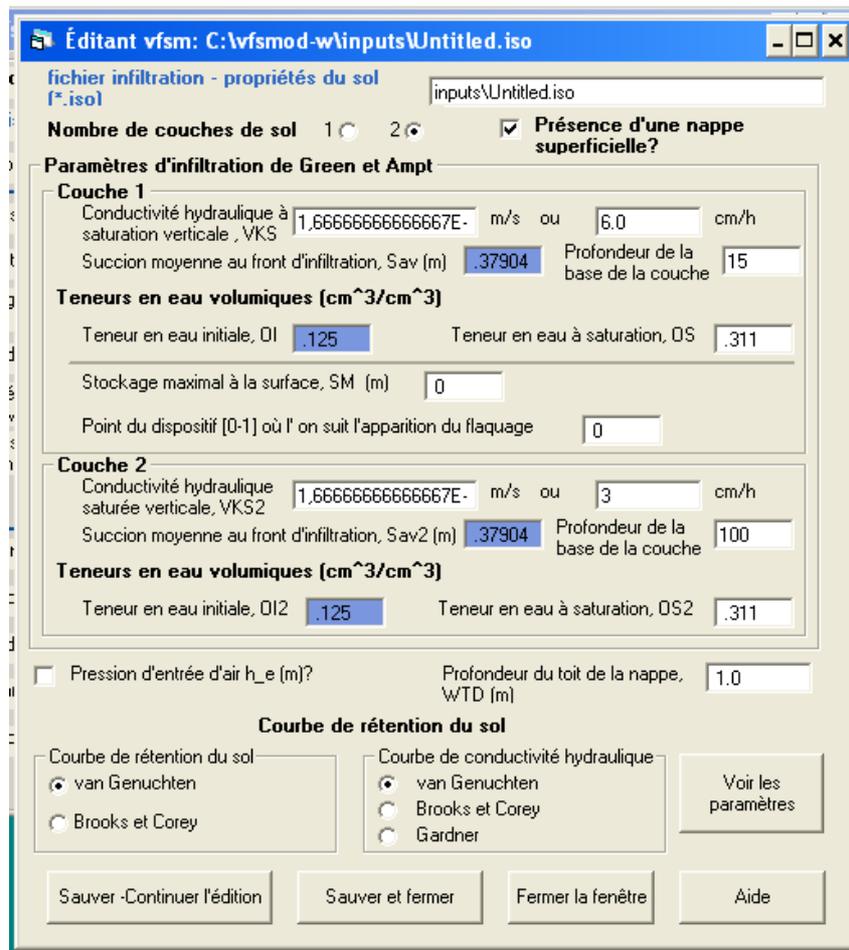


Figure 39 : Fenêtre des propriétés d'infiltration du sol en cas de présence d'une nappe superficielle.

- ✓ Là encore, il faut choisir le **nombre d'horizons** adapté pour représenter le sol (un ou deux), renseigner la **conductivité à saturation, la profondeur de la base et la teneur en eau de chaque horizon**. Les cases des paramètres qui n'ont pas lieu d'être renseignées sont bleutées. Selon les **courbes de teneur en eau et de conductivité** (Van Genuchten ou Brooks et Corey) choisies en cliquant sur les points prévus à cet effet, l'utilisateur renseigne les **paramètres associés** dans la fenêtre ouverte (Figure 40) après avoir cliqué sur le bouton « Voir les paramètres » en bas à droite (Figure 40).

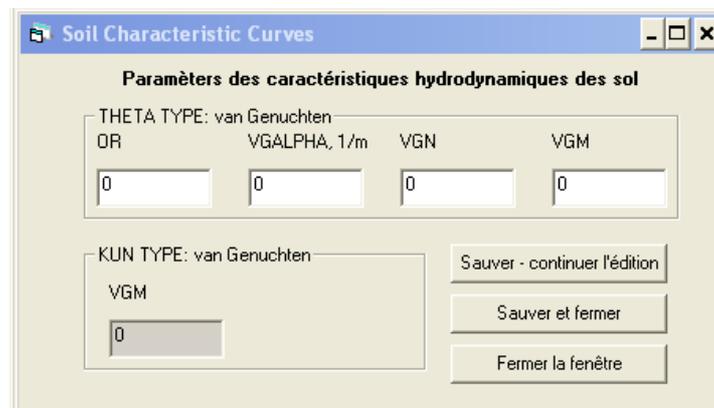


Figure 40. Fenêtre de renseignement des paramètres de Van Genuchten.

⇒ Notons que la version actuelle du modèle ne prend effectivement en compte qu'un horizon. Quand deux horizons sont utilisés pour décrire le profil :

- la conductivité à saturation de l'horizon équivalent est la moyenne harmonique des conductivités des deux horizons.

- les autres paramètres (θ_r , n , m et α_{VG} pour Van Genuchten ou θ_r , α_{BC} et λ pour Brooks et Corey) sont la moyenne arithmétique (pondérée par la profondeur de chaque horizon) des paramètres décrivant chaque horizon.

L'influence de cette approximation reste à tester.

- ✓ Certains sols (notamment à texture fine) restent saturés même quand une succion s'exerce. La pression capillaire seuil au delà de laquelle le sol se désature effectivement se nomme la pression d'entrée d'air. Par défaut, la **pression d'entrée d'air h_e** est fixée à zéro. Si l'utilisateur souhaite représenter ce phénomène, il convient de cocher la case « pression d'entrée d'air » et de renseigner cette pression seuil, typiquement de 0.01 m à 0.02 m).

Qu'une nappe soit ou non présente, le logiciel demande également la **hauteur d'eau stockée** en surface qui, dans la majeure partie des cas, est nulle. Le **point de contrôle de l'accumulation d'eau en surface** peut légèrement influencer sur l'infiltration calculée par le modèle (Muñoz-Carpena 1993) Appendix II.). Toutefois, ceci n'est pas un paramètre déterminant et selon les experts, il peut être fixé, par défaut, égal à 0.5.

5.1.1.3. RENSEIGNEMENT DES « PROPRIETES DE LA COUVERTURE VEGETALE »

Dans un premier temps, il convient de nommer le fichier d'entrée, en attribuant de préférence le même nom que celui choisi pour le projet.

Dans un second temps, il convient de renseigner l'ensemble des paramètres requis, visibles sur la Figure 41.

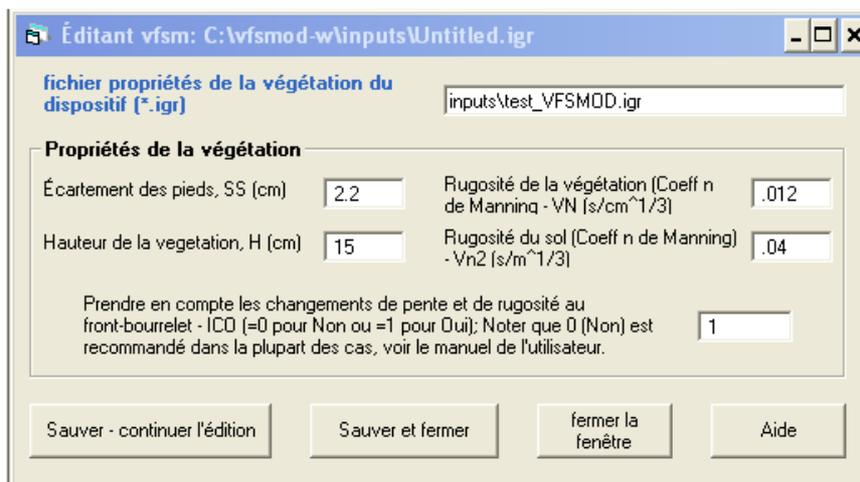


Figure 41. Fichier de renseignement des propriétés de la couverture végétale de la zone tampon.

- ✓ L'**espace entre les plants** dépend de l'espèce végétale caractérisant la zone tampon. En cliquant sur le bouton « Aide » en bas à droite la fenêtre, l'utilisateur pourra trouver des valeurs moyennes d'espace entre les plants pour différents types de végétation. Toutefois, selon les résultats de l'analyse de sensibilité, ce paramètre est peu sensible vis-à-vis des processus hydrologiques et, pour les bandes enherbées, il peut être fixé, par défaut, égal à 1.63. Cette valeur est caractéristique du Ray-grass anglais qui est couramment utilisé en France.
- ✓ La **hauteur de l'herbe** dépend également de l'espèce végétale et l'utilisateur peut trouver des ordres de grandeur de cette valeur pour différents types de plantes en cliquant sur le bouton « Aide » en bas à droite la fenêtre. On peut rappeler ici que ce paramètre influe peu sur les résultats du modèle (d'un point de vue hydrologique) et pour les bandes enherbées, il peut être fixé, par défaut, égal à 15 cm.
- ✓ La **rugosité de l'herbe** dépend de l'espèce végétale considérée et l'utilisateur peut trouver des ordres de grandeur de cette valeur pour différents types de plantes en cliquant sur le bouton « Aide » en bas à

droite la fenêtre. On rappelle que ce paramètre influe peu sur les résultats du modèle (d'un point de vue hydrologique) et pour les bandes enherbées, il peut être fixé, par défaut, égal à $0.012 \text{ s/cm}^{1/3}$.

- ✓ Des ordres de grandeur de la **rugosité de la surface** en fonction de la couverture sont également visibles dans l' « Aide » de VFSMOD.

Note : L'ensemble de ces paramètres ont peu d'influence sur les processus hydrologiques mais peuvent être sensibles vis-à-vis du transport des sédiments. Ainsi, si l'utilisateur souhaite aussi étudier le transport des sédiments au sein de la zone tampon, il convient de renseigner ces paramètres avec plus de précision (mesures de terrain par exemple).

5.1.1.4. RENSEIGNEMENT DES « CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS TRANSPORTES »

Dans un premier temps, il convient de nommer le fichier d'entrée, en attribuant de préférence le même nom que celui choisi pour le projet.

Ensuite, il convient de renseigner l'ensemble des paramètres requis, visibles sur la Figure 42.

Fichier des propriétés des sédiments entrants [* .isd]			
Propriétés des sédiments			
Concentration en sédiments de l'écoulement entrant (g/cm ³) - CI	.034	Porosité du dépôt sédimenté (fraction - POR)	.434
Classe de granulométrie des sédiments entrants (NPART)	7	Fraction des particules de sédiments entrant avec un diamètre > 0.0037 cm (Échelle d'environ 0.0 à 1.0)	.5
Taille de particule, diamètre d50 (cm) - DP (lu seulement si NPART=7)	.0013	Densité des particules de sédiment (g/cm ³) - SG (lu seulement si NPART=7)	2.65

Figure 42. Fichier de renseignement des caractéristiques des sédiments transportés.

Comme énoncé dans la troisième partie de cette brochure, on a fait ici l'hypothèse que l'efficacité de la zone tampon à intercepter les produits phytosanitaires est égale à son efficacité à limiter le ruissellement. De ce fait, les paramètres associés aux caractéristiques des sédiments transportés peuvent être renseignés par défaut. Ils n'ont en effet pas d'influence sur les processus hydrologiques qui ont lieu au sein de la bande. L'utilisateur peut indiquer les valeurs par défaut suivantes :

- Concentration des sédiments entrants : 0.5 g/cm^3
- Classe des particules de sédiments entrant : 1
- Porosité des sédiments déposés : 0.4
- Pourcentage des particules ayant un diamètre supérieur à 0.0037 cm : 0.5.

Note : Si l'utilisateur souhaite aussi étudier le transport des sédiments au sein de la zone tampon et dispose des données requises pour renseigner les paramètres du fichier d'entrée en question, alors il peut leur attribuer des valeurs représentatives de son site d'étude.

5.1.1.5. RENSEIGNEMENT DU « HYETOGRAMME DE PLUIE »

Comme indiqué dans le paragraphe 4.1.5, le **hyétoگرامme de pluie** peut être issu de simulations effectuées avec le programme HYETOHYDRO ou de données de terrain.

Dans le premier cas, l'utilisateur télécharge le fichier créé lors de l'export des données à partir du programme HYETOHYDRO (étape 8 du paragraphe 4.1.5). Pour cela, il suffit de cliquer sur le bouton « Parcourir » en face du fichier « Hyétogramme de pluie » sur l'interface d'accueil (Figure 36) et de sélectionner le fichier .irn créé à partir d'Excel.

Dans le second cas, l'utilisateur doit renseigner lui-même le fichier d'entrée présenté sur la Figure 43.

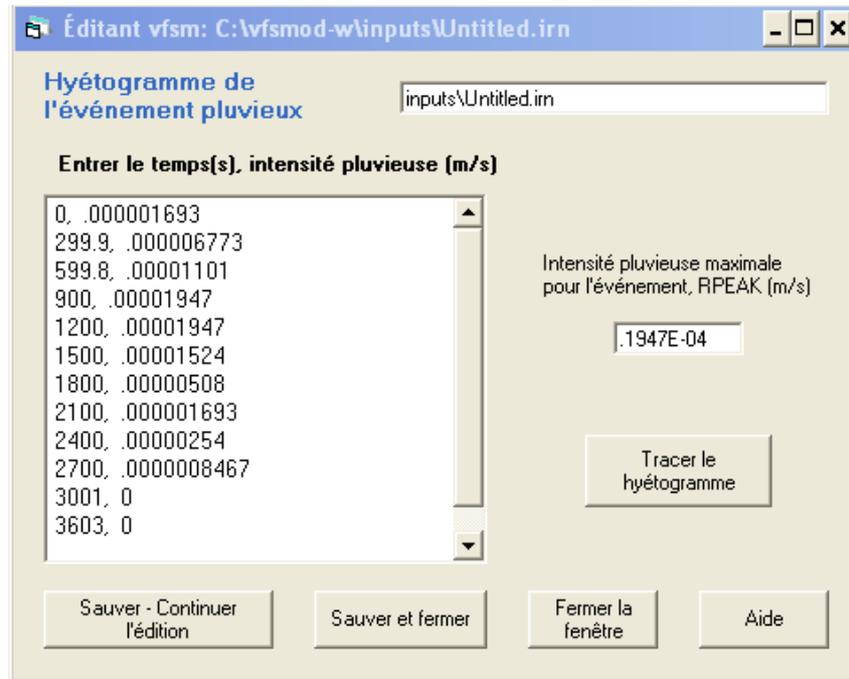


Figure 43. Fichier de renseignement du hyetogramme de pluie.

- ✓ Le **hyétogramme de pluie** est renseigné dans l'encadré visible à gauche de la fenêtre (Figure 43). L'utilisateur y indique les couples Temps (s) – Intensité (m/s) qui caractérisent le type d'événement survenant sur son site d'étude lors de la saison de transfert des produits phytosanitaires étudiée. Il faut noter que l'intensité i_1 à renseigner pour le temps t_1 est caractéristique de l'intervalle de temps $[t_1-t_2]$.
- ✓ L'**intensité pluvieuse maximale** enregistrée durant l'événement doit être indiquée dans l'encart prévu à cet effet sur la droite de la fenêtre (Figure 43).

5.1.1.6. RENSEIGNEMENT DE L' « HYDROGRAMME DE RUISSELLEMENT »

Comme indiqué dans le paragraphe 4.1.6, l'**hydrogramme de ruissellement** peut être issu de simulations effectuées avec le programme HYETOHYDRO, ou de données de terrain.

Dans le premier cas, l'utilisateur télécharge le fichier créé lors de l'export des données à partir du programme HYETOHYDRO (étape 9 du paragraphe 4.1.6). Pour cela, il suffit de cliquer sur le bouton « Parcourir » en face du fichier « Hydrogramme de ruissellement » sur l'interface d'accueil (Figure 36) et de sélectionner le fichier .iso créé à partir d'Excel.

Dans le second cas, l'utilisateur doit renseigner lui-même le fichier d'entrée présenté sur la Figure 44. Le hyétogramme de pluie a été déterminé à partir des indications fournies au paragraphe 4.1.5. On suppose que l'événement pluvieux s'abattant sur la bande est identique à celui s'abattant sur la surface contributive.

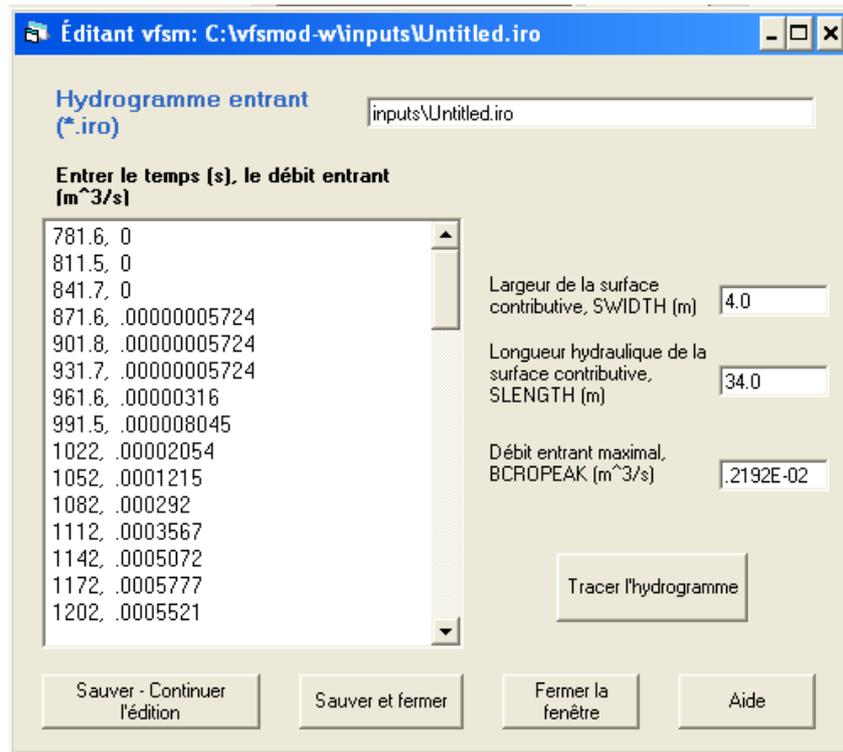


Figure 44. Fichier de renseignement de l'hydrogramme de ruissellement.

- ✓ L'**hydrogramme** de ruissellement est renseigné dans l'encadré visible à gauche de la fenêtre (Figure 44). L'utilisateur y indique les couples Temps (s) – Débit (m^3/s) qui caractérisent le type d'événement survenant sur son site d'étude lors de la saison de transfert des produits phytosanitaires étudiée. Il faut noter que le débit d_1 à renseigner pour le temps t_1 est caractéristique de l'intervalle de temps $[t_1-t_2[$.
- ✓ Le **débit de ruissellement maximal** enregistré durant l'événement doit être indiqué dans l'encart prévu à cet effet sur la droite de la fenêtre (Figure 44).
- ✓ La **longueur maximale** de la surface contributive a été déterminée à partir des indications fournies dans le paragraphe 4.1.1 et la **largeur** de cette surface peut être estimée à partir de l'aire calculée par HydroDem (paragraphe 4.1.1).

Important : Pour chacun des six fichiers d'entrée à renseigner, si l'utilisateur souhaite utiliser un fichier déjà existant, alors il n'a qu'à le télécharger en cliquant sur le bouton « Parcourir » en face du fichier d'entrée sur l'interface d'accueil (Figure 36).

5.1.2. MODIFICATION D'UN PROJET

Pour modifier les paramètres d'un projet existant, il convient de :

- 1- Ouvrir VFSMOD.
- 2- Cliquer sur l'onglet « Fichier » en haut à gauche et sélectionner « Ouvrir un projet de zone tampon » (Figure 45).

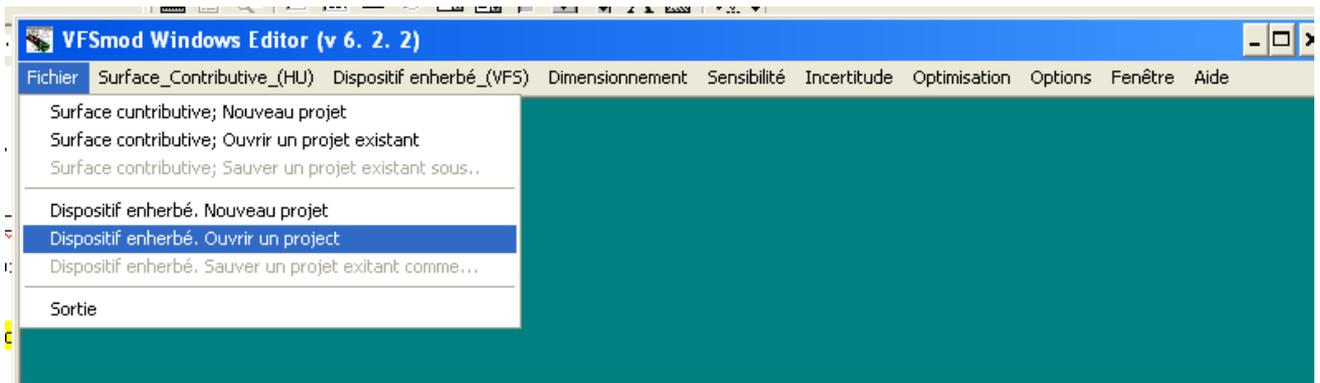


Figure 45. Modifier un projet sous VFSMOD.

3 - Cliquer sur le bouton « Créer » en face du fichier d'entrée à modifier, changer les paramètres souhaités et sauvegarder les nouvelles données.

5.2. Dimensionnement de la zone tampon. Optimisation

L'utilisateur peut utiliser le module « Design analysis » pour évaluer l'efficacité de la zone tampon en fonction de sa largeur. Pour cela, il convient de :

1. Cliquer sur l'onglet « Dimensionnement » et sélectionner « Dimensionnement avancé » (Figure 46).

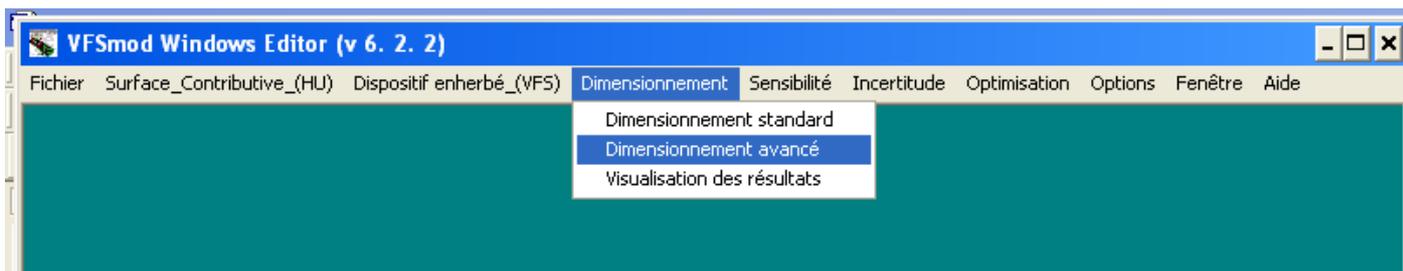


Figure 46. Onglet de sélection du module « Design analysis ».

2. Sélectionner le projet créé pour simuler un scénario associé au site d'étude (paragraphe 5.1.1).
3. Sur un même site, l'utilisateur peut évaluer l'efficacité de la zone tampon pour différents types d'événements pluvieux et ruisselant susceptibles de se produire lors de la période de transfert des produits phytosanitaires considérée (**pour la même saison**). Il convient donc de sélectionner le nombre d'événements pluvieux et ruisselant à tester (Figure 47) **en lien avec les fichiers d'entrée liés à la zone tampon sélectionnés lors de l'étape 1**.
4. Pour chaque événement, indiquer la période de retour (1 an pour les événements pluvieux simulés à l'aide de HyetoHydro), la durée de la pluie et la hauteur précipitée, puis télécharger les fichiers d'entrée associés au hyétoGramme, à l'hydrogramme de ruissellement et aux propriétés des sédiments transportés (Figure 47). Même si l'on ne s'intéresse pas à l'abattement du flux de sédiments, il est nécessaire de fournir un fichier de sédiments : celui-ci peut être le même pour tous les événements pluvieux considérés, et choisi parmi les fichiers d'exemples fournis avec VFSMOD.
5. Cocher la case « Largeur de dispositif enherbé (m) » et indiquer la gamme de largeurs de zone tampon à tester (Figure 47). Par exemple, l'utilisateur peut choisir d'évaluer l'efficacité de la zone tampon pour une largeur de 1 à 31 mètres avec un incrément de 1. Ceci signifie que la modèle calculera l'efficacité de la zone tampon lorsque sa largeur est égale à 1 mètre, 2 mètres, 3 mètres... et ce jusqu'à 31 mètres.
6. Cliquer sur « Exécuter » (qui apparaît lorsque tous les champs sont renseignés) et visualiser les résultats en cliquant sur le bouton « Visualiser les résultats ».

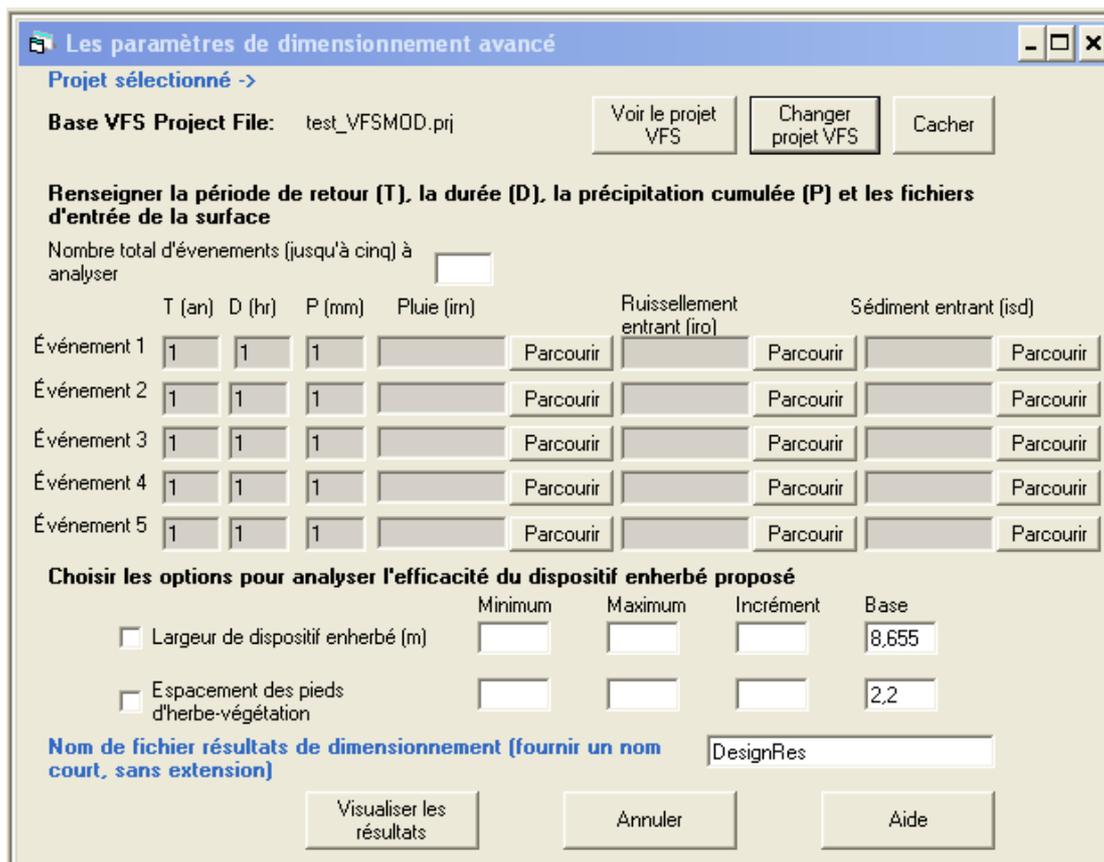


Figure 47. Interface du module « Dimensionnement – dimensionnement avancé ».

Note : Si l'utilisateur a créé ses fichiers d'entrée liés au hétérogramme, à l'hydrogramme et aux propriétés du ruissellement entrant à l'aide du module « Hydrogramme Unitaire » (HU) (Annexe G), alors, il doit sélectionner « dimensionnement standard » dans l'onglet « Dimensionnement » et suivre la procédure décrite en Annexe G.

EXPLOITATION DES RESULTATS

Les résultats fournis par le module « Dimensionnement » sont :

- ✓ un tableau fournissant pour chaque largeur de zone tampon la part de ruissellement infiltré et de sédiments piégés,
- ✓ des graphiques présentant le ratio de ruissellement et le ratio de sédiments sortant de la zone tampon (en appuyant sur le bouton « Voir les résultats graphiques »).

Ce qui nous intéresse ici est le graphique présentant l'efficacité de la zone tampon à limiter le ruissellement de surface en fonction de sa largeur (Figure 48).

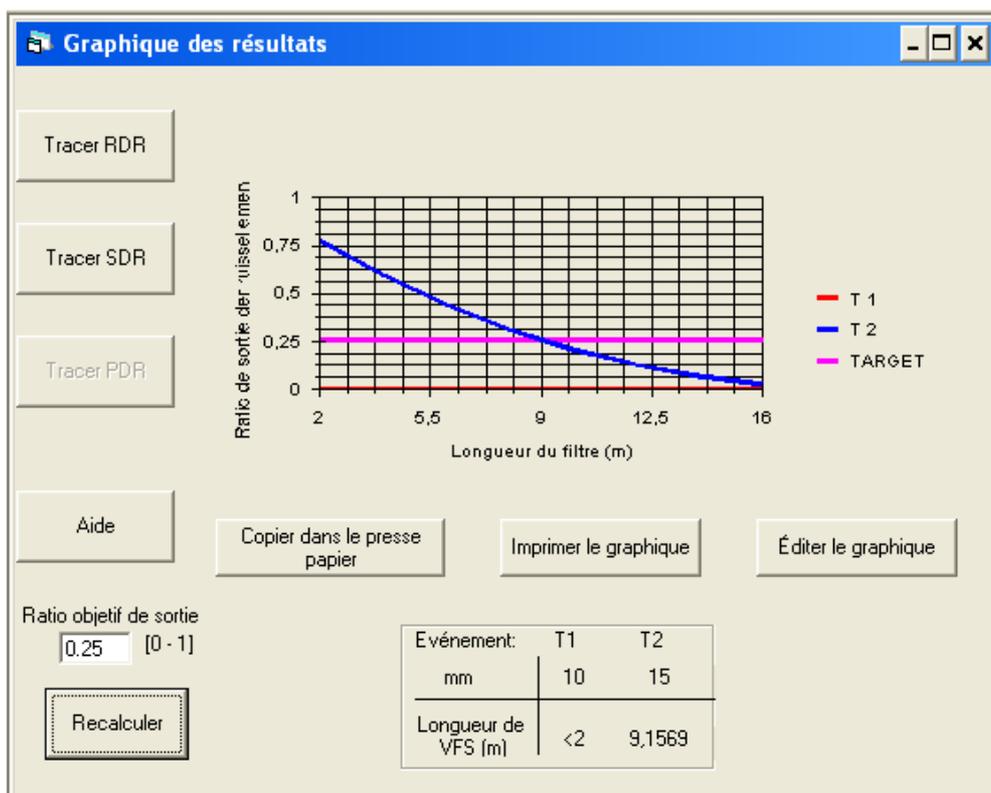


Figure 48. Graphique présentant l'efficacité de la zone tampon à limiter le ruissellement en fonction de sa largeur.

L'utilisateur peut choisir le pourcentage d'efficacité cible qu'il choisit (Ratio objectif de sortie) c-a-d le pourcentage de ruissellement entrant qu'il accepte en sortie de bande : un ratio objectif de 0.25, comme sur l'exemple de la Figure 48 signifie qu'on souhaite que la bande enherbée abatte 75 % du ruissellement entrant. Le tableau en bas de la figure indique que pour l'événement T1, de 10 mm, une bande de 2 m suffit, pour l'événement T2, de 15 mm, une bande de 9,16 m est nécessaire pour abattre 75 % du ruissellement entrant correspondant.

Quelques cas complexes peuvent se présenter à l'utilisateur en fonction des caractéristiques du ruissellement entrant et des propriétés de la zone tampon. Par exemple :

♣ **La zone tampon peut infiltrer la totalité du ruissellement entrant, même lorsque sa largeur est faible (1 à 3 mètres).**

Ceci peut être dû au fait que l'événement pluvieux considéré est faible (faible volume et intensité, faible période de retour) et/ou que les capacités d'infiltration de la zone tampon sont élevées (sable sec sans nappe superficielle par exemple).

♣ **La zone tampon infiltre peu le ruissellement, même lorsque sa largeur est importante (plus de 20 mètres).**

Certains sols auront une **capacité d'infiltration réduite** en rapport avec leur texture fine et/ou la présence d'une nappe superficielle. Dans ces cas, augmenter la largeur de la zone tampon ne permettra pas forcément d'augmenter ses capacités d'interception des produits phytosanitaires. Il est possible que l'utilisateur envisage alors la mise en place de zones tampons additionnelles en amont du bassin ou le recours à un autre type de zones tampons, comme **les zones tampons humides**.

6. CONCLUSION

Après avoir rappelé les notions principales sur les zones tampons végétalisées, ce guide présente les différentes étapes à suivre pour pouvoir alimenter le modèle VFSMOD de façon pertinente, afin d'optimiser le dimensionnement d'une zone tampon pour un site donné.

La démarche est basée sur la notion de scénario : ce document guide l'utilisateur pour définir les deux ensembles constituant un scénario « type » : la pluie et le ruissellement entrant sur la zone tampon d'une part, les caractéristiques propres de la zone tampon d'autre part.

Le document présente notamment les sources de données mobilisables, et fournit également quelques outils pour permettre d'acquérir/définir les données nécessaires au modèle.

Rappelons que dans ce guide, le choix a été fait de se concentrer sur l'abattement des seuls débits de ruissellement au sein de la zone tampon, sans considérer l'abattement des flux de matières en suspension ou de pesticides. Ce choix est lié, d'une part au fait que l'on fait l'hypothèse que, sauf pour les sols très érosifs ou/et pour les produits ayant une capacité d'adsorption très élevée, l'essentiel du transfert se fait sous forme soluble, d'autre part au fait que l'on a considéré les données nécessaires pour décrire correctement les flux de matières en suspension ou de pesticides entrant sur la zone tampon difficilement accessibles en routine. Ce choix peut conduire à surdimensionner les zones tampons, il s'agit donc d'un choix conservatif. Soulignons toutefois que VFSMOD permet de représenter matières en suspension et pesticides : dès lors que l'utilisateur dispose des données nécessaires, il peut donc utiliser la version complète du modèle.

Soulignons également que la méthode présentée ici n'a pas vocation à être appliquée de façon exhaustive sur toutes les zones d'un bassin versant sur lesquelles on a décidé d'implanter des zones tampons. En effet, une fois réalisée la phase d'acquisition de données et la méthode appliquée sur un certain nombre de zones représentatives (ce nombre dépendant de la diversité du bassin à traiter), l'utilisateur verra émerger un certain nombre de situations « type », auquel il pourra ensuite se référer pour dimensionner les zones tampons en chaque point, sans avoir à mettre en œuvre l'ensemble de la procédure présentée ici.

GLOSSAIRE

Capacité au champ : Teneur en eau d'un sol après « ressuyage », c'est à dire quand l'eau qu'il contient ne s'infiltré plus sous l'effet de la gravité, parce qu'il y a équilibre entre gravité et capillarité du sol. Cela correspond approximativement à un potentiel capillaire de 2,3. (pF =) 2.3)

DT50 ou demie vie : c'est le temps nécessaire pour que la moitié des produits appliqués au champ se dégrade... Cette durée dépend de la substance active, mais également des conditions environnementales, notamment météorologiques.

Fréquence de retour : Inverse de la période de retour. Un événement qui a une fréquence de retour de 1/10 a statistiquement une chance de se produire tous les 10 ans.

Hydrogramme : Courbe qui décrit la variation du débit en un point au cours du temps : Q(t)

Hyétoqramme : Courbe qui décrit la variation de la pluie en un point au cours du temps : P(t)

K_{oc} : Valeur qui caractérise la capacité d'une substance active à s'adsorber sur le carbone organique. Plus une molécule a un K_{oc} élevé, moins elle sera mobile dans l'environnement. De même, plus un sol est riche en matière organique, et plus il retiendra les pesticides.

NB : un sol riche en argile peut également favoriser l'adsorption. L'adsorption d'une molécule sur un sol est décrite par la formule de Freundlich : $C_s = K_f \cdot C_e^n$ ou K_f est le **coefficient de Freundlich**, pour la molécule donnée » dans le sol considéré et n l'exposant de Freundlich. Ce coefficient K_f varie beaucoup avec le sol considéré, et on préfère donc souvent utiliser le K_{oc}, plus « intrinsèque » à la molécule.

Pression capillaire : différence de pression $p_c = p_{air} - p_{eau}$ à l'interface air-eau dans le sol. Elle varie en fonction de la saturation en eau du sol, et vaut 0 pour un sol saturé (négative pour un sol non saturé)

Potentiel matriciel, potentiel capillaire ou potentiel de succion : on exprime en général la pression capillaire via le potentiel de succion donné par $pF = \log_{10} \left(-\frac{p_{eau}}{\rho g} \right)$ où $p_{eau}/\rho g$ est exprimé en centimètres, la pression atmosphérique étant prise comme référence pour la pression.

Période ou Temps de retour : Durée pendant laquelle un événement donné a statistiquement une chance de se produire une fois. Un débit de période de retour 10 ans se produira donc statistiquement une fois pendant une période de 10 ans. (ou a une chance sur 10 de se produire une année donnée).

Point de flétrissement : potentiel matriciel au delà duquel l'eau n'est plus accessible aux plantes, la succion qu'elles devraient exercer devenant trop élevée. En toute rigueur, elle varie d'une plante à l'autre, mais on assimile en général le point de flétrissement à un potentiel capillaire pF = 4.2 soit une succion de 160 m d'eau.

Teneur en eau : Rapport du volume de sol occupé par de l'eau, au volume total d'un échantillon. Compris entre 0 et 1.

Teneur en eau à saturation : Teneur en eau quand toute la porosité du sol est occupée par de l'eau.

Teneur en eau résiduelle : Teneur en eau quand toute l'eau disponible a été retirée (à l'étuve). Ne reste que l'eau comprise dans les agrégats de sol.

Zone tampon : toute zone intercalaire entre une surface cultivée et le réseau hydrographique, qui peut contribuer à abattre ou retarder un flux de contaminants (ou un débit de crue, selon l'objectif ou les objectifs assignés à la zone).

Références

- Adamiade, C.-V. (2004). Influence d'un fossé sur les écoulements rapides au sein d'un versant. Application au transfert des produits phytosanitaires. Géosciences et ressources naturelles. Mention : Hydrologie, Université Pierre et Marie Curie: 239 pp.
- Alletto, L., Y. Coquet, et al. (2010). "Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review." *Agronomy for sustainable development* 30: 367-400.
- Boughton, W. C. (1989). "A review of the USDA-SCS Curve Number method." *Australian Journal of Soil Research* 27(3): 511-523.
- Bouwer, H. (1969). "Infiltration for water into non-uniform soil." *Journal of irrigation and drainage division* 4: 451-462.
- Brooks, R. H. and A. T. Corey (1964). Hydraulic properties of porous media. Fort Collins, Colorado, Colorado state university: 20 pp.
- Carluer, N., G. Giannone, et al. (2008). "Vers un outil de dimensionnement des dispositifs enherbés pour limiter les flux de phytosanitaires transférés par ruissellement. Tests de scénarios." *Ingénieries - EAT n° 55 -56*: 61-77.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, et al. (1988). *Applied Hydrology*. New York.
- CORPEN (2007). Les fonctions environnementales des zones tampons. Les bases scientifiques et techniques des fonctions de production des eaux.
- Domange, N. (2004). Etude des transferts de produits phytosanitaires à l'échelle de la parcelle et du bassin versant agricole (Rouffach, Haut Rhin). Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Louis Pasteur. Strasbourg I: 328.
- Gardner, W. R. (1958). "Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table." *Soil Science* 85(4): 228-232.
- Giannone, G. (2008). Contribution à la construction d'un outil de dimensionnement et de positionnement de zones tampons enherbées. Tests de scénarios. Master Geoscience, Environnement et Risques. Spécialité Ingénierie Environnementale. Université Louis Pasteur. Strasbourg, Master Geoscience, Environnement et Risques. Spécialité Ingénierie Environnementale. Université Louis Pasteur.: 57 pp.
- Green, W. H. and G. Ampt (1911). "Studies in soil physics, Part I. The flow of air and water through soils." *Journal of Agricultural Science* 4: 1-24.
- Gril, J. J., G. Le Hénaff, et al. (2010). Mise en place des zones tampons et évaluation de zones tampons existantes destinées à limiter les transferts hydriques de pesticides. Guide de diagnostic à l'échelle du petit bassin versant., Cemagref. DGPAAT du Ministère en charge de l'Agriculture.
- Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. New York.
- Krutz, L. J., S. A. Senseman, et al. (2005). "Reducing herbicide runoff from agricultural fields with vegetative filter strips: a review." *Weed Science* 53: 353-367.
- Lacas, J.-G. (2005). Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées. Etude expérimentale et modélisation en vue de limiter la contamination des eaux de surface. Sciences de l'eau dans l'environnement continental. Ecole doctorale : Sciences de la Terre et de l'Eau, Université Montpellier II. Sciences et techniques du Languedoc: 239 pp + annexes.
- Lacas, J.-G., M. Voltz, et al. (2005). "Using grassed strips to limit pesticide transfer to surface water: a review." *Agronomy for sustainable development* 25: 253-266.
- Lavabre, J., C. Fouchier, et al. (2003). "SHYREG: une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises." *Ingénierie-EAT No. Spécial Risques naturels et aménagement du territoire*(97-111).
- Lecomte, V. (1999). Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant, ENGREF: 210.
- Lecomte, V., E. Barriuso, et al. (2000). Mobilisation des pesticides par le ruissellement érosif : influence de l'état structural de surface du sol. Produits phytosanitaires : analyse, résidus, métabolites, écotoxicologie, modes d'action, transfert Reims.

- Louchart, X. (1999). Transfert de pesticides dans les eaux de surface aux échelles de la parcelle et d'un bassin versant viticole. Etude expérimentale et éléments de modélisation. Science du Sol, ENSAM. Ecole doctorale de Biologie Intégrative: 215 pp.
- Madrigal-Monarez, I. (2004). Rétention de pesticides dans les sols des dispositifs tampon, enherbés et boisés. Rôle des matières organiques, Institut Agronomique Paris-Grignon: 212
- Martin, P., J. F. Ouvry, et al. (2009). "Adaptation of the curve number approach to runoff estimation for loamy soils over a growing season for winter wheat : comparison with the stream approach." Land degradation and development 20: 1-16.
- Mockus, V. (1957). Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application, U.S. Dept. of Agriculture – Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Muñoz-Carpena, R. (1993). Modeling hydrology and sediment transport on vegetative filter strips., North Carolina State Univ. Ph D dissertation.
- Muñoz-Carpena, R., C. T. Miller, et al. (1993). A quadratic Petrov-Galerkin solution for kinematic wave overland flow. Water resources research. 29: 2615-2627.
- Muñoz-Carpena, R. and J. E. Parsons (2010). "VFSSMOD-W: Vegetative Filter Strip Modeling System – Abstract, available at : <http://abe.ufl.edu/carpena/vfssmod/index.shtml> ".
- Muñoz-Carpena, R., J. E. Parsons, et al. (1999). "Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips." Journal of Hydrology 214: 111-129.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, et al. (1982). Estimation of soil water properties. Trans ASAE. 25: 1316-1329.
- Sabbagh, G. J., G. A. Fox, et al. (2009). "Effectiveness of Vegetative Filter Strips in Reducing Pesticide Loading: Quantifying Pesticide Trapping Efficiency. ." Journal of Environmental Quality 38(2): 762-771.
- Salvucci, G. D. and D. Entekhabi (1995). "Ponded infiltration into soils bounded by a water table." Water resources research 31(11): 2751-2759.
- Souiller, C., Y. Coquet, et al. (2002). "Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires. Première partie : Dissipation des produits phytosanitaires à travers un dispositif enherbé ; mise en évidence des processus mis en jeu par simulation de ruissellement et infiltrométrie." Etude et Gestion des sols 9(4): 269-285.
- Tortrat, F. (2005). Modélisation orientée décision des processus de transfert par ruissellement et subsurface des herbicides dans les bassins versants agricoles. Sciences de l'environnement. Rennes, ENSAR - CAREN: 174 pp.
- USDA-SCS (1972). National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology. Washington, D.C.
- USDA (2000). Conservation buffers to reduce pesticides losses. . U. D. o. Agriculture, Natural Resources Conservation Service: 21 pp.
- Van Genuchten, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil Science Society of America Journal 44: 892-898.

Annexe A. Le modèle numérique VFSSMOD

VFSSMOD, acronyme du nom anglais « Vegetative Filter Strip Modelling System » est un modèle numérique qui simule à l'échelle locale les processus hydrologiques et les transferts de sédiments au sein d'une bande enherbée, pour un événement pluvieux ponctuel. Il a été validé sur de nombreux sites et est couramment utilisé par les ingénieurs pour estimer l'efficacité de zones tampons existantes ou en installer de nouvelles (Muñoz-Carpena and Parsons 2010).

Le modèle est régulièrement mis à jour et amélioré pour représenter au mieux les conditions naturelles. Dernièrement, de nouvelles routines ont été ajoutées pour tenir compte de l'horizon racinaire perméable typique des bandes enherbées ou boisées et de la présence de nappes superficielles pouvant influencer sur la capacité d'infiltration du sol. De même, un ensemble de modules sont proposés pour réaliser des analyses de sensibilité des paramètres, évaluer l'efficacité d'une bande enherbée pour des événements pluvieux de période de retour variable ou encore évaluer l'efficacité de la bande enherbée en fonction de sa largeur.

Il est à noter que VFSSMOD modélise les processus uniquement au sein de la bande enherbée et non dans le bassin versant entier. Ainsi, il incombe à l'utilisateur de caractériser la surface drainée par la zone tampon et de bien définir les paramètres d'entrée ainsi que les conditions aux limites du modèle.

Ci-dessous sont présentés les principales équations utilisées pour simuler le ruissellement et l'infiltration au sein du modèle, les paramètres d'entrée à renseigner, ainsi qu'une analyse de sensibilité permettant de définir les paramètres qui affectent le plus les résultats du modèle.

EQUATIONS UTILISEES

Selon (Muñoz-Carpena, Miller et al. 1993), le ruissellement de surface est simulé au sein de la zone tampon à partir de l'onde cinématique à une dimension définie par Henderson (Henderson 1966).

Le taux d'infiltration de l'eau dans le sol est calculé à l'aide de l'équation de (Green and Ampt 1911) :

$$f_p = K_s + \frac{K_s \cdot M \cdot S_{av}}{F_p}$$

où :

- f_p [m/s] est le taux d'infiltration instantané,
- K_s [m/s] est la conductivité hydraulique à saturation,
- M [m^3/m^3], qui est égal à $(\theta_s - \theta_i)$, est le déficit en eau initial du sol (θ_s est la teneur en eau du sol à saturation et θ_i est la teneur en eau initiale du sol),
- S_{av} [m] est la succion du sol au front d'humidité
- F_p [m] est l'infiltration cumulée.

La présence d'une nappe superficielle induit une modification des conditions d'humidité initiales et de la succion au front d'humidité. Lorsqu'elle est présente, ces deux paramètres sont recalculés par le modèle au début et tout au long de l'événement ruisselant en fonction de la profondeur de la nappe.

Pour cela, les équations de (Van Genuchten 1980), (Brooks and Corey 1964) et (Gardner 1958) peuvent être utilisées :

~VAN GENUCHTEN~

Relation Teneur en eau – Pression capillaire :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (|h * \alpha_{VG}|)^n]^{1-1/n}} \quad \text{si } h < h_e$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad \text{si } h \geq h_e$$

Courbe de conductivité :

$$K(h) = K_s * Se^{0.5} * (1 - (1 - Se^m)^m)^2 \quad \text{si } h < h_e$$

$$K(h) = K_s \quad \text{si } h \geq h_e$$

Où :

$\theta(h)$ est la teneur en eau associée à la charge de pression capillaire h ,
 θ_r [%] est la teneur en eau résiduelle,
 θ_s [%] est la teneur en eau à saturation,
 h [m] est la charge de pression capillaire ou pression de succion dans le sol,
 h_e [m] est la pression d'entrée d'air,
 α_{VG} est un paramètre empirique de Van Genuchten,
 n et $m = 1 - 1/n$ sont des paramètres de forme de Van Genuchten,
 Se [-] est le degré de saturation du sol,
 $K(h)$ [m/s] est la conductivité du sol pour la charge de pression capillaire h ,
 K_s [m/s] est la conductivité hydraulique à saturation.

~ BROOKS & COREY ~

Relation Teneur en eau – Pression capillaire :

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * |h * \alpha_{BC}|^{-\lambda} \quad \text{si } h < -1/\alpha_{BC}$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad \text{si } h \geq -1/\alpha_{BC}$$

Courbe de conductivité :

$$K(h) = K_s * Se^\eta \quad \text{si } h < -1/\alpha_{BC}$$

$$K(h) = K_s \quad \text{si } h \geq -1/\alpha_{BC}$$

Où :

$\theta(h)$ est la teneur en eau associée à la charge de pression capillaire h ,
 θ_r [%] est la teneur en eau résiduelle,
 θ_s [%] est la teneur en eau à saturation,
 h [m] est la charge de pression capillaire ou pression de succion dans le sol,
 α_{BC} est un paramètre caractéristique inverse de la pression d'entrée d'air,
 λ et η sont des paramètres de forme de Brooks and Corey,
 Se [-] est le degré de saturation du sol,
 $K(h)$ [m/s] est la conductivité du sol pour la charge de pression capillaire h ,
 K_s [m/s] est la conductivité hydraulique à saturation.

~ GARDNER ~

Courbe de conductivité :

$$K(h) = K_s * e^{-\alpha_{GND} * h}$$

Où :

$K(h)$ [m/s] est la conductivité du sol pour la charge de pression capillaire h ,
 K_s [m/s] est la conductivité hydraulique à saturation,
 α_{GND} est un paramètre de forme de Gardner (il doit être positif),
 h [m] est la charge de pression capillaire ou pression de succion dans le sol.

PARAMETRES D'ENTREE

La construction d'un projet sous VFSMOD requiert le renseignement de six fichiers :

- Le **fichier .ikw : Propriétés du ruissellement entrant** où l'on renseigne :
 - la longueur de la zone tampon (m)

- la largeur de la zone tampon (m)
 - la rugosité ($s/cm^{1/3}$) et la pente transversale (fraction) pour chaque segment de la zone tampon
 - les paramètres associés à la solution numérique de l'onde cinématique
- Le **fichier .iso : Propriétés d'infiltration du sol de la zone tampon** où l'on indique :
 - la conductivité hydraulique à saturation (m/s)
 - la teneur en eau à saturation (%)
 - la hauteur d'eau maximale pouvant être stockée en surface (m)
 - le point auquel le modèle teste si l'eau est accumulée en surface
 - si il y a une nappe superficielle :
 - Si oui, on indique :
 - ✓ la profondeur de la nappe (m)
 - ✓ si l'on souhaite définir la pression d'entrée d'air
 - ✓ les courbes choisies pour le calcul de la teneur en eau initiale et de la succion au front d'humidité
 - ✓ les paramètres associés aux courbes sélectionnées
 - Si non, on indique :
 - ✓ la teneur en eau initiale (%),
 - ✓ la succion moyenne au front d'humidité
- Le **fichier .irn : Hyetogramme**, où l'on renseigne :
 - les couples temps (s) – intensité pluvieuse (m/s) qui représentent la distribution de l'intensité pluvieuse en fonction du temps
 - l'intensité maximale durant l'événement pluvieux (m/s)
- Le **fichier .iro : Hydrogramme de ruissellement**, où l'on renseigne :
 - les couples temps (s) – débit de ruissellement (m^3/s) qui représentent la distribution du débit de ruissellement en fonction du temps
 - le débit maximal de ruissellement durant l'événement (m^3/s)
 - la largeur de la surface contributive (m)
 - la longueur de la surface contributive (m)
- Le **fichier .igr : Propriétés de la couverture végétale** de la zone tampon, où l'on renseigne :
 - la hauteur de l'herbe de la zone tampon (cm)
 - la distance moyenne entre deux pieds (cm)
 - la rugosité associée à la végétation de la zone tampon ($s/cm^{1/3}$)
 - la rugosité associée au sol nu de la zone tampon ($s/cm^{1/3}$)
- Le **fichier .isd : Caractéristiques des sédiments transportés**, où l'on renseigne :
 - la concentration en sédiments dans le ruissellement entrant (g/cm^3)
 - la classe de particules des sédiments entrant
 - la porosité des sédiments transportés/déposés (%)
 - la proportion de sédiments transportés ayant un diamètre supérieur à 0.0037 cm (fraction)

SENSIBILITE DES PARAMETRES

De manière à évaluer l'effet des différents paramètres sur l'efficacité calculée par le modèle, une étude de sensibilité a été réalisée. Celle-ci permet de mettre en évidence les paramètres qui influent le plus sur les résultats et ceux qui sont le moins sensibles.

SCENARIOS

Cette étude a été réalisée à partir de données associées aux sites de la Morcille dans le Beaujolais et de la Jaillière en Loire-Atlantique. Ces sites ont été choisis en raison de la disponibilité de données de terrain (sites suivis par le Cemagref et Arvalis, respectivement) et parce qu'ils présentent des contextes agro-pédo-climatiques contrastés (différents climats locaux, types de sol, régimes hydrologiques, types de cultures ou encore régimes de pente) permettant d'étudier l'influence des paramètres du modèle pour différents cas.

Les caractéristiques de ces sites d'étude, extraites des travaux de (Lacas 2005) (Madrigal-Monarrez 2004), (Adamiade 2004), sont présentées dans le Tableau 7 :

	Morcille	Jaillière
Climat	Semi-continentale, méditerranéenne	Tempérée, océanique
Type de cultures	Vignes	Maïs, blé
Longueur moyenne des parcelles (m)	200	400
Pente moyenne (%)	28	3
Type de sol	Sablo-argileux	Argilo-limoneux
Présence d'une nappe superficielle	Oui	Oui

Tableau 7. Caractéristiques des sites d'étude.

Dans le bassin versant de la Morcille, les bandes enherbées sont généralement situées en bordure de cours d'eau à l'exutoire des parcelles de vigne. Une nappe superficielle est présente à cet endroit et sa profondeur varie au cours de l'année. Selon les données de Lacas (2005) collectées au niveau de la bande enherbée expérimentale, après un épisode pluvieux intense, la nappe peut atteindre 60 cm de profondeur dans la partie aval de la bande et 1,5 m de profondeur dans la partie amont. En été, sauf cas particulier, la nappe superficielle a peu d'influence sur l'efficacité de la zone tampon.

Au niveau du site de la Jaillière, c'est une nappe perchée qui se forme en hiver, au dessus d'une couche imperméable de schistes. La profondeur de cette nappe varie dans l'espace et dans le temps en fonction de la profondeur de la couche imperméable et des précipitations antérieures. De manière générale, son niveau oscille entre 0 et 1,5 mètre de profondeur.

Les scénarios testés pour cette étude sont présentés dans le Tableau 8 et le Tableau 9. Les scénarios de la Morcille en été et du Pays de Caux en hiver (Tableau 8) ont été utilisés pour tester l'influence des paramètres du modèle lorsqu'il n'y a pas de nappe superficielle et les scénarios de la Morcille en hiver et de la Jaillière en hiver (Tableau 9) ont été utilisés pour tester l'influence des paramètres du modèle lorsqu'il y en a une.

	Morcille	Jaillière
Saison	Eté	Eté
Hyetogramme de pluie		
Durée de l'événement pluvieux (h)	2	12
Précipitation cumulée (mm)	20.1	16.5
Type de hyetogramme	P	C
Hyetogramme – Intensité (m/s) = f [temps(s)]	Avec HyetoHydro	Avec HyetoHydro
Intensité maximale (m/s)	Avec HyetoHydro	Avec HyetoHydro
Hydrogramme de ruissellement		
Largeur de l'aire drainée (m)	10	10
Longueur de l'aire drainée (m)	200	500
Surface drainée (km ²)	0.002	0.005
Pente moyenne (%)	25	3
Curve number CN _{II}	93	96
Conditions d'humidité initiale	II	II
Hydrogramme - Débit (m ³ /s) = f [temps (s)]	Avec HyetoHydro	Avec HyetoHydro
Débit de ruissellement maximal (m ³ /s)	Avec HyetoHydro	Avec HyetoHydro
Propriétés de la bande		
Longueur de la bande* VL (m) [*correspond à la largeur : longueur dans la direction de l'écoulement]	6	5
Largeur de la bande* FWIDTH (m) [*correspond à la longueur : périmètre en commun avec la parcelle]	4	10
Pente moyenne SOA (fraction)	0.25	0.03
Rugosité RNA (s/cm ^{1/3})	0.2	0.2
Propriétés d'infiltration du sol		
Profondeur de l'horizon racinaire (cm)	10	15
Conductivité hydraulique à saturation Ks1 (m/s)	0.000189	0.0000833
Profondeur du second horizon (cm)	50	50
Conductivité hydraulique à saturation Ks2 (m/s)	0.0000283	0.0000277
Succion moyenne au front d'humidité SAV (m)	0.1101	0.1668
Teneur en eau initiale OI (cm ³ /cm ³)	0.22	0.15
Teneur en eau à saturation du premier horizon OS (cm ³ /cm ³)	0.52	0.4
Teneur en eau à saturation du deuxième horizon OS (cm ³ /cm ³)	0.40	0.4
Stockage en surface SM (m)	0	0
Propriétés de la couverture végétale de la bande		
Espacement entre les plants SS (cm)	1.6	1.6
Hauteur de l'herbe H (cm)	15	15
Rugosité - Manning's n pour l'herbe VN (s/cm ^{1/3})	0.012	0.012
Rugosité - Manning's n pour le sol nu Vn2 (s/cm ^{1/3})	0.013	0.02
Caractéristiques des sédiments entrants		
Concentration en sédiments (g/cm ³)	0.05	0.05
Classe des particules transportées (1-6)	7	7
Porosité des sédiments déposés	0.40	0.4
Proportion des particules ayant un diamètre > 0.0037 cm	0.55	0.45

Tableau 8. Scénarios agro-pédo-climatiques testés avec absence de nappe superficielle.

	Morcille	Jaillière
Saison	Hiver	Hiver
Hyetogramme de pluie		
Durée de l'événement pluvieux (h)	4	24
Précipitation cumulée (mm)	14.1	21.9
Type de hyetogramme	I	C
Hyetogramme – Intensité (m/s) = f [temps(s)]	Avec HyetoHydro	Avec HyetoHydro
Intensité maximale (m/s)	Avec HyetoHydro	Avec HyetoHydro
Hydrogramme de ruissellement		
Largeur de l'aire drainée (m)	10	10
Longueur de l'aire drainée (m)	200	400
Surface drainée (km ²)	0.002	0.004
Pente moyenne (%)	0.28	0.03
Curve number CN _{II}	92	93
Conditions d'humidité initiales	II	II
Hydrogramme - Débit (m ³ /s) = f [temps (s)]	Avec HyetoHydro	Avec HyetoHydro
Débit de ruissellement maximal (m ³ /s)	Avec HyetoHydro	Avec HyetoHydro
Propriétés de la bande		
Longueur de la bande* VL (m) [*correspond à la largeur : longueur dans la direction de l'écoulement]	6	5
Largeur de la bande* FWIDTH (m) [*correspond à la longueur : périmètre en commun avec la parcelle]	4	10
Pente moyenne SOA (fraction)	0.25	0.03
Rugosité RNA (s/cm ^{1/3})	0.2	0.2
Infiltration - Soil properties		
Water table depth WTD (m)	1	0.8
Profondeur de l'horizon racinaire (cm)	10	10
Conductivité hydraulique à saturation Ks1 (m/s)	0.000189	0.0000833
Conductivité hydraulique à saturation Ks2 (m/s)	0.0000191	0.0000277
Saturated water content OS (cm ³ /cm ³)	0.40	0.4
Stockage d'eau en surface SM (m)	0	0
Teneur en eau résiduelle OR (cm ³ /cm ³)	0.0377	0.07
α (m ⁻¹) (Van Genuchten)	10	1.18
n (Van Genuchten)	1.52	1.45
Propriétés de la couverture végétale de la bande		
Espacement entre les plants SS (cm)	1.6	1.6
Hauteur de l'herbe H (cm)	15	15
Rugosité - Manning's n pour l'herbe VN (s/cm ^{1/3})	0.012	0.012
Rugosité – Manning's n pour le sol nu Vn2 (s/cm ^{1/3})	0.013	0.02
Caractéristiques des sédiments entrants		
Concentration en sédiments (g/cm ³)	0.05	0.05
Classe des particules transportées (1-6;7=choix utilisateur)	7	7
Porosité des sédiments déposés	0.40	0.4
Proportion des particules ayant un diamètre > 0.0037 cm	0.55	0.45

Tableau 9. Scénarios agro-pédo-climatiques testés avec présence de nappe superficielle.

Les hyétogrammes et hydrogrammes de ruissellement ont tous deux été simulés à l'aide du programme HYETOHYDRO décrit en Annexe E. La durée de l'événement pluvieux a été choisie de manière à être représentative du climat local et la précipitation cumulée associée, qui correspond à une période de retour de 6 mois, est extraite de la méthode SHYREG développée par Météo-France et le Cemagref d'Aix-en-provence (Lavabre, Fouchier et al. 2003). La forme du hyétogramme a été choisie pour représenter au mieux l'événement étudié. Les Curve Numbers, eux, ont été choisis à partir de données expérimentales.

Concernant la bande enherbée, la plupart des valeurs sont issues des scénarios de (Giannone 2008), qui s'est basée sur les données expérimentales de (Lacas 2005), (Adamiade 2004)

La succion moyenne au front d'humidité est un paramètre de l'équation de (Green and Ampt 1911) qui peut s'avérer difficile à représenter et les valeurs choisies proviennent des travaux de (Rawls, Brakensiek et al. 1982), cités dans l'outil d'aide de VFSMOD.

Le stockage en surface a été défini comme étant nul pour tous les scénarios. L'eau ne peut rester en surface et doit, soit s'infiltrer dans la bande, soit ruisseler en sortie de bande.

Sur la Morcille, la nappe superficielle a été située à 1 mètre de profondeur en hiver et à la Jaillière, à 0.8 mètre de profondeur. Ces estimations sont plutôt pessimistes mais susceptibles de se produire. Enfin, les paramètres relatifs aux propriétés de la couverture végétale de la bande ainsi que des sédiments transportés ont été fixés à l'aide des fichiers d'aide de VFSSMOD en s'approchant au maximum de la situation rencontrée sur le site d'étude. **Etant donné que ces deux fichiers d'entrée sont utilisés pour la modélisation du transport de sédiments, qui n'est pas exploitée dans ce guide, il n'est pas nécessaire d'attribuer des valeurs précises aux paramètres concernés.**

ÉTUDE DE SENSIBILITE

A l'aide de la méthode Extended FAST, on a étudié l'importance relative des différents paramètres de VFSSMOD. La méthode d'analyse de sensibilité Extended FAST (Saltelli, 1999) est une méthode basée sur la décomposition de la variance : basé sur l'hypothèse d'une unique décomposition en composantes orthogonales de la fonction (le code, le modèle), il est possible de décomposer la variance et de définir des indices de sensibilité. En général, l'évaluation des indices de sensibilité peut devenir très coûteux en raison du grand nombre de simulations qui doit être fait, et la méthode FAST permet de minimiser le coût d'échantillonnage en utilisant la décomposition de Fourier. En pratique, nous avons utilisé des échantillons de 5000 valeurs différentes dans la distribution de chaque paramètre, ce qui est relativement peu par rapport à d'autres méthodes. Le tableau suivant décrivent les distributions qui suit chaque facteur pour l'échantillonnage.

Les Tableau 10 et Tableau 11 présentent les différents paramètres testés et les distributions statistiques qui ont été établies pour chacun d'eux. De manière à palier toute idée pré-conçue, le quasi-totalité des paramètres de VFSSMOD entrant en compte dans la modélisation des processus hydrologique a été testée. Les échantillons ont été créés à l'aide du logiciel de statistiques SIMLAB⁸.

	Loi de densité de probabilité	Morcille	Jaillière
		Été	Été
Longueur de la bande FWIDTH	Fixe	6 ; 4	10 ; 5
Pente SOA	Uniforme	Min. = 0.20 ; Max. = 0.30	Min. = 0.01 ; Max. = 0.07
Rugosité de l'herbe RNA	Triangulaire	Min. = 0.1 ; Max = 0.3 ; Pic = 0.2	Min. = 0.05 ; Max. = 0.4 ; Pic = 0.2
Profondeur de l'horizon racinaire	Uniforme	Min. = 8 ; Max. = 15	Min. = 10 ; Max. = 17
Conductivité Ks1	Lognormale	$\mu = -8.57 ; \sigma = 0.69$	$\mu = -10.09 ; \sigma = 0.69$
Profondeur deuxième horizon	Uniforme	Min. = 30 ; Max. = 100	Min. = 30 ; Max. = 100
Conductivité Ks2	Lognormale	$\mu = -10.47 ; \sigma = 0.69$	$\mu = -11.16 ; \sigma = 0.69$
Succion moyenne au front d'humidité SAV	Uniforme	Min. = 0.05 ; Max. = 0.30	Min. = 0.05 ; Max. = 0.30
Teneur en eau initiale OI	Uniforme	Min. = 0.10 ; Max. = 0.35	Min. = 0.20 ; Max. = 0.38
Teneur en eau à saturation OS	Normale	$\mu = 0.40 ; \sigma = 0.03$	$\mu = 0.43 ; \sigma = 0.03$
Espace entre les plans SS	Uniforme	Min. = 1.3 ; Max. = 2.1	Min. = 1.3 ; Max. = 2.1
Hauteur de l'herbe H	Uniforme	Min. = 10 ; Max. = 35	Min. = 10 ; Max. = 35
Rugosité herbe VN	Triangulaire	Min. = 0.084 ; Max = 0.016; Pic = 0.012	Min. = 0.084 ; Max = 0.016; Pic = 0.012
Rugosité sol Vn2	Triangulaire	Min. = 0.011 ; Max. = 0.04 ; Pic = 0.013	Min. = 0.011 ; Max. = 0.04 ; Pic = 0.013

Tableau 10. Distribution statistique des paramètres d'entrée testés en l'absence de nappe superficielle.

⁸ SIMLAB (2009), Version 3.2 Simulation Environment for Uncertainty and Sensitivity Analysis, developed by the Joint Research Centre of the European Commission.

	Loi de densité de probabilité	Morcille	Jaillière
		Hiver	Hiver
Longueur de la bande FWIDTH	Fixe	6 ; 4	10 ; 5
Pente SOA	Uniforme	Min. = 0.20 ; Max. = 0.30	Min. = 0.01 ; Max. = 0.07
Rugosité de l'herbe RNA	Triangulaire	Min. = 0.1 ; Max. = 0.3 ; Pic = 0.2	Min. = 0.05 ; Max. = 0.4 ; Pic = 0.2
Profondeur de la nappe WTD	Uniforme	Min. = 0.4 ; Max. = 2	Min. = 0.4 ; Max. = 2
Profondeur de l'horizon racinaire	Uniforme	Min. = 8 ; Max. = 15	Min. = 8 ; Max. = 15
Conductivité Ks1	Lognormale	$\mu = -8.57 ; \sigma = 0.69$	$\mu = -9.39 ; \sigma = 0.69$
Conductivité Ks2	Lognormale	$\mu = -10.87 ; \sigma = 0.69$	$\mu = -13.28 ; \sigma = 0.69$
Teneur en eau à saturation OS	Normale	$\mu = 0.40 ; \sigma = 0.03$	$\mu = 0.40 ; \sigma = 0.03$
Teneur en eau résiduelle OR	Normale	$\mu = 0.038 ; \sigma = 0.03$	$\mu = 0.07 ; \sigma = 0.03$
alpha VG	Normale	$\mu = 10 ; \sigma = 2$	$\mu = 1.18 ; \sigma = 0.05$
n VG	Normale	$\mu = 1.52 ; \sigma = 0.05$	$\mu = 1.45 ; \sigma = 0.05$
Espace entre les plans SS	Uniforme	Min. = 1.3 ; Max. = 2.1	Min. = 1.3 ; Max. = 2.1
Hauteur de l'herbe H	uniforme	Min. = 10 ; Max. = 35	Min. = 10 ; Max. = 35
Rugosité herbe VN	Triangulaire	Min. = 0.084 ; Max. = 0.016 ; Pic = 0.012	Min. = 0.084 ; Max. = 0.016 ; Pic = 0.012
Rugosité sol Vn2	Triangulaire	Min. = 0.011 ; Max. = 0.04 ; Pic = 0.013	Min. = 0.011 ; Max. = 0.04 ; Pic = 0.013

Tableau 11. Distribution statistique des paramètres d'entrée testés en présence de nappe superficielle.

RESULTATS

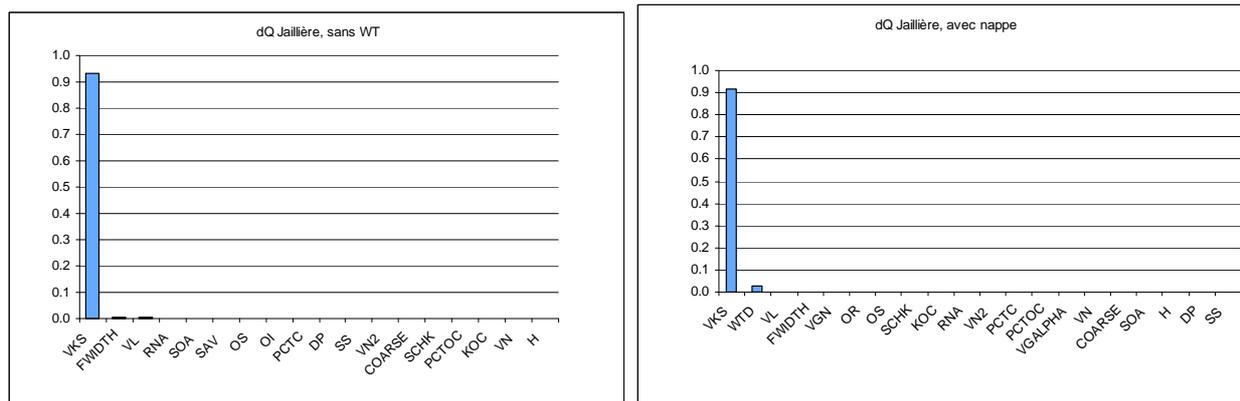


Tableau 12. Résultats de l'analyse de sensibilité FAST : hiérarchie des paramètres auxquels la réduction en eau (dQ) est sensible, en absence et présence de nappe superficielle sur la Jaillière.

Annexe B. La méthode du SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number)

La méthode du SCS-CN (USDA-SCS 1972) a été développée par l'USDA-NRCS (US Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service), anciennement appelé l'USDA-SCS (US Department of Agriculture – Soil Conservation Service). Elle permet d'estimer le ruissellement de surface induit par un épisode pluvieux donné en fonction des caractéristiques du bassin versant dans lequel il survient. Cette méthode a été développée à partir de mesures réalisées sur des petits bassins versants agricoles aux Etats-Unis et met en jeu un paramètre empirique qui caractérise le potentiel de ruissellement d'un sol : le **Curve Number (CN)**.

Pour un événement pluvieux donné, le volume ruisselé est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{[Eq.1]} \quad Q &= \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} & \text{si } P > I_a & \quad \text{où :} & \begin{array}{l} Q \text{ (mm) est le ruissellement direct,} \\ P \text{ (mm) est la précipitation cumulée,} \\ I_a \text{ (mm) sont les pertes initiales,} \\ S \text{ (mm) est la rétention du sol.} \end{array} \\
 Q &= 0 & \text{si } P \leq &
 \end{aligned}$$

La rétention du sol et les pertes initiales sont calculées à l'aide des équations suivantes :

$$\text{[Eq.2]} \quad S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{où :} \quad \begin{array}{l} S \text{ (mm) est la rétention du sol,} \\ CN \text{ est le Curve Number,} \end{array}$$

$$\text{[Eq.3]} \quad I_a = 0.2 * S \quad \text{où :} \quad \begin{array}{l} I_a \text{ sont les pertes initiales.} \end{array}$$

Le Curve Number est un paramètre empirique qui dépend de la classe hydrologique du sol, de la couverture du sol, des conditions hydrologiques et des conditions d'humidité initiales. A partir d'un grand nombre de données sur le territoire américain, l'USDA-SCS (1972) a défini des Curve Numbers pour une large gamme de situations.

Les valeurs fournies sont associées à des conditions d'humidité moyennes (CN_{II}) mais il est possible de calculer un Curve Number CN_I , représentatif de conditions d'humidité initiales sèches, et un Curve Number CN_{III} , représentatif de conditions d'humidité initiales humides, à l'aide des équations de (Chow, Maidment et al. 1988) :

$$CN_I = 4.2 * \frac{CN_{II}}{10 - 0.058 * CN_{II}} \quad \text{et} \quad CN_{III} = 23 * \frac{CN_{II}}{10 + 0.13 * CN_{II}}$$

Pour construire l'hydrogramme de ruissellement, l'USDA propose l'utilisation **d'hydrogrammes unitaires** qui représentent l'évolution du débit de ruissellement en fonction du temps pour un volume de pluie nette de 1 mm. Cet hydrogramme unitaire conceptuel est caractéristique du bassin versant étudié et peut s'obtenir à l'aide de données de terrain. Cependant, celles-ci ne sont pas toujours disponibles. Dans ce contexte, Mockus a créé un hydrogramme unitaire synthétique permettant de construire l'hydrogramme unitaire d'un bassin versant directement à partir de ses caractéristiques physiques (Figure 49). Celui-ci a été développé à partir de l'examen de nombreux hydrogrammes unitaires naturels.

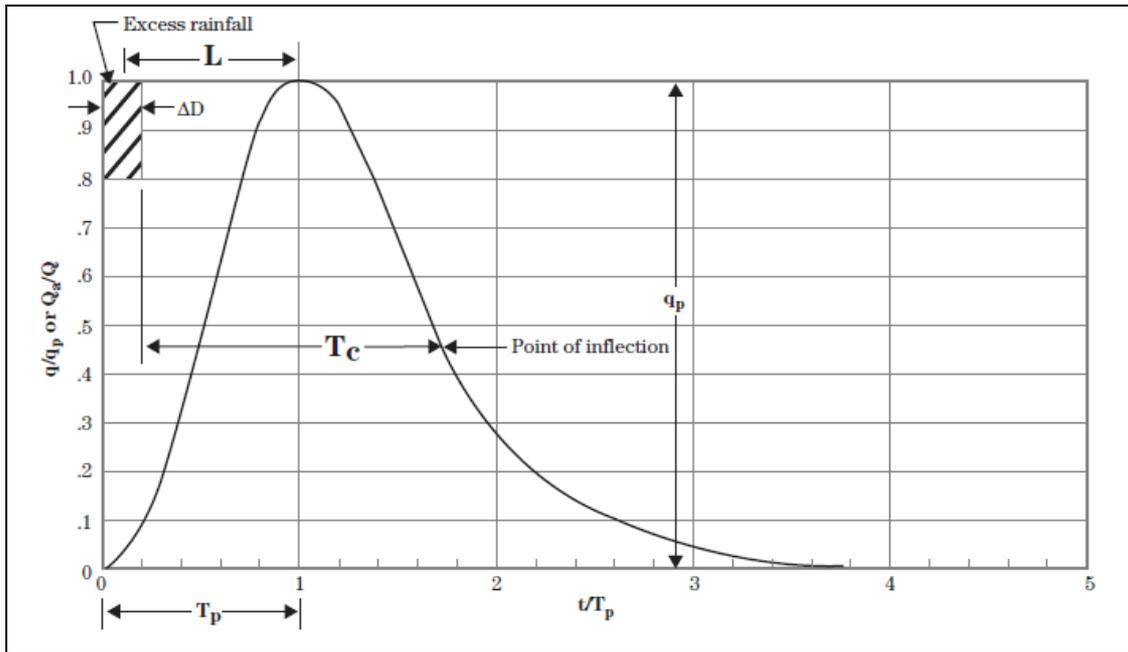


Figure 49. Hydrogramme unitaire synthétique (USDA-SCS 1972).

Pour construire un hydrogramme unitaire à partir de l'hydrogramme unitaire synthétique, il est nécessaire de calculer le **temps de retard** du bassin versant L , le **temps de pointe** T_p et le **débit de pointe** Q_p en fonction des caractéristiques physiques du bassin versant étudié. Il n'est pas nécessaire de calculer le temps de concentration T_c si ces trois grandeurs sont déterminées.

Le **temps de retard** du bassin versant L se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$[\text{Eq.4}] \quad L = \frac{\left(\frac{l}{0,3048}\right)^{0,8} * \left(\frac{S}{25,4} + 1\right)^{0,7}}{1900 * Y^{0,5}} \quad \text{où :}$$

L (h) est le temps de retard,
 l (m) est le plus long chemin hydraulique,
 S (mm) est la rétention maximale du sol,
 Y (%) est la pente moyenne du bassin versant.

Le **temps de pointe** T_p de l'hydrogramme unitaire et se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$[\text{Eq.5}] \quad T_p = \left(\frac{\Delta D}{2}\right) + L \quad \text{où :}$$

T_p (h) est le temps de pointe,
 ΔD (h) est la durée de averse élémentaire,
 L (h) est le temps de retard du bassin versant.

Le **débit de pointe** de l'hydrogramme unitaire Q_p se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$[\text{Eq.6}] \quad Q_p = \frac{0,208 * A}{T_p} \quad \text{où :}$$

A (km²) est la surface drainée,
 T_p (h) est le temps de pointe.

Le hétérogramme de pluie est ensuite divisé en plusieurs averses élémentaires, et la hauteur de pluie nette associée à chacune d'elles est multipliée par l'hydrogramme unitaire. L'hydrogramme de ruissellement total est alors obtenu en sommant l'ensemble des hydrogrammes élémentaires (convolution) (Figure 50).

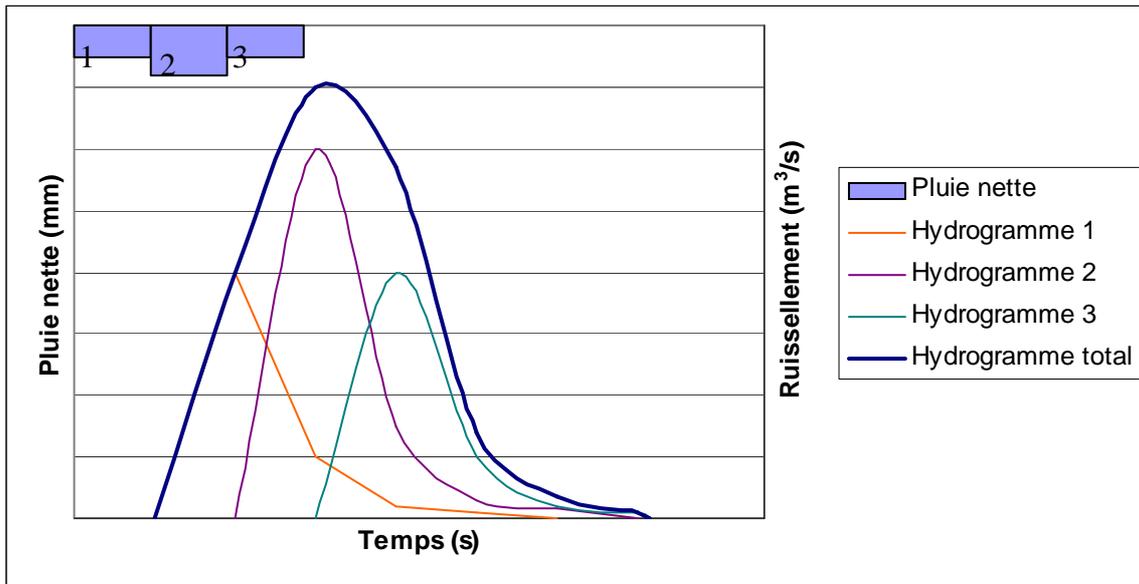


Figure 50. Construction de l'hydrogramme de ruissellement à partir du hétérogramme de pluie nette.

Limites de la méthode :

- Le Curve Number est un paramètre empirique conceptuel qui a été développé aux Etats-Unis et qui n'a à ce jour pas été calibré pour une utilisation sur le territoire français. Les valeurs recommandées par l'(USDA-SCS 1972) (voir paragraphe 4.1.5) ne sont pas forcément adaptées aux contextes agro-pédo-climatiques français et il s'avère très difficile de choisir un Curve Number représentatif des conditions étudiées. Les erreurs d'estimation sont d'autant plus à craindre que le Curve Number est un paramètre très sensible : (Boughton 1989) a montré qu'une variation de 15 % de sa valeur pouvait augmenter ou diminuer de 50 % le volume ruisselé.
- La méthode du SCS-CN a été développée à partir de bilans hydrologiques annuels et peut se révéler inexacte pour des événements pluvieux ponctuels de faible période de retour. Ainsi, pour de faibles volumes de pluie, l'estimation du volume ruisselé peut être biaisée (USDA-SCS 1972).
- L'évolution du potentiel de ruissellement du sol au cours de l'événement pluvieux n'est pas prise en compte. Le volume ruisselé est calculé à partir d'un Curve Number représentatif des conditions initiales et ceci peut être à l'origine d'erreurs lors de la construction de l'hydrogramme de ruissellement.

⇒ Certes la méthode du SCS-CN présente des limites mais, en l'absence de données de terrain, elle demeure une solution efficace pour estimer le ruissellement de surface à l'échelle de la parcelle agricole, en tenant compte de l'occupation de son sol.

Annexe C. Le programme IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols)

Le programme d'Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS) du Groupement d'Intérêt Scientifique SOL est coordonné par l'unité INFOSOL de l'INRA (centre d'Orléans) et vise à constituer des bases de données sur les sols et leur répartition géographique en France⁹. Les données recensées dans ce programme sont traitées à différentes échelles :

- celle du Secteur de référence,
- celle du programme « Connaissance Pédologique de France »,
- celle du programme « Référentiel Régional Pédologique », qui vise à achever et harmoniser la couverture cartographique nationale à l'échelle du 1 : 250 000.

LA BASE DE DONNEES DONESOL

L'ensemble des données acquises sur les sols du territoire français sont gérées dans une base de données informatique unique et cohérente d'une région à l'autre : DONESOL. Cette structure contient les études réalisées sur fosses pédologiques ou à partir de sondages, et permet de créer des outils cartographiques d'aide à la décision pour l'agriculture, l'environnement et l'aménagement des territoires.

Pour chaque étude sont renseignés la localisation du site, la description des horizons de sol, les résultats des analyses de sol réalisées en laboratoire (texture, teneur en matière organique...) ainsi que les unités typologiques et/ou cartographiques associées.

En 2010, la base de données contenait environ 13 000 profils pédologiques et 36 000 sondages à la tarière dont la répartition géographique sur le territoire français n'est pas régulière.

Important : Les données contenues dans DONESOL appartiennent aux différents organismes ayant participé aux études de sol et leur **consultation**, qui fait l'objet d'autorisations préalables, peut selon le cas être **gratuite ou payante**.

LA BASE DE DONNEES DES ANALYSES DE TERRES (BDAT)

La base de données des analyses de terre a été construite à partir de 790 000 échantillons **d'horizons de surface** de sols cultivés, prélevés en France entre 1990 et 2000. Chaque année, la base de donnée est alimentée par environ 250 000 nouveaux résultats d'analyses.

Souvent réalisées à la demande des agriculteurs, les analyses concernent :

- plusieurs paramètres physico-chimiques tels que le pH, la capacité d'échanges cationiques ou le taux de saturation,
- les teneurs en carbone organique, phosphore extractible, cations échangeables et métaux lourds,
- la classe texturale de l'horizon de surface.

Important : Les résultats d'analyses de terre sont disponibles gratuitement sur le site du Gissol et agrégées à **l'échelle cantonale**.

⁹ Gissol (2009), DoneSol version 2.0. Dictionnaire de données. Pour utilisation dans le cadre du programme « Inventaire, Gestion et Conservation des Sols » (IGCS).

Gissol (2010), Programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols, disponible à l'adresse suivante : <http://www.gissol.fr/programme/igcs/igcs.php> (consulté le 14 octobre 2010).

Annexe D. Méthodes de détermination de la texture d'un sol

Trois méthodes sont proposées ci-dessous à l'utilisateur pour déterminer la texture des sols de la surface contributive et de la zone tampon.

♦ METHODE 1 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE ET TRIANGLE DES TEXTURES

L'analyse granulométrique consiste en la détermination des pourcentages d'argile, de limon et de sable présents dans un sol. Celle-ci s'effectue suivant la méthode normalisée AFNOR NF X31-107 et permet de déterminer la classe texturale de l'échantillon prélevé sur la zone d'étude en reportant les valeurs trouvées dans un triangle de texture. En France, le triangle le plus utilisé est le **triangle du GEPPA** qui contient 17 classes texturales. Comme l'indique la Figure 51, le positionnement des pourcentages en argile et limon définit la texture de l'échantillon étudié.

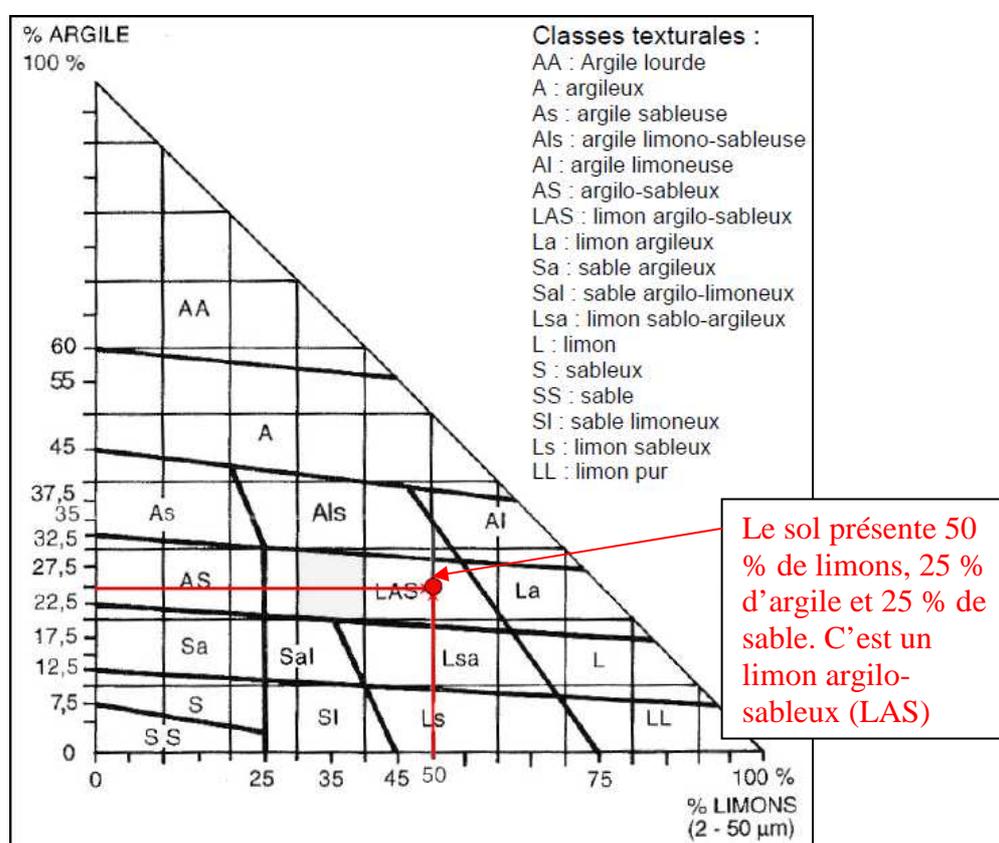


Figure 51. Diagramme des textures du GEPPA (Baize, 1995).

♦ METHODE 2 : UTILISATION DE LA BASE DE DONNES DONESOL

Si aucune analyse granulométrique n'a pu être réalisée sur le site d'étude, il est possible de consulter la base de données DONESOL, présentée en Annexe C. Pour cela, il convient de contacter l'INRA d'Orléans (en la personne de Dominique Arrouays : dominique.arrouays@orleans.inra.fr ou Benoît Toutain : benoit.toutain@orleans.inra.fr) pour prendre connaissance des études réalisées sur ou près du site étudié. Si une étude existe, une demande de consultation peut être faite auprès de l'INRA, qui se charge ensuite de la mise en relation avec son auteur. Selon les auteurs et les études, l'accès peut être gratuit ou payant.

Une fois en possession de l'étude, l'utilisateur peut consulter les informations collectées, notamment sur la texture des différents horizons du sol. Pour chaque horizon, la texture observée par le pédologue sur le terrain se situe dans le champ TEXTUR de la table HORIZON et les résultats de l'analyse

granulométrie réalisée en laboratoire sont présentés dans les champs FRACTION, FRACT_1, FRACT_2, FRACT_3, FRACT_4, FRACT_5, FRACT_6, FRACT_7 et FRACT_8 de la table ANALYSES.

Note : Le dictionnaire de données permettant de visualiser le contenu de chaque étude et de comprendre l'organisation de DONESOL est disponible gratuitement sur le site suivant :

http://www.gissol.fr/outil/donesol/dictionnaire-donesol-igcs_2010_09_23.pdf

♦ METHODE 3 : UTILISATION DE LA BASE DE DONNEES DES ANALYSES DE TERRE

Si aucune étude de sol n'a été trouvée au niveau du site d'implantation de la zone tampon dans DONESOL, il est possible de consulter la base de données des analyses de terre qui ont été réalisées sur le sol français. L'utilisateur doit :

- 1) Se connecter à l'adresse : <http://bdat.gissol.fr/geosol/index.php>
- 2) Sélectionner « Texture », puis « Classes de textures GEPPA simplifiées » (Figure 52) dans la rubrique « Élément ».

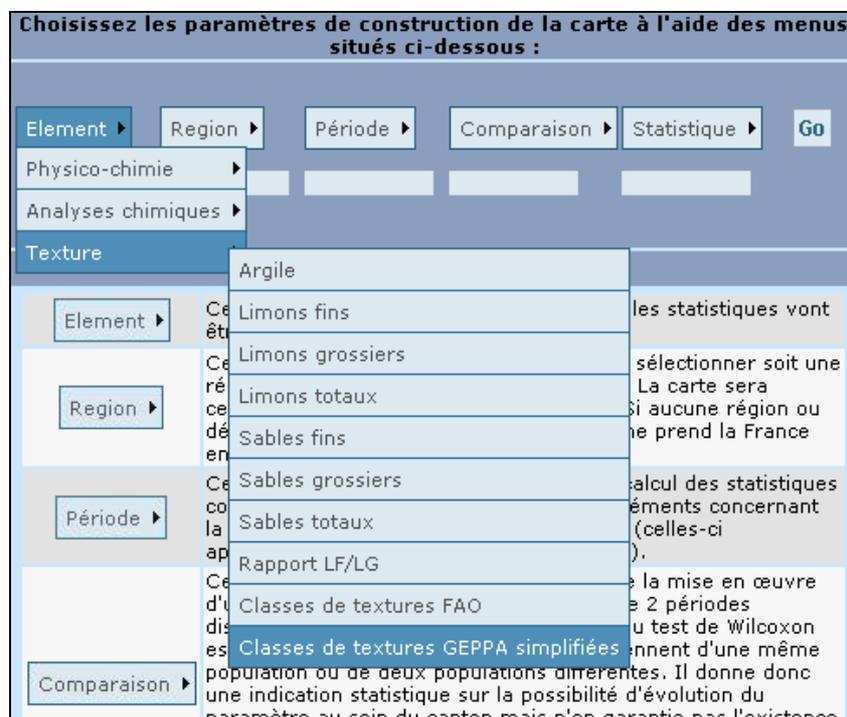


Figure 52. Sélection de la classe de texture comme paramètre d'étude dans la base de données des analyses de terre du GISsol.

- 3) Sélectionner la région, puis le département dans lequel se situe le site d'étude dans la rubrique « Région ».
- 4) Les rubriques « Période » et « Comparaison » ne sont pas à renseigner.
- 5) Sélectionner « Texture dominante » dans la rubrique « Statistique » et cliquer sur « Go ».

Les informations apparaissent alors sous forme de carte (Figure 53). Il suffit de localiser le canton dans lequel se situe le site d'étude et de consulter la légende à droite pour prendre connaissance de la classe de texture dominante des sols. Les abréviations employées pour désigner les classes de texture sont les mêmes que celles indiquées pour le triangle du GEPPA sur la Figure 51. Lorsque le nombre des analyses effectuées sur un canton est inférieur à 10, la texture dominante de l'horizon de surface des sols agricoles n'est pas renseignée faute de représentativité.

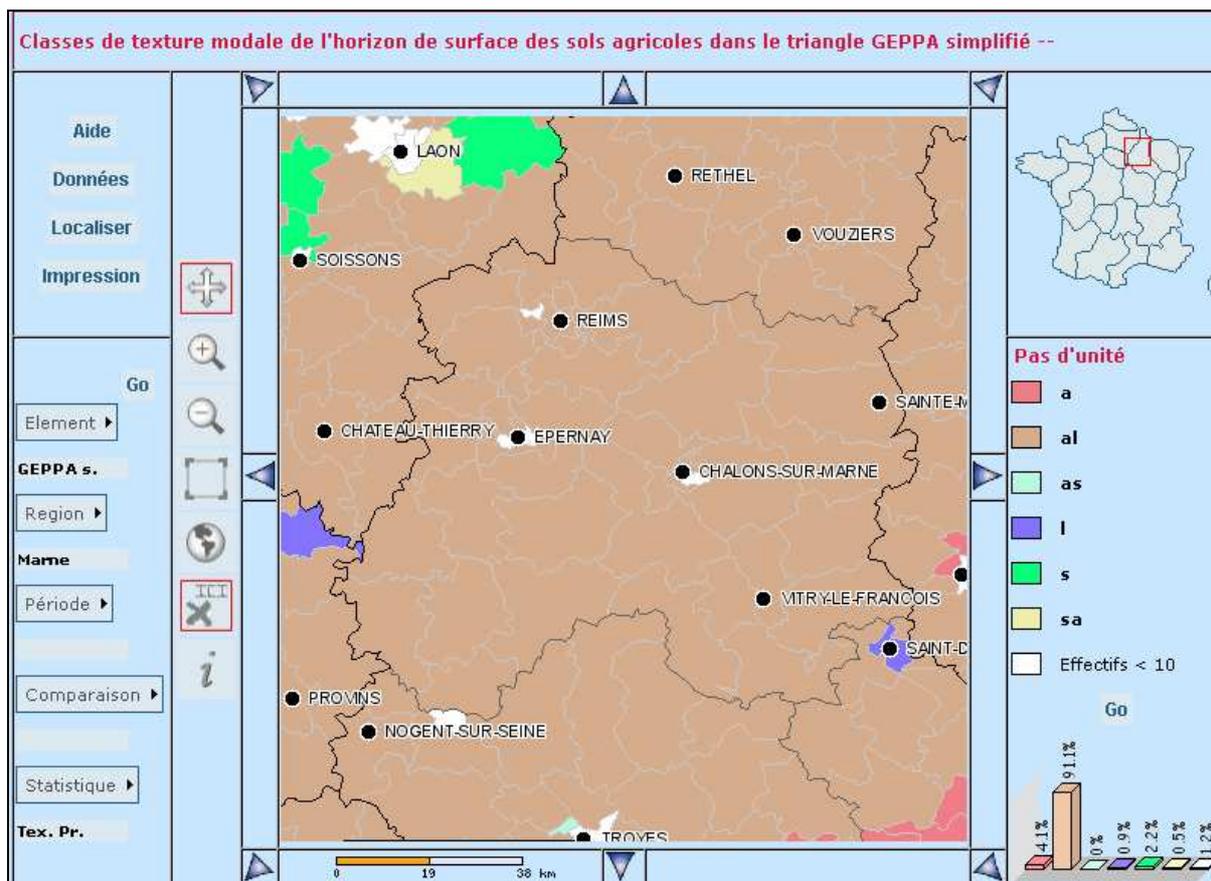


Figure 53. Classes de texture des sols du département de la Marne.

Si l'on clique sur le bouton « Localiser » en haut à gauche de l'écran, on peut sélectionner directement le canton qui nous intéresse et zoomer dessus sur la carte. De plus, si l'on clique sur le bouton « Données », on peut visualiser l'ensemble des analyses effectuées sur les cantons du département étudié (Figure 54).

Listing des données							
Rappel : Les cantons dont le nombre d'analyses n'excède pas 10 ne sont pas affichés dans ce listing							
Visionner en pdf - Exporter en CSV							
Élément :		Texture GEPPA					
Période :							
Région ou dept :		Marne					
Unité :		Pas d'unité					
Enregistrements :		37					
Version :		version 3.2.0.1 du 01/12/2008.					
Canton	Numéro	SAU (ha)	Nombre de mesures	Texture dominante	Effectif dominant	Texture secondaire	Effectif secondaire
ANGLURE	5101	14844	105	AL	74	A	16
AVIZE	5102	9010	191	AL	144	L	38
AY	5103	7798	174	AL	118	A	33
BEINE-NAUROY	5104	26464	433	AL	391	SA	19
BOURGOGNE	5105	25185	471	AL	341	SA	80
CHALONS-EN-CHAMPAGNE	5196	1340	37	AL	28	L	5
CHALONS-EN-CHAMPAGNE-2E	5135	12106	84	AL	83	SA	1
CHALONS-EN-CHAMPAGNE-3E	5136	3969	44	AL	30	A	9
CHATILLON-SUR-MARNE	5107	7231	108	AL	66	A	27
DORMANS	5109	7848	176	AL	111	A	30
ECURY-SUR-COOLE	5110	36370	251	AL	220	A	16
EPERNAY-2E	5137	4562	74	AL	59	L	9
ESTERNAY	5112	18274	95	AL	68	L	25
FERE-CHAMPENOISE	5113	32590	141	AL	105	SA	18
FISMES	5114	11599	224	AL	159	SA	39
GIVRY-EN-ARGONNE	5108	27470	142	AL	115	A	16
HEILTZ-LE-MAURUPT	5115	17495	155	AL	124	A	29
MARSON	5116	28644	108	AL	97	A	6
MONTMIRAIL	5117	18759	151	AL	95	L	34
MONTMORT-LUCY	5118	16110	213	AL	150	L	48

Figure 54. Listing des données recueillies sur la texture des horizons de surface des cantons du département de la Marne.

Attention : La texture des sols peut varier significativement au sein d'un même canton et seule la texture dominante est fournie par cette base de donnée. Ainsi, il est possible que la texture du sol étudié soit différente de celle qui est présentée.

Attention : Les données concernent uniquement l'horizon de surface et aucune indication n'est fournie concernant les horizons sous-jacents. Ceci est un facteur limitant pour notre problématique.

Annexe E. Le programme HYETOHYDRO

Le programme **HYETOHYDRO** a été conçu sous OpenOffice (3.1) pour construire des **hyétogrammes de pluie** et des **hydrogrammes de ruissellement** pouvant être directement exportés vers VFSMOD.

Le logiciel HYETOHYDRO doit impérativement être ouvert sous OpenOffice (version 3). Il faut accepter d'activer les Macros à l'ouverture du fichier.

Le fichier comporte deux onglets :

- Le premier, nommé « Scénarios pluie et ruissellement », permet à l'utilisateur de simuler un hyétogramme de pluie et l'hydrogramme de ruissellement associé,
- Le second, nommé « Scénario ruissellement seul » permet de simuler un hydrogramme de ruissellement à partir d'un événement pluvieux renseigné par l'utilisateur.

Chacune des deux feuilles Excel se divisent en 2 parties distinctes : une « Interface », à gauche de l'écran, et une « Notice », à droite de l'écran (Figure 55).

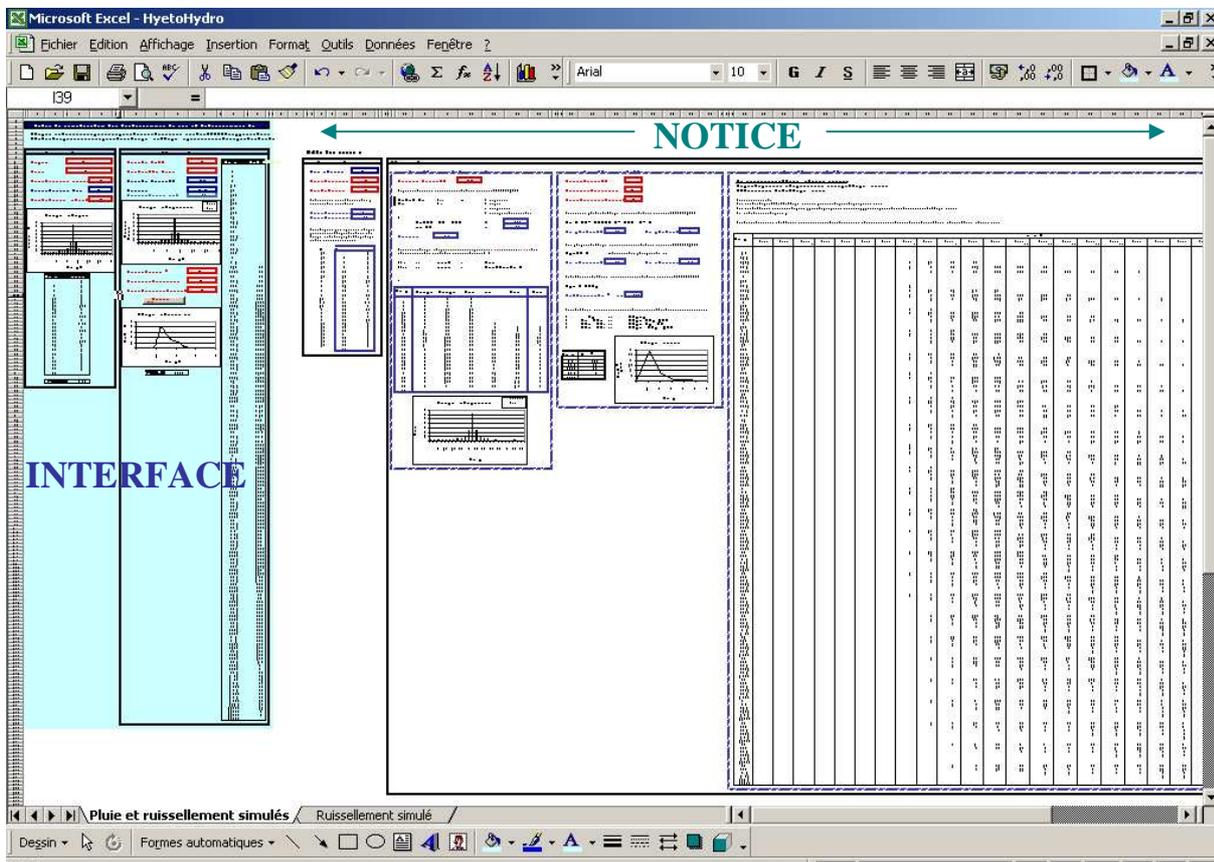


Figure 55. Vue d'ensemble de la feuille Excel HyetoHydro.

L'interface est divisée en deux parties. Celle de gauche est consacrée au hyétogramme de pluie et celle de droite à l'hydrogramme de ruissellement. Dans les deux cas, l'utilisateur peut y renseigner les paramètres d'entrée requis pour la construction des hyétogrammes et hydrogrammes (cases sur fond blanc et à encadré rouge) et observer les résultats obtenus.

Le détail des opérations effectuées pour construire les hyétogrammes de pluie et hydrogrammes de ruissellement est visible sur la notice. Ceci permet à l'utilisateur de visualiser les différentes étapes de

calcul et de prendre connaissance des démarches appliquées, qui sont exposées en détail dans les deux paragraphes suivants.

CONSTRUCTION DES HYETOGRAMMES DE PLUIE

Les données requises par le programme pour construire un hyétogramme sont les coordonnées d'un point de la zone considérée (Lambert II étendu), la durée de l'événement pluvieux (en heures), le volume d'eau tombé (en mm) et la forme du hyétogramme.

Comme indiqué dans le paragraphe 4.1.5, la durée de l'événement pluvieux est renseignée par l'utilisateur et le volume d'eau tombé est défini en fonction de la localisation du site et de la saison étudiée (à partir de données d'Intensité-Durée-Fréquence fournies par Hydris Hydrologie). Après avoir étudié les événements pluvieux enregistrés sur le site de la Morcille (Beaujolais, Rhône-Alpes), trois types de hyétogrammes ont été définis et sont proposés à l'utilisateur (Figure 56).

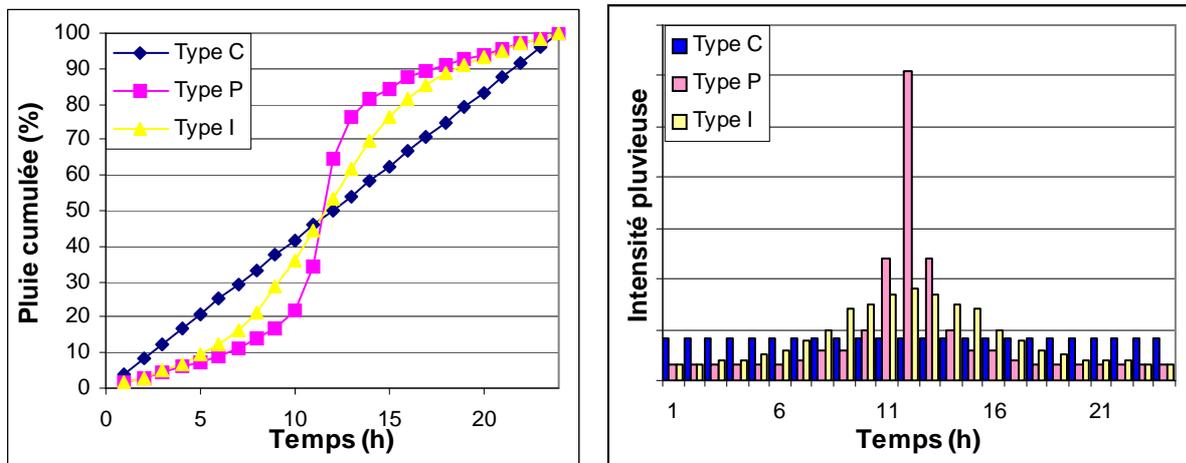


Figure 56. Formes cumulée et non cumulée des types de hyetogramme proposés à l'utilisateur.

Le **hyétogramme de type C** (« Créneau ») a la forme d'un créneau (non réel) et peut représenter des événements pluvieux plutôt longs et d'intensité constante. Le **hyétogramme de type P** (« Pic ») a la forme d'un pic marqué et symbolise des événements de type orageux, plutôt courts et intenses. Quant au **hyétogramme de type I** (« Intermédiaire »), il a la forme d'un pic beaucoup moins marqué et une distribution pouvant s'adapter à des événements pluvieux de plus ou moins longue durée. Dans chaque cas, il est considéré que la moitié du volume de pluie tombé s'abat au cours de la première partie de l'événement pluvieux (symétrie).

Note : La forme des hyétogrammes a été définie à partir des seules données pluviométriques du site de la Morcille, situé dans le Beaujolais. Ainsi, il se peut que l'intégralité des événements pluvieux ne soit pas représentée par ces trois formes. Toutefois, les courbes d'intensité cumulée créées ont été comparées avec celles utilisées sur le territoire américain et les types P et I sont apparus très semblables aux types IA et II qui y sont rencontrés.

Quelle que soit la durée de l'événement pluvieux renseignée, celle-ci est divisée en 24 intervalles de temps réguliers, et pour chacun d'eux, l'intensité pluvieuse est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$I_n = \frac{P * C_n * 24}{D * 1000 * 3600} \quad \text{où :}$$

I_n [m/s] est l'intensité pluvieuse associée à l'intervalle n,
 P [mm] est le volume total de pluie tombée,
 D [s] est la durée de l'événement pluvieux,
 C_n [-] est la proportion de pluie tombée pendant l'intervalle n.

Pour le hyétogramme de type C, C_n est constant et égale à 4.16.

Pour le hyétogramme de type P, C_n prend les valeurs suivantes :

Intervalle n	Cn (%)
1	1.5
2	1.5
3	1.5
4	1.5
5	1.5
6	1.5
7	2
8	3

Intervalle n	Cn (%)
9	3
10	5
11	12
12	30.5
13	12
14	5
15	3
16	3

Intervalle n	Cn (%)
17	2
18	1.5
19	1.5
20	1.5
21	1.5
22	1.5
23	1.5
24	1.5

Pour le hyetogramme de type I, Cn prend les valeurs suivantes :

Intervalle n	Cn (%)
1	2
2	2
3	2
4	2
5	2.5
6	3
7	4
8	5

Intervalle n	Cn (%)
9	7
10	8
11	9
12	9
13	9
14	8
15	7
16	5

Intervalle n	Cn (%)
17	4
18	3
19	2.5
20	2
21	2
22	2
23	2
24	2

Attention : La démarche exposée ci-dessus n'est appliquée que dans l'onglet « Scénarios pluie et ruissellement ». Si c'est l'onglet « Scénario ruissellement seul » qui est sélectionné, alors l'utilisateur renseigne lui-même le hyétogramme de pluie. Toutefois, celui-ci doit être construit de la même manière qu'évoqué précédemment, c'est-à-dire en divisant l'événement pluvieux en 24 intervalles de temps régulier et en indiquant l'intensité pluvieuse moyenne relative à chaque intervalle (Figure 57).

Pour chacun des deux onglets, on peut visualiser le hyétogramme construit en dessous des données d'entrée fournies, un tableau contenant les couples Temps-Intensité qui définissent la distribution de la pluie dans le temps et l'intensité pluvieuse maximale rencontrée au cours de l'événement (Figure 57). Ces deux derniers éléments peuvent être exportés vers VFSSMOD en cliquant sur le bouton « Exporter le hyétogramme » situé tout en bas de l'interface (Figure 57).

Hyetogramme de pluie

Coordonnées (m) : X
 (Lambert II étendu) Y

Saison :

Durée de l'événement pluvieux (h) :

Hauteur de pluie tombée (mm) :
 [T=1 an saisonnalisé]

Type de hyetogramme (C, I ou P) :

Hyetogramme de pluie

Temps	Intensité (mm/h)
0h 0min	4,1
0h 5min	4,1
0h 10min	4,1
0h 15min	4,1
0h 20min	4,1
0h 25min	4,1
0h 30min	5,5
0h 35min	8,2
0h 40min	8,2
0h 45min	13,7
0h 50min	32,8
0h 55min	83,4
1h 0min	32,8
1h 5min	13,7
1h 10min	8,2
1h 15min	8,2
1h 20min	5,5
1h 25min	4,1
1h 30min	4,1
1h 35min	4,1
1h 40min	4,1
1h 45min	4,1
1h 50min	4,1
1h 55min	4,1
2h 0min	0,0

Pic (mm/h) :

Nom fichier : **

Hyetogramme de pluie

Durée de l'événement pluvieux (h) :

Temps	Intensité (mm/h)
0h 0min	0,0
0h 8min	2,0
0h 15min	3,0
0h 23min	3,0
0h 30min	3,0
0h 38min	4,0
0h 45min	5,0
0h 53min	5,0
1h 0min	6,0
1h 8min	7,0
1h 15min	7,0
1h 23min	6,0
1h 30min	5,0
1h 38min	4,0
1h 45min	3,0
1h 53min	2,0
2h 0min	1,0
2h 8min	1,0
2h 15min	1,0
2h 23min	1,0
2h 30min	1,0
2h 38min	1,0
2h 45min	1,0
2h 53min	1,0
3h 0min	0,5

Pic (mm/h) :

Hyetogramme de pluie

Nom fichier : **

Figure 57. Interface du programme HyetoHydro pour la construction des hyetogrammes de pluie. Onglet « Scénarios pluie et ruissellement » à gauche ; onglet « Scénario ruissellement seul » à droite.

CONSTRUCTION DES HYDROGRAMMES DE RUISSELLEMENT

L'hydrogramme de ruissellement est construit à l'aide de la méthode du SCS-CN (USDA-SCS 1972) décrite dans l'Annexe B. Les données requises par le programme pour construire un hydrogramme sont :

- le hyétogramme de pluie,
- le Curve Number représentatif du milieu au moment de l'événement ruisselant,
- la surface contributive (en m²),
- la longueur maximale de la surface contributive (en m),
- la pente transversale moyenne de la surface contributive (en %).

La construction d'un hydrogramme de ruissellement se fait en 3 étapes. Celles-ci sont décrites ci-dessous.

ÉTAPE 1 : CONSTRUCTION DU HYÉTOGRAMME DE PLUIE NETTE

Comme indiqué précédemment, qu'il soit construit à l'aide du module de construction des hyétogrammes dans l'onglet « Pluie et ruissellement simulés » ou qu'il soit directement renseigné par l'utilisateur dans l'onglet « Ruissellement simulé », le hyétogramme de pluie est divisé en 24 averses élémentaires. La construction du hyétogramme de pluie nette repose sur la détermination du volume de pluie nette associé à chacune de ces averses élémentaires, c-a-d la part de pluie qui contribuera directement à la genèse du ruissellement (le reste étant infiltré ou stocké dans la microtopographie du sol) Pour ceci, on utilise les équations de (Chow, Maidment et al. 1988) :

$$[\text{Eq.7}] \quad R = P - Ia - F$$

$$[\text{Eq.8}] \quad Ia = P \quad \text{Si } P < Ia_{scs}$$

$$Ia = Ia_{scs} \quad \text{Si } P > Ia_{scs}$$

$$[\text{Eq.9}] \quad F = \frac{S * (P - Ia)}{P - Ia + S}$$

- R (mm) est la pluie nette cumulée,
- P (mm) est la pluie cumulée,
- Ia (mm) sont les pertes initiales cumulées,
- Ia_{scs} (mm) sont les pertes initiales totales calculées à l'aide de la méthode du SCS-CN
- (Annexe B)

Ces équations s'appliquent sur des hauteurs d'eau cumulées. Ainsi, pour chaque intervalle de temps, on considère la hauteur d'eau tombée depuis le début de l'événement et on calcule la pluie nette cumulée associée. A la fin de l'événement, la pluie nette cumulée calculée correspond à celle que l'on trouve à l'aide de l'équation [Eq.1] de la méthode du SCS-CN (USDA-SCS 1972). Pour déterminer la pluie nette associée à chaque averse élémentaire, il suffit de retrancher successivement les valeurs cumulées obtenues pour chaque intervalle de temps.

ÉTAPE 2 : CONSTRUCTION DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE

L'hydrogramme unitaire est construit à partir des valeurs Tp (temps de pointe) et Qp (débit de pointe) calculées à l'aide des équations [Eq.4], [Eq.5] et [Eq.6] (Annexe B). De manière à simplifier les calculs du programme, l'hydrogramme unitaire synthétique de (Mockus 1957) a été divisé en 4 segments de droites (Figure 58) :

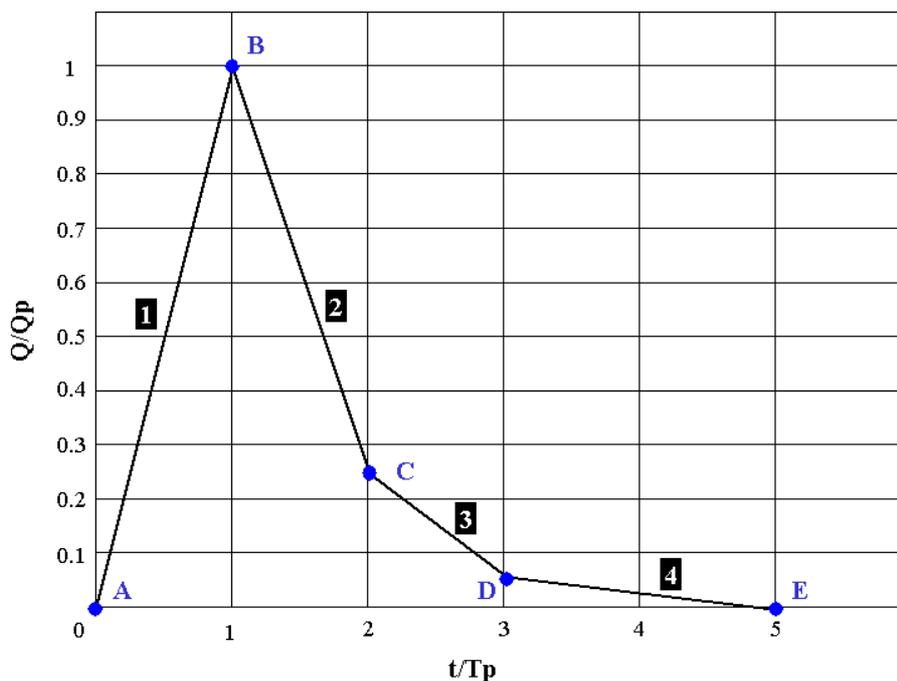


Figure 58. Hydrogramme unitaire synthétique adapté pour le programme.

Les équations associées à chaque droite sont les suivantes :

1	0 < t < T _p :	$\frac{Q}{Q_p} = \frac{t}{T_p}$
2	T _p < t < 2*T _p :	$\frac{Q}{Q_p} = -0,75 * \frac{t}{T_p} + 1,75$
3	2*T _p < t < 3*T _p :	$\frac{Q}{Q_p} = -0,2 * \frac{t}{T_p} + 0,65$
4	3*T _p < t < 5*T _p :	$\frac{Q}{Q_p} = -0,025 * \frac{t}{T_p} + 0,125$

ETAPE 3 : CONSTRUCTION DE L'HYDROGRAMME TOTAL

L'hydrogramme de ruissellement total est construit en sommant l'ensemble des hydrogrammes élémentaires obtenus par multiplication de la pluie nette de chaque averse élémentaire avec l'hydrogramme unitaire. Dans le fichier Excel, pour que cette opération soit réalisée, il convient de cliquer sur le bouton « Construire l'hydrogramme » situé sous les données d'entrée de l'interface.

Au sein de l'interface dédiée à la construction de l'hydrogramme de ruissellement, l'utilisateur peut visualiser le hyétogramme de pluie nette construit, l'hydrogramme de ruissellement construit, un tableau contenant les couples Temps-Débit qui définissent la distribution du ruissellement dans le temps et le débit maximal rencontré au cours de l'événement (Figure 59). Ces deux derniers éléments, ainsi que les dimensions de la surface contributive, peuvent être exportés vers VFSMOD en cliquant sur le bouton « Exporter l'hydrogramme » situé en bas de l'interface, après avoir donné un nom au fichier de sortie (Figure 59).

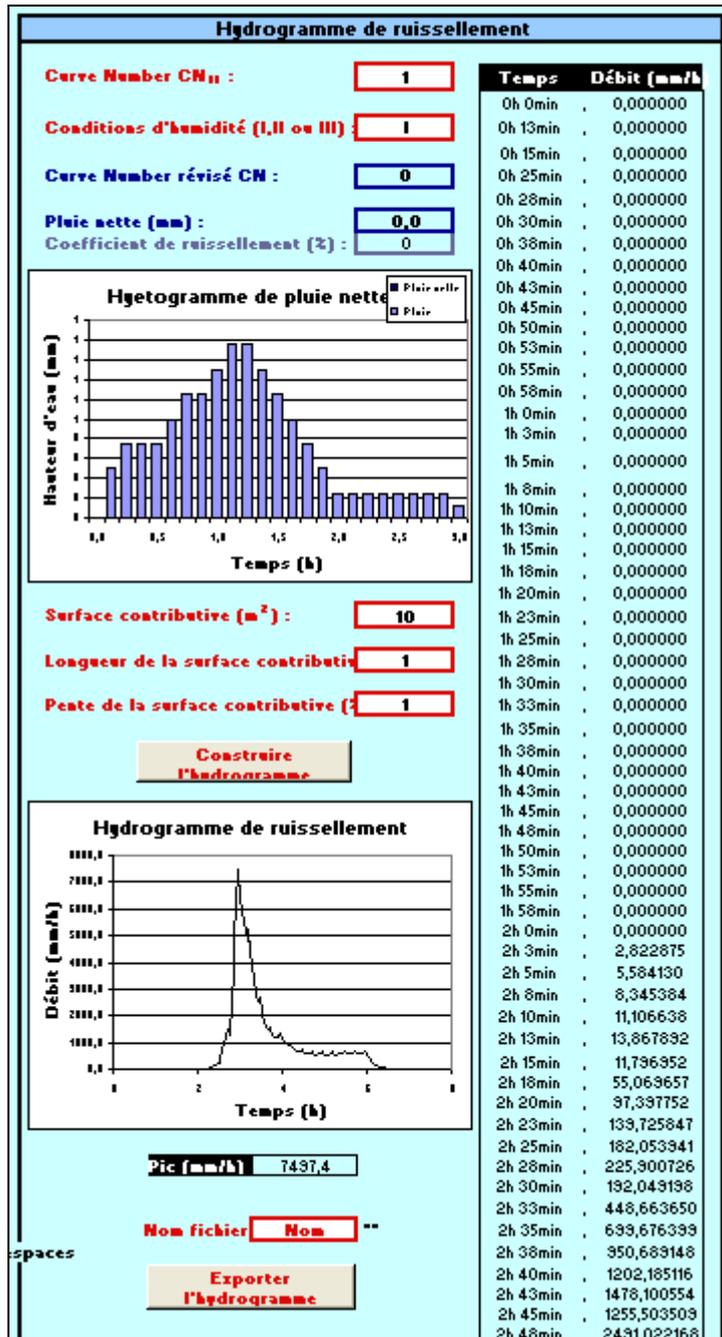


Figure 59. Interface du programme HyetoHydro pour la construction des hydrogrammes de ruissellement.

Annexe F. Utilisation du module Hydrogramme Unitaire (HU) dans VFSSMOD

L'utilisateur peut utiliser le module Hydrogramme Unitaire inclus dans VFSSMOD pour simuler des événements pluvieux, les événements ruisselants correspondant, et le transport de sédiments depuis la surface contributive. Celui-ci repose sur l'utilisation de la méthode du SCS-CN et crée automatiquement les fichiers d'entrée .irn, .iro et .isd qui correspondent respectivement au hyétogramme, à l'hydrogramme de ruissellement et aux propriétés des sédiments entrants.

Pour cela il convient de :

1 - Cliquer sur l'onglet « Fichier » et sélectionner « Nouveau projet d'Hydrogramme Unitaire » (Figure 60).

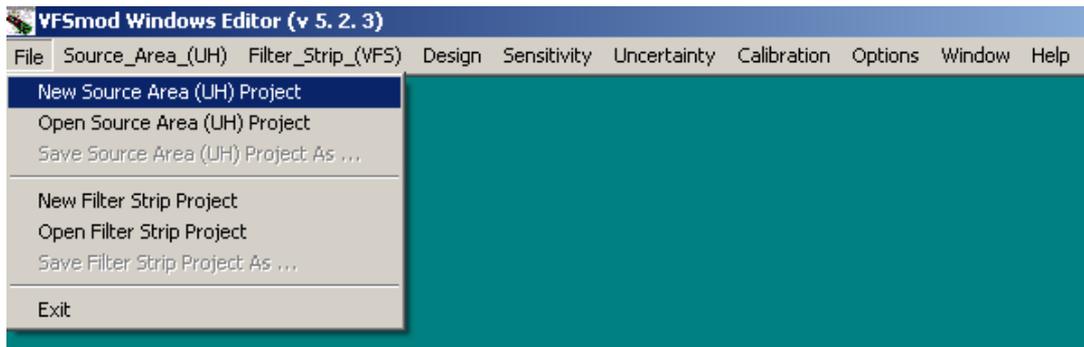


Figure 60. Création d'un nouveau projet d'Hydrogramme Unitaire.

2 - Cliquer sur « Editer » en face de la mention « Surface contributive – Fichier d'entrée » (Figure 61).

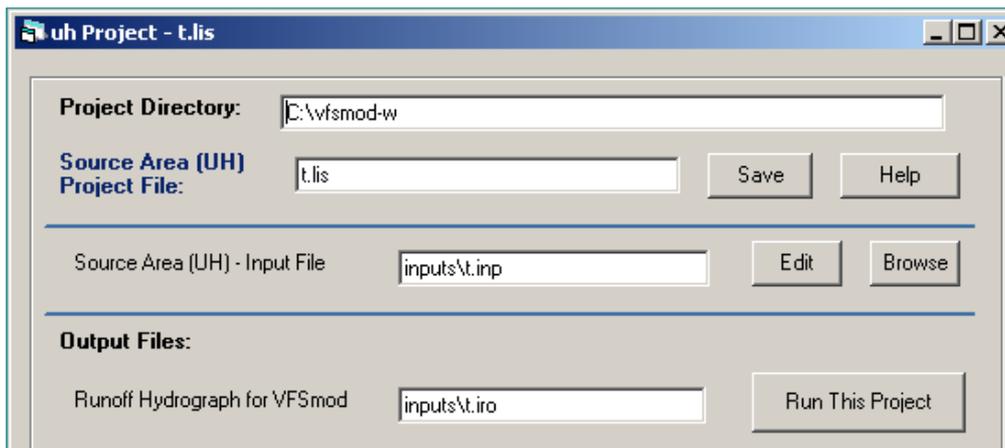


Figure 61. Interface du module Hydrogramme Unitaire.

3 - Renseigner les paramètres relatifs à l'événement pluvieux, à la surface contributive et au sol de la surface contributive, présentés sur la Figure 62.

4 - Enregistrer les données.

uh Editing: inputs\t.inp

Input Filename: inputs\t.inp

Rainfall Event and Runoff

Rainfall (mm): 25 Storm Duration (h): 6

Curve Number: 85 Storm Type: II

Source Area:

Length (m) along the slope: 100

Slope as a fraction: .02 Area (ha): .5

Erosion Parameters:

Soil Erodibility (K) Metric (t.ha.h)/(ha.MJ.mm); typical 0.01-0.07: -1

Soil Type: Clay

Percent organic matter, for example 1%: 1

dp - Particle Class Diameter (cm) (2-200 *10⁻⁴ or -1 for table value): -1

Crop Factor (C): 1

Practice Factor (P): 1

Rainfall Factor (R)

Williams (Recommended)

CREAMS/GLEAMS

Foster

Save Save and Close

Close this Window Help

Figure 62. Interface du fichier d'entrée lié à la surface contributive dans HU.

Annexe G. Utilisation du module « Hydrogramme Unitaire » (HU) dans la « Design analysis »

Si l'utilisateur a créé ses fichiers d'entrée relatifs au hétéogramme, à l'hydrogramme de ruissellement et aux sédiments entrants dans la zone tampon à l'aide du module Hydrogramme Unitaire (HU), alors il doit utiliser la fonction « Standard analysis » pour évaluer l'efficacité de la zone tampon en fonction de sa largeur. Il convient de :

1 - Cliquer sur l'onglet « Design » et sélectionner « Standard Design » (Figure 63).



Figure 63. Onglet de sélection de la fonction « Standard Design ».

2 - Sélectionner les projet HU et projet de zone tampon à tester. Attention, ceux-ci doivent être concordants.

3 - Cocher la case devant la mention « VFS Length (m) » et indiquer la gamme de largeurs à tester (Figure 64).

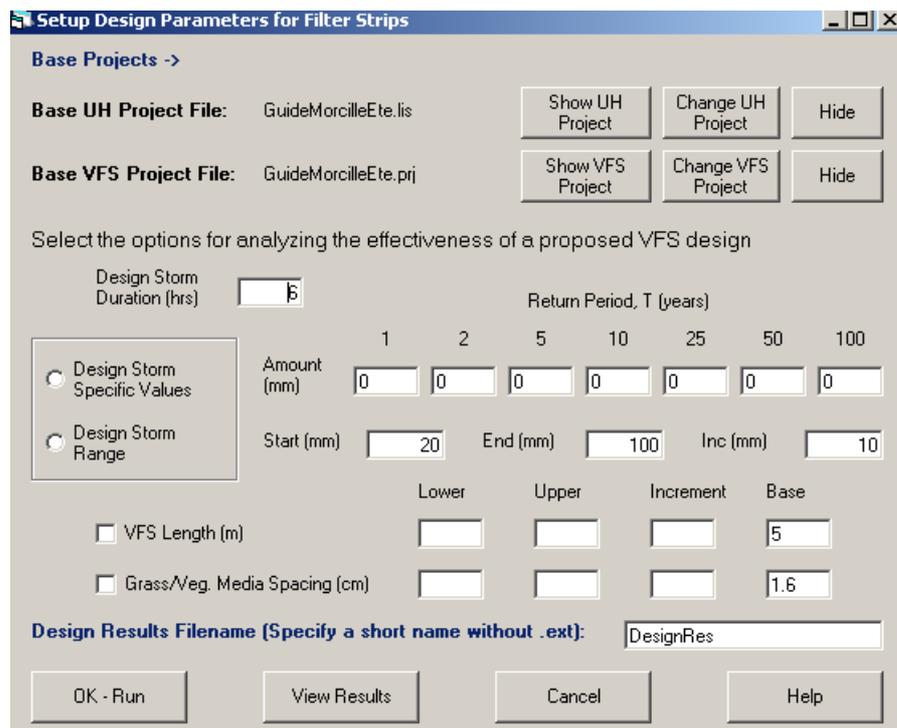


Figure 64. Interface du module « Standard Design ».

4 - Cliquer sur « Exécuter » et « Visualiser les résultats ».

