



Programme 2016/2018 - Action n° 108



Guide d'utilisation de l'outil BUVARD* pour le dimensionnement des bandes tampons végétalisées destinées à limiter les transferts de pesticides par ruissellement

* BUffer strip runoff Attenuation and
pesticide Retention Design tool

Rapport final

Clotaire Catalogne (Irstea)

Claire Lauvernet (Irstea)

Nadia Carluer (Irstea)

Février 2018

- **AUTEURS**

Clotaire CATALOGNE, chargé de mission Groupe Technique Zones Tampons (Irstea)

Claire LAUVERNET, chargée de recherche (Irstea), claire.lauvernet@irstea.fr

Nadia CARLUER, Ingénieur-Chercheur (Irstea), nadia.carluer@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

AFB : Claire BILLY, Chargée de mission « Agriculture et Protection des milieux » (AFB),
claire.billy@afbiodiversite.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France

Niveau de lecture : professionnels, experts



BUVARD : Guide d'utilisation
Rapport final
Catalogne C., Lauvernet, C.,
Carlier, N.

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

Établissement public du ministère de l'Environnement

- **RESUME**

L'outil BUVARD (BUffer strip runoff Attenuation and pesticide Retention Design tool) a été développé pour permettre le dimensionnement de bandes enherbées destinées à atténuer les transferts de pesticides par ruissellement entre les parcelles agricoles et les milieux aquatiques. Il s'appuie sur une chaîne de modélisation développée par Irstea au cours des dernières années

Le présent guide constitue la notice d'utilisation de l'outil BUVARD en version complète. Il est indispensable à la bonne manipulation de l'outil, notamment lors des premières utilisations.

Les deux premières parties sont consacrées à présenter la démarche de dimensionnement, le raisonnement associé ainsi que les outils mobilisés pour ce faire (sections 1 et 2). Les parties suivantes présentent les modalités d'utilisation de l'outil proprement dites : l'architecture et le fonctionnement du programme (section 3) ; le paramétrage (section 4). Enfin, une partie consacrée à l'interprétation des résultats (section 5) est proposée pour aider l'utilisateur à déterminer un dimensionnement optimal parmi plusieurs scénarios, selon l'objectif recherché, voire orienter la réflexion vers d'autres choix d'implantation plus favorables.

- **MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE) :**

Zones tampons végétalisées, pollutions diffuses, dimensionnement, optimisation



- **BUVARD tool user guide (Attenuation and Pesticide Retention Design tool)**

- **ABSTRACT**

The BUVARD tool (Attenuation and Pesticide Retention Design tool) has been developed to allow the design of grass strips designed to mitigate the transfer of pesticides by runoff between farm plots and aquatic environments. It is based on a modeling chain developed by Irstea in recent years.

This guide constitutes the instructions for use of the BUVARD tool in full version. It is essential for the proper handling of the tool, especially during the first use.

The first two sections are devoted to presenting the dimensioning process, the associated reasoning and the tools mobilized to do so (sections 1 and 2). The following sections describe how to use the tool itself: the architecture and operation of the program (section 3); the parameterization (section 4). Finally, a part devoted to the interpretation of the results (section 5) is proposed to help the user to determine an optimal sizing among several scenarios, according to the desired objective. In some cases, it may guide the reflection to other more favorable locations.

- **KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)**

Vegetative buffer zones, design tool, optimizing, non-point source pollution

Table des matières

INTRODUCTION	9
<i>Qu'est que l'outil BUVARD ?.....</i>	<i>9</i>
<i>Comment utiliser ce guide ?.....</i>	<i>9</i>
1. PREREQUIS : QU'EST-CE QU'UNE BANDE TAMPON VEGETALISEE ? POURQUOI LA DIMENSIONNER ?	10
1.1. Définition et fonctionnement des bandes tampons végétalisées pour limiter les transferts de pesticides par ruissellement.....	10
1.2. La démarche de dimensionnement	11
2. PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DE LA CHAINE DE DIMENSIONNEMENT	13
2.1. Principe.....	13
2.2. Outils et méthodes mobilisés.....	14
2.2.1. <i>HyetoHydro</i>	<i>14</i>
2.2.2. <i>VFSmod</i>	<i>17</i>
2.3. Hypothèses et limites	18
3. DIMENSIONNER UNE BANDE TAMPON VEGETALISEE AVEC BUVARD : ARCHITECTURE ET UTILISATION DU PROGRAMME.....	19
3.1. Contenu du répertoire de travail.....	19
3.2. Lancement du programme.....	19
3.3. Fonctionnement du programme	22
4. DIMENSIONNER UNE BANDE TAMPON VEGETALISEE AVEC BUVARD : PARAMETRAGE	23
4.1. Caractéristiques de la surface contributive	24
4.1.1. <i>Coordonnées du site d'étude.....</i>	<i>24</i>
4.1.2. <i>Type d'épisode pluvieux simulé</i>	<i>25</i>
4.1.3. <i>Pente de la surface contributive.....</i>	<i>26</i>
4.1.4. <i>Longueur de la surface contributive.....</i>	<i>26</i>
4.1.5. <i>Curve number.....</i>	<i>28</i>
4.1.6. <i>Conditions d'humidité initiale</i>	<i>34</i>
4.2. Caractéristiques de la bande tampon végétalisée	35
4.2.1. <i>Étendue de la bande tampon</i>	<i>36</i>
4.2.2. <i>Pente de la bande tampon</i>	<i>36</i>
4.2.3. <i>Profondeur de nappe sous la bande tampon</i>	<i>36</i>
4.2.4. <i>Profondeur de l'horizon racinaire.....</i>	<i>37</i>
4.2.5. <i>Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire</i>	<i>37</i>
4.2.6. <i>Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon sous racinaire</i>	<i>38</i>
4.2.7. <i>Teneur en eau à saturation du profil de sol</i>	<i>39</i>

4.2.8. Teneur en eau résiduelle du profil de sol, paramètre alpha de Van Genuchten et paramètre n de Van Genuchten.....	41
5. DIMENSIONNER UNE BANDE TAMPON VEGETALISEE AVEC BUVARD : INTERPRETATION DES RESULTATS	42
5.1. Format des résultats obtenus	42
5.2. Exploitation et interprétation des résultats obtenus.....	44
5.2.1. Optimiser le dimensionnement pour une situation particulière.....	45
5.2.2. Déterminer un dimensionnement pour une efficacité donnée.....	45
5.2.3. Vérifier l'efficacité d'une bande tampon dans différentes situations climatiques.....	47
6. CONCLUSION	48
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	49
ANNEXES	50
Annexe I : Élaboration des hyétogrammes de pluie théoriques utilisés dans l'outil HyetoHydro	50
<i>La classification en zones climatiques.....</i>	<i>50</i>
<i>Analyse des structures temporelles de pluies.....</i>	<i>54</i>
Annexe II : Construction d'un hydrogramme de ruissellement à l'aide de la méthode SCS-CN ...	62
Annexe III : Aide-mémoire sur les paramètres à renseigner	64

INTRODUCTION

Qu'est que l'outil BUVARD ?

L'outil BUVARD (BUffer strip runoff Attenuation and pesticide Retention Design tool) a été développé pour permettre le dimensionnement de bandes enherbées destinées à atténuer les transferts de pesticides par ruissellement entre les parcelles agricoles et les milieux aquatiques. Il s'appuie sur une chaîne de modélisation développée par Irstea au cours des dernières années et vise à en rendre l'utilisation plus abordable que celle de l'ensemble d'outils proposés dans un guide antérieur (Carluer et al, 2011). L'outil se décompose en deux versions :

- **BUVARD-online** (<http://buvard.irstea.fr/>), version simplifiée prenant la forme d'une application web interactive destinée à un public non expert. Cette version propose la consultation d'abaques de dimensionnement à partir d'un jeu de paramètres simplifié (résultats précompilés). Elle est adaptée à une première prise en main de la démarche de dimensionnement et constitue avant tout un bon support de démonstration (formation, concertation, argumentaire technique) ; elle présente en revanche plusieurs limites et ne permet pas un dimensionnement complètement personnalisé pour chaque site d'étude.
- **BUVARD** proprement dit, version plus complète que la précédente, permettant un dimensionnement personnalisé à partir de données d'entrées spécifiques au site d'étude. Cette version fonctionne à l'aide du langage de programmation R et repose directement sur la manipulation des outils de la chaîne de modélisation (Hyetohydro et VFSmod présentés plus loin) dont elle gère l'articulation (gestion des fichiers d'entrée et de sortie) et l'exécution. De par son niveau de complexité (paramètres à renseigner, fonctionnement) sa prise en main s'avère plus délicate et s'adresse donc à un public expert. Cette version est disponible sur demande auprès de l'équipe Pollutions Diffuses d'Irstea Lyon-Villeurbanne (ZT_eq_PollDiff@irstea.fr).

Comment utiliser ce guide ?

Le présent guide constitue la notice d'utilisation de l'outil BUVARD en version complète. Il est indispensable à la bonne manipulation de l'outil, notamment lors des premières utilisations.

Les deux premières parties sont consacrées à présenter la démarche de dimensionnement, le raisonnement associé ainsi que les outils mobilisés pour ce faire (sections 1 et 2). **L'utilisateur doit impérativement en prendre connaissance avant les premières utilisations de l'outil afin d'en connaître la logique et les limites.** Il n'est en revanche pas nécessaire d'y revenir systématiquement par la suite si ces éléments sont bien maîtrisés.

Les parties suivantes présentent les modalités d'utilisation de l'outil proprement dites :

- **L'architecture et le fonctionnement du programme** (section 3) : cette partie comporte les instructions permettant la manipulation de l'outil, depuis l'installation de R et l'exécution du code jusqu'à la création de scénarios de dimensionnement, la gestion des fichiers de paramètres et la récupération des résultats.
- **Le paramétrage** (section 4) : cette partie présente chaque paramètre d'entrée individuellement, son rôle dans la chaîne de dimensionnement, la façon de le déterminer et les précautions associées. Cette étape est la plus longue et la plus complexe ; elle doit être réalisée avec soin (vérification des unités, ordres de grandeur, etc.).

Il est recommandé de relire attentivement ces éléments en détail à chaque utilisation de l'outil

Enfin, une partie consacrée à l'interprétation des résultats (section 5) est proposée pour aider l'utilisateur à déterminer un dimensionnement optimal parmi plusieurs scénarios, selon l'objectif recherché, voire orienter la réflexion vers d'autres choix d'implantation plus favorables.

1. PREREQUIS : QU'EST-CE QU'UNE BANDE TAMPON VEGETALISEE ?

POURQUOI LA DIMENSIONNER ?

La contamination des masses d'eau par les pesticides employés en agriculture constitue une problématique préoccupante et assez généralisée à l'échelle du territoire français. En complément de bonnes pratiques à l'échelle de la parcelle, les zones tampons constituent une solution intéressante pour limiter les transferts de pesticides hors des parcelles et diminuer ainsi leur présence dans les milieux aquatiques (<http://zonestampons.onema.fr/>). Parmi les solutions possibles, **les bandes tampons végétalisées (bandes enherbées ou boisées) sont reconnues comme étant efficaces pour atténuer les transferts de pesticides par ruissellement. Cette efficacité dépend toutefois de bonnes conditions d'implantation et d'entretien et nécessite un dimensionnement adapté au contexte agronomique, pédologique et climatique.**

Aujourd'hui, ce type de zone tampon est rendu obligatoire par la réglementation (Arrêté du 24 avril 2015 relatif aux BCAE, consolidé le 19 février 2018) aux abords des cours d'eau dits BCAE, sur une largeur de 5 mètres. Toutefois, cette largeur peut être insuffisante dans certains cas. Il peut être par ailleurs intéressant de placer des bandes tampons complémentaires plus haut dans les versants : à l'interface entre les parcelles, à proximité des fossés, autour de dolines... selon ce que préconise la phase de diagnostic préalable (Gril et le Hénaff, 2010, Gril et al. 2010). L'étape de dimensionnement vise alors à déterminer quelle solution est la plus avantageuse pour atténuer au maximum le ruissellement tout en minimisant l'emprise foncière consacrée.

1.1. Définition et fonctionnement des bandes tampons végétalisées pour limiter les transferts de pesticides par ruissellement

Une bande tampon végétalisée correspond à une bande de terrain non cultivée positionnée et maintenue dans le paysage de manière à intercepter les ruissellements émis par une zone agricole avant que ceux-ci n'atteignent les milieux aquatiques situés en aval. La végétation peut être constituée d'espèces herbacées (cas des bandes enherbées), arbustives ou arborées (cas des haies). Il s'agit d'aménagements rustiques (facilité d'implantation et d'entretien) et peu coûteux que les agriculteurs peuvent aisément mettre en place sur leur parcellaire.



Figure 1 : Exemple de bande tampon réglementaire d'une largeur de 5m entre une parcelle cultivée et un cours d'eau

Placée en position d'interception du ruissellement issu d'une zone agricole (en travers de la pente), une bande tampon végétalisée aura pour principal objectif de favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol. Au contact de celui-ci, les substances véhiculées par l'eau pourront alors être en grande partie retenues et/ou dégradées.

Les critères d'efficacité sont donc ceux permettant une bonne infiltration (perméabilité du sol, favorisée par un système racinaire du couvert en place bien développé), associée à une diminution des vitesses d'écoulement (rugosité et homogénéité du couvert, modelé du dispositif), mais aussi ceux favorisant une bonne activité biologique au sein du dispositif (richesse en matière organique). Pour une même quantité de ruissellement entrant, plus ces critères seront favorables, moindre sera la largeur de la bande tampon nécessaire pour atteindre une efficacité donnée.

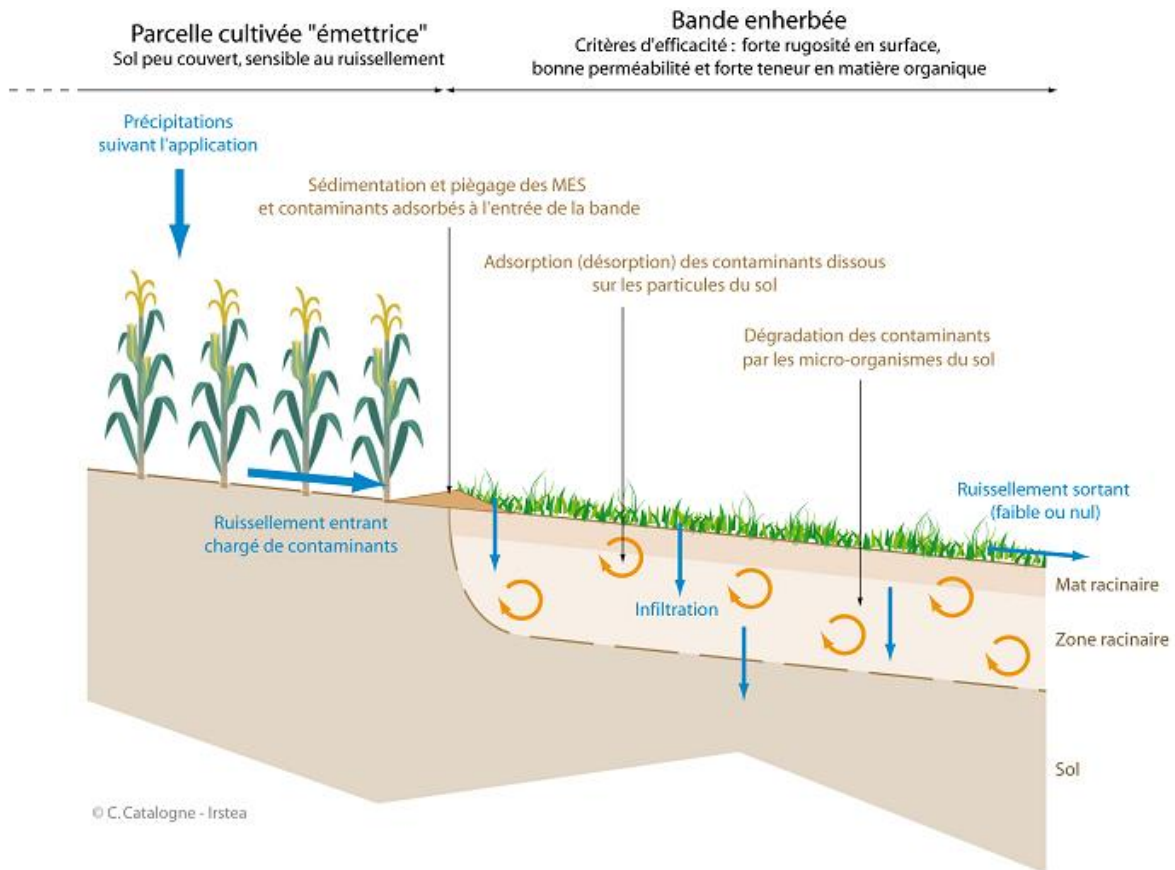
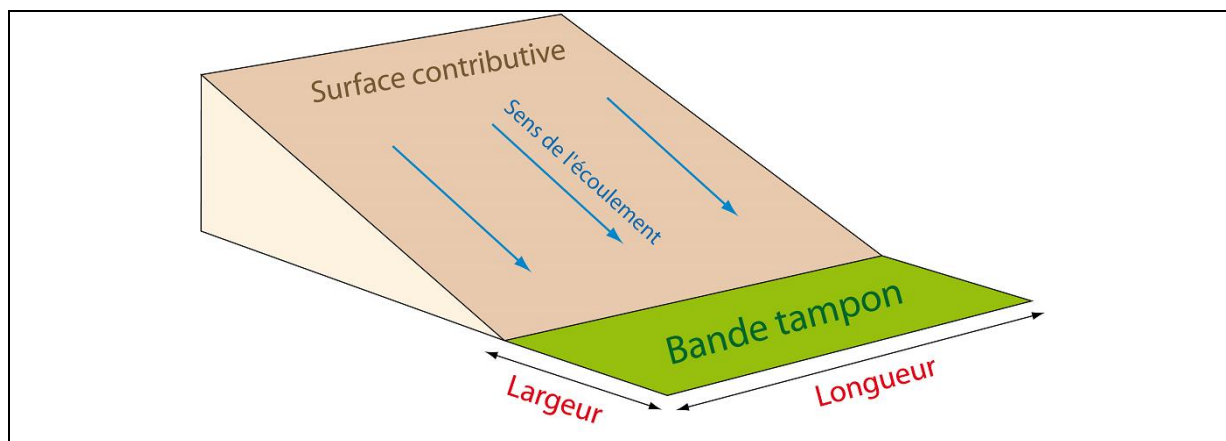


Figure 2 : Schéma synthétique illustrant le principe de fonctionnement d'une bande tampon végétalisée

1.2. La démarche de dimensionnement

La démarche de dimensionnement d'une bande tampon végétalisée consiste à déterminer quelle largeur il faut lui consacrer pour atteindre un certain degré d'efficacité vis-à-vis de l'atténuation des transferts de produits phytosanitaires par ruissellement. Elle fait généralement suite à une phase de diagnostic qui aura permis de mettre en évidence une problématique de transferts par ruissellement entre les parcelles agricoles et les milieux aquatiques (diagnostic de vulnérabilité) puis d'identifier les sites pertinents pour l'implantation de bandes tampons (GRIL et le HENAFF, 2010, GRIL et al. 2010).

Le terme de largeur de bande tampon sera utilisé dans la suite de ce rapport pour désigner la dimension longitudinale de la bande tampon, dans le sens de l'écoulement. Il s'agit de la grandeur clé du dimensionnement ; plus la bande tampon sera large plus la surface utile pour l'atténuation du ruissellement sera importante et plus la bande tampon sera efficace. Par opposition, la longueur de bande tampon désignera son étendue latérale, perpendiculairement à l'écoulement ; on parlera aussi de linéaire de bande tampon.



L'efficacité d'une bande tampon (et la largeur qu'il faut y consacrer) dépend des conditions locales d'implantation (bonne perméabilité du sol, présence et profondeur de nappe sous la bande tampon...) mais aussi de facteurs susceptibles d'évoluer dans le temps, notamment à l'échelle du versant contributif, en fonction du régime pluviométrique et/ou de l'occupation du sol, susceptibles de générer des ruissellements plus ou moins importants. Idéalement, la démarche de dimensionnement cherchera donc à proposer une largeur adaptée à chaque situation (notion de scénario de dimensionnement).

Dès 1997, le CORPEN fournissait des recommandations en la matière (Figure 3). Ces préconisations, dérivées des travaux de l'USDA (US Department of Agriculture), tenaient compte de situations assez simplifiées, en fonction de la longueur du versant contributeur ou de la topographie. Plus récemment, en 2007, le guide édité par le CORPEN fournissait cette fois des références d'efficacité des bandes tampons enherbées ou boisées dans différents contextes, sur la base d'une revue bibliographique réalisée par Lacas (2005). Il était mentionné qu'en contexte français, les expérimentations menées sur de tels dispositifs permettaient d'obtenir des taux d'abattement « souvent supérieurs à 90 % et rarement inférieurs à 50 %, pour l'ensemble des molécules étudiées » pour des largeurs allant de 1 à 20 mètres. Ces chiffres restent toutefois fortement assujettis aux caractéristiques des dispositifs testés et, plus généralement, aux conditions expérimentales.

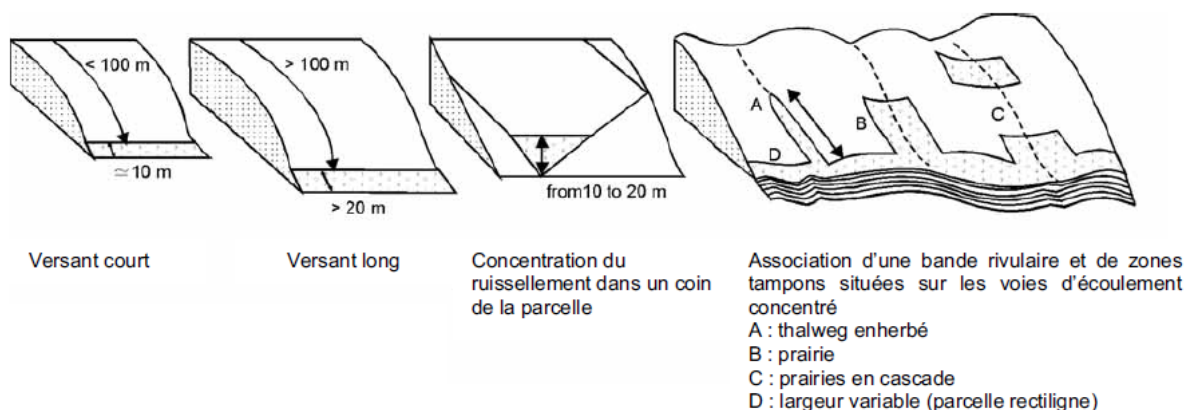


Figure 3 : Préconisations formulées par le CORPEN en matière de largeur et de géométrie des bandes tampons végétalisées pour l'atténuation des transferts de produits phytosanitaires par ruissellement (extrait de CORPEN, 1997)

Le recours à des outils de modélisation permet aujourd'hui d'aller plus loin en permettant de généraliser la démarche de dimensionnement à tous types de contextes. Il s'agit de quantifier aussi fidèlement que possible les flux d'eau en provenance des parcelles agricoles et de représenter les processus de transfert et d'interception des écoulements au sein de la bande tampon en tenant compte des caractéristiques propres à la bande tampon et à son versant contributif. L'usage de modèle offre alors l'opportunité de pouvoir aisément tester et confronter différents scénarios (conditions hydrométéorologiques, occupation des sols, localisation de la bande tampon dans le versant...) pour tenir compte de facteurs évoluant dans le temps et déterminer dans

quelles situations la bande tampon sera efficace. Ainsi, il s'agit d'un outil réellement pertinent pour valider ou proposer différents scénarios d'aménagement, dont les résultats peuvent être mis en discussion entre différents acteurs pour trouver le meilleur compromis « efficacité / emprise au sol / coût ».

2. PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DE LA CHAÎNE DE DIMENSIONNEMENT

2.1. Principe

Depuis 2007, les travaux réalisés par Irstea sur la limitation des transferts de pesticides par ruissellement diffus au moyen de bandes tampons végétalisées (enherbées ou boisées) ont permis de mettre au point une méthode de dimensionnement susceptible d'être utilisée dans un cadre opérationnel (CARLUER *et al.*, 2014).

Le principe retenu est de déterminer quelle largeur de bande sera nécessaire pour abattre d'un certain pourcentage les flux d'eau (et de contaminant) entrant sur le dispositif par ruissellement (100 % d'abattement correspondant à l'absence complète de ruissellement en sortie de dispositif). Il est alors considéré que la quantité de produits phytosanitaires interceptés par la bande (retenus ou dégradés dans le sol) s'effectue en proportion au moins aussi importante que la quantité de ruissellement infiltré (en réalité cette hypothèse est pessimiste puisqu'elle ne tient pas compte de la fraction de molécules adsorbées sur les matières en suspension potentiellement retenues à l'amont de la bande, ni des molécules adsorbées à la surface du dispositif).

Deux étapes sont alors distinguées dans la méthode proposée (Figure 4) :

- (i) la quantification du flux d'eau produit par les parcelles contributrices à l'amont du dispositif lors d'un épisode pluvieux d'intensité donnée ;
- (ii) la capacité de la bande à infiltrer les écoulements reçus.

Chacune de ces deux étapes successives fait appel à des outils et données spécifiques. La première est traitée à l'aide de la méthode du SCS-CN (USDA-SCS, 1972), basée sur le calcul d'un coefficient de ruissellement (« curve number ») fonction des caractéristiques de la parcelle contributive et de scénarios climatiques représentatifs du secteur d'étude.

La seconde s'appuie sur l'utilisation du modèle numérique VFSSMOD (« Vegetative Filter Strip Modeling system »), élaboré aux États-Unis (MUÑOZ-CARPENA et PARSON, 2010) puis validé et réadapté au contexte français, notamment pour permettre de rendre compte de la présence d'une nappe peu profonde sous la bande enherbée, situation relativement fréquente en bordure de cours d'eau (MUNOZ-CARPENA *et al.*, 2018). Ce modèle permet de décrire la complexité des processus de transferts hydriques, de rétention des sédiments et de rétention des pesticides au sein du dispositif à partir des caractéristiques de ce dernier (rugosité du couvert, propriétés du sol, état d'humidité, pente) et des flux d'eau entrants (issus de l'étape précédente). Il donne en sortie l'efficacité de la bande tampon pour une largeur donnée.

Le choix de ces outils repose sur leur capacité à représenter aussi fidèlement que possible les processus en jeu. En particulier, la méthode SCS-CN reste l'une des seules à permettre d'estimer le ruissellement en contexte agricole aux échelles de temps et d'espace considérées dans le cadre d'un travail de dimensionnement de bande tampon végétalisée. D'autre part, le modèle VFSSmod constitue à ce jour le modèle mécaniste le plus pointu et le plus performant pour décrire les processus d'interception et d'infiltration de l'eau (des sédiments et des produits phytosanitaires) au sein d'une bande tampon végétalisée.

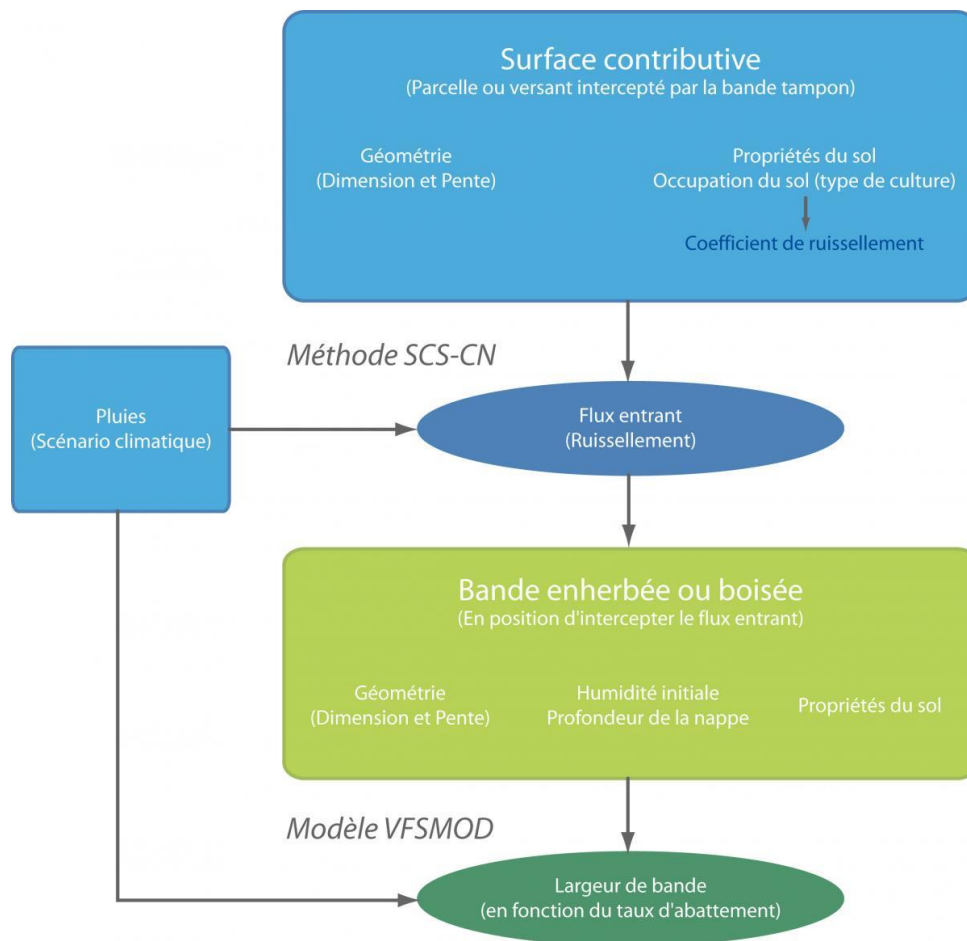


Figure 4 : Schéma de principe de la méthode de dimensionnement des bandes enherbées ou boisées pour l'atténuation des transferts de pesticides par ruissellement et principaux paramètres à renseigner

2.2. Outils et méthodes mobilisés

2.2.1. HyetoHydro

HyetoHydro est un outil conçu pour simuler un hydrogramme de ruissellement émis par la surface contributive en amont de la bande tampon végétalisée. Il se décompose en deux étapes :

- la construction d'un hyétogramme de pluie théorique, caractéristique de la climatologie du site d'étude (Annexe I);
- la construction d'un hydrogramme de ruissellement selon la méthode du SCS-CN (USDA-SCS, 1972) (Annexe II).

Étape 1 – Construction du hyétogramme de pluie théorique

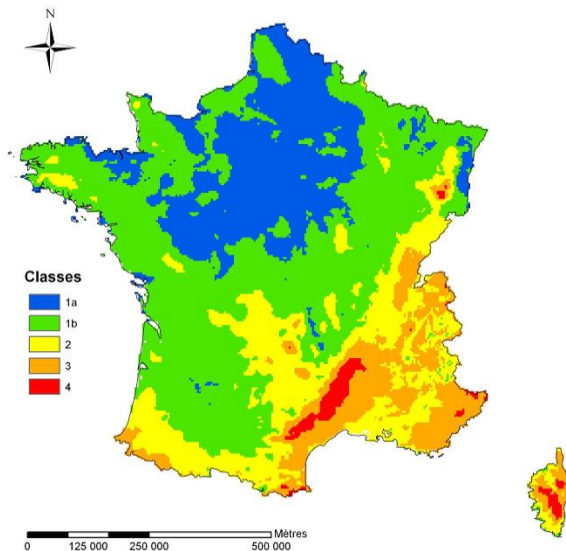
Pour un épisode de pluie donnée, le hyétogramme décrit la répartition dans le temps du cumul de pluie sur la durée totale de l'épisode. Afin de simplifier l'utilisation de l'outil, des hyétogrammes théoriques ont été définis par défaut pour quatre types d'épisodes pluvieux :

- Épisode estival de courte durée (1 heure)
- Épisode estival de durée modérée (6 heures)
- Épisode hivernal de courte durée (2 heures)
- Épisode hivernal de durée modérée (12 heures)

La saison « estivale » est fixée par défaut entre les mois de juin et novembre. La saison « hivernale » correspond aux mois de décembre à mai.

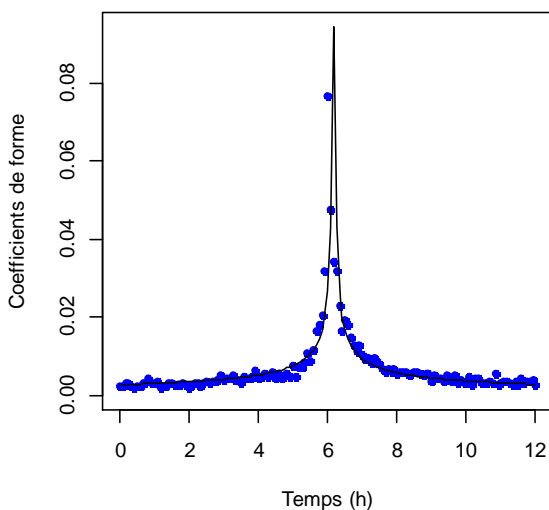
Chaque type d'épisode est associé à un **cumul de pluie correspondant à une période de retour 1 an**, issu de la base de données SHYREG disponible à l'échelle nationale sur des mailles de 16km² (ARNAUD et LAVABRE, 1999). Les hyétoigrammes sont ensuite reconstitués à partir de modèles théoriques définis pour quatre grandes zones climatiques considérés comme homogènes. L'élaboration de ces zones climatiques et des modèles de hyétoigramme est détaillée en annexe I.

Ainsi connaissant la localisation du site d'étude, l'outil est en mesure de fournir à l'utilisateur le hyétoigramme de pluie correspondant au type d'épisode qu'il souhaite simuler, parmi les quatre proposés. Les coordonnées du site d'étude sont donc les seuls paramètres à renseigner pour cette étape.



Zones climatiques définies pour la construction des hyétoigrammes théoriques.

Compte tenu de l'absence d'activité agricole dans la zone 4 (zones de relief dépassant 1000 m d'altitude), aucun hyétoigramme n'est fourni.



Exemple de hyétoigramme empirique (points bleu) pour un épisode hivernal de durée modérée (12h) sur le bassin versant de l'Yzeron ayant servi à la construction du hyétoigramme théorique (trait plein) de la zone climatique n°2.

Quelques précisions utiles :

- Les épisodes simulés pour chaque saison correspondent à des épisodes de période de retour 1 an, c'est-à-dire qu'ils ont la probabilité de se produire une fois chaque année en moyenne. **Le dimensionnement sera donc au moins aussi efficace pour des pluies plus modestes et plus courantes, représentant la majorité des précipitations tombées chaque année.** En revanche, il le sera moins pour des événements plus exceptionnels (pour lesquels les dispositifs de type zone tampon ne sont généralement pas conçus).

- Le choix parmi quatre scénarios de pluie permet à l'utilisateur de déterminer dans quelle(s) situation(s) climatique(s) la bande tampon est la plus efficace : sur des pluies intenses mais de courte durée ? sur des pluies modérées mais prolongées dans le temps ?
- Attention : le choix d'un type d'épisode pluvieux doit aussi se faire en cohérence avec d'autres paramètres soumis à une variation saisonnière, par exemple l'occupation des sols, les conditions d'humidité initiale du sol, la profondeur de nappe sous la bande tampon, la période d'application principale des produits phytosanitaires...

Étape 2 – Construction d'un hydrogramme de ruissellement

L'hydrogramme de ruissellement décrit la quantité de ruissellement émise par la zone contributive au cours du temps suite à un épisode pluvieux. Dans HyetoHydro, cet hydrogramme est obtenu selon la méthode du SCS-CN (USDA-SCS, 1972). Cette méthode consiste tout d'abord à déterminer la pluie nette susceptible de participer au ruissellement à partir du hétéogramme de pluie issu de l'étape précédente. La méthode permet ensuite de construire un hydrogramme unitaire qui, après convolution avec les pluies nettes, fournit l'hydrogramme de ruissellement qui sera employé en entrée du modèle VFSmod (annexe II).

Ces différentes étapes s'appuient sur plusieurs paramètres descriptifs de la surface contributive, dont sa géométrie (longueur et pente) et surtout le « Curve Number ». Ce paramètre décrit le potentiel de ruissellement d'un versant. Il prend des valeurs comprises entre 30 et 100. Les valeurs les plus faibles seront à l'origine d'un ruissellement nul ou très faible ; les valeurs les plus élevées correspondent à des conditions particulièrement sensibles au ruissellement (pour un CN = 100, l'ensemble de la pluie reçue ruisselle). Il est fonction de la nature plus ou moins perméable des sols, de leur sensibilité à la saturation, des conditions d'humidité initiales et de l'occupation des sols de la surface contributive. Connaissant ces caractéristiques, un certain nombre de tables permettent à l'utilisateur de déterminer la valeur du Curve Number correspondant à la situation agro-pédologique du versant contributif ou se rapprochant d'elle (cf. section 4.1.5).

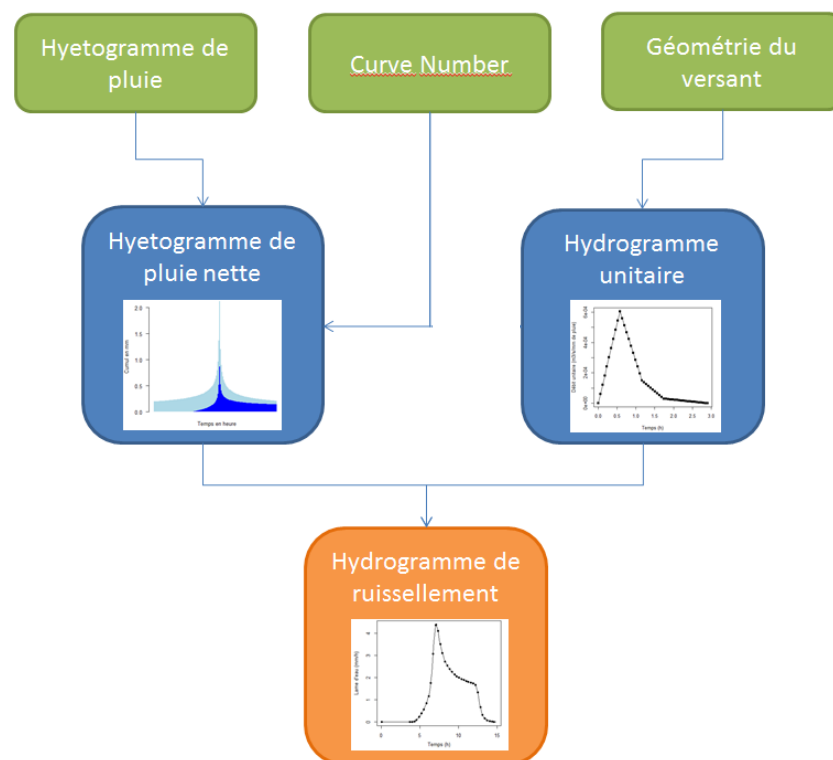


Figure 5 : Schéma de principe de la méthode SCS-CN. En vert : les paramètres à renseigner. En bleu : les étapes de calcul intermédiaires. En orange : l'hydrogramme de ruissellement estimé qui sera utilisé en entrée du modèle VFSmod.

Le curve number : un paramètre sensible mais délicat à déterminer avec précision

Le Curve Number est l'un des paramètres les plus importants de la chaîne de dimensionnement : **les résultats s'avèrent en effet très sensibles à ce paramètre (surtout au-delà d'une valeur de 85) et il convient donc de le déterminer avec soin.** Néanmoins, cette détermination peut s'avérer délicate ou approximative. En effet, le Curve Number est un paramètre empirique calibré aux Etats-Unis sur la base de mesures réalisées sur le terrain dans différentes situations agro-pédologiques. Bien qu'elles soient assez diversifiées, ces situations ne peuvent couvrir l'ensemble des états de surface du sol, en constante évolution dans le temps (liés aux itinéraires techniques de travail du sol, au stade de développement des cultures, au mode de gestion des résidus de culture...) et susceptibles d'influencer significativement le Curve Number (cette influence est assez bien illustrée par les travaux de AUERSWALD et HAIDER, 1996). Pour en tenir compte l'USDA a introduit les notions de conditions favorables ou défavorables. Toutefois, les règles en la matière ne sont pas nécessairement bien précisées. Aussi, il est fortement conseillé de réaliser plusieurs simulations en faisant varier le Curve Number de quelques points (une valeur de +/-3 points est recommandée) et de considérer les résultats obtenus comme une indication sur l'incertitude dont il conviendra de tenir compte dans l'interprétation.

Il est à noter que pour tenir compte de l'adaptation au contexte français, les valeurs de Curve Number fournies dans ce rapport sont augmentées de 5 points par rapport à la valeur qu'elles auraient eue dans un contexte équivalent aux USA.

2.2.2. VFSmod

VFSmod, acronyme du nom anglais « Vegetative Filter Strip Modelling System » est un modèle numérique à base physique qui simule à l'échelle locale les processus hydrologiques et les transferts de sédiments au sein d'une bande tampon végétalisée pour un événement de pluie et de ruissellement ponctuel (MUÑOZ-CARPENA et PARSON, 2010).

Ce modèle a fait l'objet de nombreuses validations en conditions réelles. Depuis sa conception, il a également fait l'objet de plusieurs améliorations, notamment pour permettre de rendre compte de la présence d'une nappe peu profonde sous la bande tampon, situation susceptible de modifier sensiblement les processus d'infiltration (MUNOZ-CARPENA *et al.*, 2018).

Les principaux processus représentés correspondent :

- A la propagation du ruissellement arrivant sur la bande tampon, représentée à l'aide de l'équation d'onde cinématique. Il s'agit pour l'essentiel de décrire comment les propriétés de rugosité du couvert ralentissent l'eau et interceptent les sédiments.
- Au taux d'infiltration de l'eau dans le sol, calculé en fonction de la présence ou de l'absence de nappe superficielle sous la bande tampon. Dans BUVARD, les paramètres de VAN GENUCHTEN (1980) ont été choisis par défaut pour décrire les caractéristiques hydrodynamiques des sols dans les équations d'infiltration.

Compte tenu de la diversité et de la complexité des processus physiques décrits, le modèle nécessite un panel de paramètres important et parfois délicats à déterminer. Néanmoins certains de ces paramètres peuvent être fixés par défaut, soit qu'ils varient assez peu d'une situation à l'autre (par exemple les propriétés hydrauliques du couvert si la bande tampon est correctement semée et entretenue), soit qu'ils ont peu d'influence sur les résultats (une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer quels sont les paramètres concernés). Dans les autres cas, il convient de renseigner les paramètres de manière aussi précise que possible à partir de mesures réalisées sur le terrain (recommandé), à l'aide de données déjà existantes ou de calculs permettant d'approcher la grandeur recherchée. L'ensemble des paramètres concernés est présenté en détail en section 4.2. Les autres données d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle correspondent aux pluies reçues

sur la bande tampon au cours d'un épisode ainsi que les flux de ruissellement et de sédiments entrants. Dans BUVARD, ces données sont générées grâce à l'outil HyetoHydro présenté précédemment en section 2.2.1.

Dans la version de VFSmod mise à disposition par l'université de Floride (<http://abe.ufl.edu/carpna/vfsmod/>), la gestion des paramètres d'entrée mais aussi des résultats s'effectue selon un système de lecture/écriture de fichiers relativement complexe. Une interface spécifique est disponible pour manipuler le modèle. Dans BUVARD, cette gestion a été largement simplifiée en regroupant l'ensemble des paramètres d'entrée jugés utiles dans un unique fichier. BUVARD prend ensuite en charge la gestion des fichiers d'entrée et de sortie du modèle sans intervention de l'utilisateur.

2.3. Hypothèses et limites

L'outil se base sur plusieurs hypothèses importantes mais comporte aussi des limites d'utilisation. Il est important pour l'utilisateur de considérer chacune d'entre elles pour un bon usage de l'outil, que ce soit dans la détermination des paramètres d'entrée ou dans l'interprétation des résultats.

Les deux principales hypothèses de travail reposent :

- **Sur l'efficacité des bandes tampon à atténuer les transferts de pesticide, considérée comme équivalente à l'efficacité de la bande tampon à infiltrer le ruissellement.** Autrement dit, il est considéré que la quantité de produits phytosanitaires interceptés par la bande (retenus ou dégradés dans le sol) s'effectue en proportion au moins aussi importante que la quantité de ruissellement infiltré. En réalité cette hypothèse est pessimiste puisqu'elle ne tient pas compte de la fraction de molécules adsorbées et piégées en surface avec les sédiments¹.
- Sur la nature diffuse (ou peu concentrée) des ruissellements interceptés par la bande tampon, c'est-à-dire répartis de manière assez homogène sur tout le linéaire de la bande et pour une hauteur d'eau restant faible (de l'ordre du centimètre). Dans ce cas, le recours à une bande tampon de largeur constante convient. Néanmoins, une telle situation n'est pas toujours observée sur le terrain en raison de la topographie (voire de la microtopographie : traces de roues d'engin, sens de labour, dérayure) qui peut conduire à une concentration hydraulique progressive du ruissellement de l'amont vers l'aval. Si une telle concentration se manifeste, l'utilisation de l'outil et l'interprétation des résultats devront être pris avec précaution.

Le devenir des produits phytosanitaires infiltrés dans le sol – rétention et dégradation ou transfert en profondeur – n'est pas considéré dans l'outil BUVARD. Néanmoins, dans de bonnes conditions d'implantation et d'entretien de la bande tampon (sous-entendu pour des sols dotés d'une bonne activité biologique), certaines expérimentations ont montré que l'ensemble des substances infiltrées avec l'eau de ruissellement n'étaient plus détectée au-delà de 50cm de profondeur sous la bande tampon (après plusieurs rinçages) (LACAS 2012, BOIVIN 2007). Il est ainsi fortement présumé que la totalité des substances se trouve adsorbées sur les particules de sol ou bien dégradées (le devenir des métabolites n'a en revanche pas été étudié). On restera prudent toutefois dans les situations de sols très filtrants (sables, graviers) mais pauvres en particules fines et en matière organique dans lesquels les possibilités de rétention et de dégradation sont très limitées. Dans ce cas, la présence d'une ressource souterraine vulnérable (nappe peu profonde susceptible de communiquer avec un cours d'eau notamment) devra être prise en compte.

Point d'attention : Une autre hypothèse importante considère **que le dimensionnement est valable pour une bande tampon correctement implantée** (semis d'un couvert dense et homogène), **entretenu** (pas de tassement) **et parfaitement connectée à la zone contributive**. Il s'agit en effet d'un gage de validité des

¹ Le modèle VFSmod est en mesure de simuler les processus de rétention des sédiments par la bande tampon. Cette fonctionnalité n'a cependant pas été conservée dans l'outil BUVARD en raison de la complexité à déterminer les paramètres d'entrée nécessaires.

résultats, en lien avec les propriétés de rugosité du couvert et d'infiltration telles qu'elles sont considérées par le modèle.

Concernant les limites de l'outil, on rappellera que celui-ci est prévu pour fonctionner à l'échelle événementielle (quelques heures), c'est-à-dire qu'il simule le ruissellement et son interception par la bande tampon pour un épisode pluvieux et des conditions initiales données. Il n'est donc pas possible de réaliser une simulation en continu sur une succession d'épisodes. Ceci peut être obtenu en relançant l'outil avec des scénarios considérant des conditions initiales adaptées (conditions initiales plus humides sur la zone contributive, niveau de nappe plus élevé dans la zone tampon...).

Les autres limites découlent en grande partie de simplifications destinées à permettre l'utilisation de la chaîne de dimensionnement dans un cadre opérationnel. En particulier, certains des paramètres à renseigner sont parfois fixés par défaut ou s'accompagnent d'une certaine incertitude dans leur détermination (cas par exemple du Curve Number évoqué précédemment). Ceci conduit inévitablement à des approximations qui peuvent impacter les résultats. **Ainsi, en cas de doute sur un paramètre, il est recommandé d'examiner quelle est son influence sur le dimensionnement de la bande tampon en réalisant des simulations avec différentes valeurs.**

3. DIMENSIONNER UNE BANDE TAMPON VEGETALISEE AVEC BUVARD : ARCHITECTURE ET UTILISATION DU PROGRAMME

Cette partie est destinée à présenter comment utiliser l'outil BUVARD en pratique pour dimensionner une bande tampon végétalisée. Il s'agit principalement de considérations techniques : architecture du programme, installation et langage de programmation utilisé, manipulation du programme.

3.1. Contenu du répertoire de travail

Le répertoire de travail correspond au dossier contenant l'ensemble des éléments nécessaires au bon fonctionnement du programme (codes, données, fichiers d'entrée et de sortie). Après téléchargement et décompression, il peut être déposé n'importe où sur votre poste de travail.

Avant de lancer le programme, il convient de s'assurer que le dossier de travail contient l'ensemble des répertoires et fichiers nécessaires au bon fonctionnement du programme. Ces derniers sont visibles dans l'arborescence ci-dessous (Figure 6). Les seuls fichiers manipulés par l'utilisateur sont ceux contenus dans le répertoire « Projets » (fichiers de paramètres d'entrée et fichiers de résultats). **Toute autre modification apportée ou toute suppression de l'un de ces répertoires ou fichiers sera susceptible d'altérer le fonctionnement du programme.** Le cas échéant, il est conseillé de télécharger à nouveau l'ensemble du programme BUVARD.

3.2. Lancement du programme

Le programme est implémenté dans le langage de programmation R. Les codes ont été développés de manière à être autonomes (l'utilisateur n'a pas besoin d'écrire de lignes de code), toutefois quelques connaissances de base du langage peuvent être nécessaires pour s'assurer du bon déroulement du programme, comprendre les messages d'avertissement ou les causes d'interruption en cas d'erreur.

Après installation du logiciel R dans sa version la plus récente (<https://www.r-project.org/>), le programme se lance dans la console Rgui (directement ou via un logiciel tel que Rstudio : <https://www.rstudio.com/>) à l'aide du code « Launch.r » contenu à la racine du répertoire de travail. Celui-ci

contient la fonction permettant de spécifier dans R le répertoire de travail de manière interactive puis de lancer successivement les différents codes permettant la manipulation des fichiers et effectuant les calculs. Le répertoire de travail est celui décrit précédemment en section 3.1. Il doit contenir l'ensemble des éléments nécessaires au bon fonctionnement du programme (codes, données, fichiers d'entrée et de sortie).

Dans l'éventualité où le choix interactif du répertoire de travail ne fonctionne pas (incompatibilité avec le système d'exploitation), il convient de renseigner manuellement le chemin d'accès correspondant dans le code tel que `set_dir <- "C:/mypath/BUVARD"` en veillant à utiliser le caractère "/" comme séparateur.

Lorsque le programme est lancé, il suffit de suivre les différentes instructions s'affichant dans la console. Le fonctionnement du programme est détaillé dans la section suivante. Après toute interruption du programme, volontaire (touche "Echap") ou suite à une erreur, celui-ci doit être relancé dans son intégralité.

launch.r	25/01/2017 10:32	Tinn-R	1 Ko
codes	25/01/2017 09:50	Dossier de fichiers	
BUVARD_graphs.r	23/01/2017 17:44	Tinn-R	3 Ko
BUVARD_hyetohydro.r	24/01/2017 11:49	Tinn-R	16 Ko
BUVARD_launch.r	24/01/2017 10:41	Tinn-R	3 Ko
BUVARD_params.r	25/01/2017 10:00	Tinn-R	22 Ko
BUVARD_VFSmod.r	25/01/2017 15:48	Tinn-R	9 Ko
data	25/01/2017 16:04	Dossier de fichiers	
Classif_zones_climatiques.Rdata	21/10/2016 10:16	R Workspace	47 Ko
coeffs_Haan_Bourville.txt	06/10/2016 08:41	Fichier TXT	1 Ko
coeffs_Haan_Orgeval.txt	24/05/2016 16:51	Fichier TXT	1 Ko
coeffs_Haan_Roujan.txt	24/05/2016 16:51	Fichier TXT	1 Ko
coeffs_Haan_Yzeron.txt	24/05/2016 16:51	Fichier TXT	1 Ko
Projets	25/01/2017 10:04	Dossier de fichiers	
param_set_empty.txt	25/01/2017 09:59	Fichier TXT	2 Ko
Exemple	25/01/2017 16:09	Dossier de fichiers	
graphs_exemple.pdf	25/01/2017 08:40	Adobe Acrobat D...	11 Ko
param_set_exemple.txt	23/01/2017 15:47	Fichier TXT	2 Ko
results_exemple.txt	24/01/2017 18:34	Fichier TXT	2 Ko
VFSmod	25/01/2017 09:50	Dossier de fichiers	
proj.prj	24/01/2017 18:30	Fichier PRJ	1 Ko
proj_empty.prj	22/01/2017 10:05	Fichier PRJ	1 Ko
v fsm.exe	23/10/2015 19:10	Application	983 Ko
inputs	25/01/2017 09:50	Dossier de fichiers	
bande.ikw	24/01/2017 18:30	Fichier IKW	1 Ko
bande_empty.ikw	20/10/2016 10:29	Fichier IKW	1 Ko
hydrogramme.iro	20/10/2016 11:25	Fichier IRO	1 Ko
hydrogramme_CN.iro	24/01/2017 11:50	Fichier IRO	1 Ko
hydrogramme_CN+2.iro	24/01/2017 11:50	Fichier IRO	1 Ko
hydrogramme_CN-2.iro	24/01/2017 11:50	Fichier IRO	1 Ko
hyetogramme.irm	20/10/2016 11:25	Fichier IRN	2 Ko
sed.isd	24/01/2017 18:30	Fichier ISD	1 Ko
sed_clay.isd	01/12/2016 11:13	Fichier ISD	1 Ko
sed_empty.isd	16/12/2016 15:57	Fichier ISD	1 Ko
sed_sand.isd	01/12/2016 11:13	Fichier ISD	1 Ko
sed_silt1.isd	01/12/2016 11:13	Fichier ISD	1 Ko
sed_silt2.isd	01/12/2016 11:13	Fichier ISD	1 Ko
soil.iso	24/01/2017 18:30	Fichier ISO	1 Ko
soil_empty.iso	25/01/2017 11:12	Fichier ISO	1 Ko
veg.igr	17/06/2014 17:00	Fichier IGR	1 Ko
output	25/01/2017 09:50	Dossier de fichiers	
exemple.og1	24/01/2017 18:33	Fichier OG1	17 Ko
exemple.og2	24/01/2017 18:34	Fichier OG2	16 Ko
exemple.ohy	24/01/2017 18:34	Fichier OHY	22 Ko
exemple.osm	24/01/2017 18:34	Fichier OSM	18 Ko
exemple.osp	24/01/2017 18:34	Fichier OSP	3 Ko

Figure 6 : Arborescence du répertoire de travail de l'outil BUVARD

3.3. Fonctionnement du programme

Une fois le répertoire de travail spécifié sous R, le programme fonctionne en plusieurs étapes successives. Chacune de ces étapes est associée à une fonction R implémentée dans un code spécifique tandis que leur enchaînement est pris en charge par le code « BUVARD_launch.r »².

- i) **La définition d'un nom de projet** : cette étape correspond à la création d'un répertoire destiné à réunir les différents scénarios d'un même projet de dimensionnement de bande tampon. Un projet peut par exemple correspondre à un site d'étude, parcelle ou versant... Ce répertoire est créé dans le dossier « Projets » du répertoire de travail. L'ensemble des fichiers d'entrée et de sortie manipulés par l'utilisateur se trouvent dans ce répertoire. Lors de cette première étape, l'utilisateur pourra revenir au même projet en renseignant un nom de projet déjà existant.
- ii) **La définition d'un nom de scénario** : un scénario correspond à un jeu de paramètres d'entrée pour lequel le programme va déterminer un dimensionnement de bande tampon. Le programme est conçu pour permettre à l'utilisateur d'explorer successivement plusieurs scénarios pour un même projet, par exemple pour les différents types d'épisodes pluvieux proposés dans HyetoHydro (cf. section 2.2.1). Le nom de scénario est écrit dans les différents fichiers d'entrée et de sortie ainsi que dans le nom du fichier lui-même. Il permet au programme d'identifier les bons fichiers en entrée et sortie des différentes fonctions. L'utilisateur veillera à attribuer des noms de scénario suffisamment explicites de manière à ne pas induire de confusion. Toute modification ou suppression de fichiers en cours d'exécution risque d'altérer le fonctionnement du programme.
- iii) **La définition des paramètres d'entrée du scénario** : lors de cette étape, l'utilisateur renseigne le fichier de paramètres d'entrée nécessaires à HyetoHydro et VFSmod. Le nom de fichier est systématiquement écrit au format suivant : "param_set_monscenario.txt" Le détail du paramétrage est présenté en section 4. Le format du fichier de paramètre est toujours le même (Figure 7).

```
# Fichier des paramètres d'entrée de l'outil BUVARD
# Variable = Descriptif succinct (Unité)
#-----
Scenario = Nom de votre scenario
#-----
# Caractéristiques du climat
#-----
X_coord = Coordonnées X du site d'étude (Lambert II étendu) (m)
Y_coord = Coordonnées Y du site d'étude (Lambert II étendu) (m)
Episode = Type d'épisode pluvieux simulé (-- )
#-----
# Caractéristiques de la zone contributive
#-----
Slope_CA = Pente moyenne de la surface contributive (%)
Length_CA = Longueur de pente de la surface contributive (m)
CN = Valeur du curve number de la surface contributive (-- )
IM = Conditions d'humidité initiale du sol de la surface contributive (-- )
#-----
# Caractéristiques de la bande tampon
#-----
width_VFS = Longueur de la bande tampon (m)
Slope_VFS = Pente de la bande tampon (%)
WTD_VFS = Profondeur de nappe sous la bande tampon (cm)
roots_depth = Profondeur de l'horizon racinaire (cm)
ksat_roots = Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire (mm/h)
ksat_soil = Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon non racinaire (mm/h)
Theta_S = Teneur en eau à saturation du profil de sol (%)
Theta_R = Teneur en eau résiduelle du profil de sol (%)
alpha_VG = Paramètre alpha de van Genuchten (1/m)
n_VG = Paramètre n de van Genuchten (-- )
```

Figure 7 : Format du fichier de paramètre d'entrée manipulé par l'utilisateur. Les valeurs (numériques ou alphanumérique selon les cas) doivent être renseignées à la place des noms de variables en début de ligne et obligatoirement suivi d'au moins un espace. Les lignes précédées du symbole # sont des lignes de commentaire non modifiables.

Le programme propose alors deux possibilités pour renseigner les paramètres :

² L'utilisateur peut examiner et exécuter lui-même les différentes fonctions contenues dans le dossier « codes » individuellement. Attention, toute modification de ces codes pourra altérer le bon fonctionnement du programme.

- Pas-à-pas : l'utilisateur renseigne les paramètres de manière interactive dans la console en suivant les instructions. Le programme écrit ensuite automatiquement le fichier d'entrée correspondant. Cette option est recommandée en cas de première utilisation du programme ou pour la création du premier scénario d'un projet.
- Manuellement : l'utilisateur renseigne directement les paramètres dans le fichier qui porte le nom du scénario dans le répertoire du projet en cours (à l'aide de n'importe quel éditeur de texte), en veillant à ne pas altérer le format. Le fichier doit être enregistré avant de poursuivre. Il est possible de débiter à partir d'un fichier correspondant à un scénario déjà existant. Cela permet de répliquer aisément un scénario en ne modifiant qu'une partie des paramètres.

Une procédure de vérification des paramètres d'entrée est implémentée et peut interrompre le code en cas d'erreur manifeste. Toutefois, l'utilisateur doit veiller à renseigner les paramètres avec le plus grand soin, que ce soit en termes de format ou d'unité.

À partir de cette étape l'utilisateur n'intervient plus et le programme lance successivement HyetoHydro et VFSmod à l'aide des fonctions dédiées. Cela peut prendre plusieurs minutes. Les manipulations de fichiers d'entrée et sortie entre les deux étapes sont prises en charge automatiquement par le programme.

À l'issue des calculs, le programme écrit les résultats dans un fichier dont le nom est systématiquement écrit au format suivant : "results_monscenario.txt". Il est ensuite proposé d'examiner un nouveau scénario. Le cas échéant le programme repart de la seconde étape ii) décrite ci-dessus.

Enfin une dernière fonction permet de tracer les résultats obtenus sous forme de graphiques, associés à un rappel des paramètres d'entrée. L'ensemble des scénarios d'un même projet est tracé et rassemblé dans un fichier pdf apparaissant dans le répertoire du projet en cours (cf. section 5).

Les calculs d'efficacité de la bande tampon sont réalisés par défaut pour des largeurs de 1, 4, 7, 10, 15, 20, 25 et 30m. Pour chaque scénario un calcul est également réalisé automatiquement pour des valeurs de Curve Number augmentées de 2 et diminuées de 2 par rapport à la valeur renseignée par l'utilisateur. En effet, compte tenu de la sensibilité de ce paramètre et de la difficulté à le déterminer de manière précise, ces résultats supplémentaires visent à donner une indication sur l'incertitude affectant le dimensionnement. Ils sont représentés sur les graphiques sous la forme de courbes enveloppes autour du scénario simulé à partir des paramètres renseignés par l'utilisateur.

4. DIMENSIONNER UNE BANDE TAMPON VEGETALISEE AVEC BUVARD : PARAMETRAGE

Cette partie décrit les paramètres à renseigner par l'utilisateur pour faire fonctionner l'outil. Il est ainsi question de préciser :

- Leur définition/signification
- Leur rôle dans la chaîne de dimensionnement
- Leur détermination à partir d'observations de terrain, de données ou de calculs
- La façon dont ils doivent être renseignés par l'utilisateur (format, unité, gamme de valeur acceptée...)

On rappellera que tous ces paramètres sont réunis dans un fichier spécifique qui constitue le seul fichier manipulé par l'utilisateur (cf. section 3.3). La gestion et la modification de ce fichier doivent donc être réalisées avec le plus grand soin. Un aide-mémoire concernant les paramètres à renseigner est fourni en annexe III.

4.1. Caractéristiques de la surface contributive

Les caractéristiques de la surface contributive en amont de la bande tampon sont les données d'entrée de l'outil HyetoHydro, utilisé pour générer un hydrogramme de ruissellement (cf. section 2.2.1). Elles visent à déterminer :

- Les caractéristiques des épisodes pluvieux affectant la zone d'étude
- La géométrie de la surface contributive
- La sensibilité de la surface contributive au ruissellement

4.1.1. Coordonnées du site d'étude

La localisation du site d'étude (c'est-à-dire le site d'implantation de la bande tampon) décrite à l'aide de ses coordonnées géographiques, est la donnée nécessaire à l'outil pour caractériser :

- La valeur du cumul de pluie associé aux quatre types d'épisodes pluvieux décrits en section 2.2.1,
- L'appartenance à l'une des quatre grandes zones climatiques présentées en section 2.2.1, auxquelles sont associés les hyétoigrammes théoriques pour les quatre types d'épisodes pluvieux.

L'utilisateur doit renseigner dans le fichier de paramètres le couple de coordonnées du site d'étude dans le système de coordonnées Lambert II étendu (longitude X et latitude Y en mètre). Tout autre système de coordonnées est exclu et risquerait de provoquer une erreur de localisation. L'outil est prévu pour fonctionner en tout point du territoire français métropolitain. Toute coordonnée renseignée en dehors de cette emprise conduira à générer un message d'erreur.

La détermination des coordonnées du site d'étude peut être obtenue sur le terrain par relevés GPS ou simplement à l'aide d'un outil de consultation cartographique en ligne tel que Geoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>, rechercher l'outil d'affichage des coordonnées et sélectionner Lambert II étendu). Dans le cas où les coordonnées acquises ne seraient pas dans le système de coordonnées Lambert II étendu, une transformation devra être réalisée à l'aide d'outils de gestion des données géographiques (fonctionnalités classiques de SIG). Enfin, on précisera que la précision des coordonnées renseignée n'est pas déterminante, la tolérance est d'environ 100m. Pour un projet portant sur un bassin versant de quelques km², les coordonnées de l'exutoire du bassin versant suffisent.

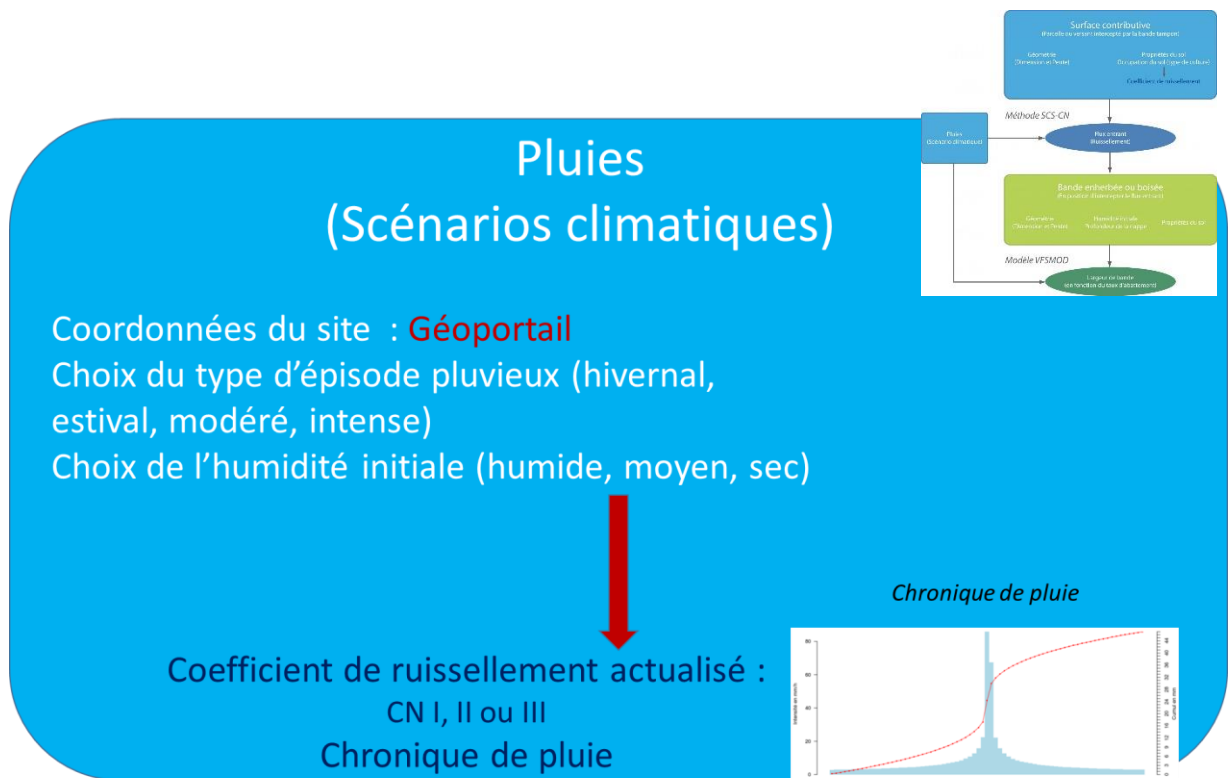


Figure 8 : Définition du scénario de pluie, choix de l'humidité initiale sur la zone contributive

4.1.2. Type d'épisode pluvieux simulé

Le choix du type d'épisode pluvieux simulé s'effectue parmi les quatre possibilités décrites en section 2.2.1. Elles sont rappelées ici :

Type d'épisode	Abréviation utilisée dans le fichier de paramètres
Épisode estival de courte durée (1 heure)	S01
Épisode estival de durée modérée (6 heures)	S06
Épisode hivernal de courte durée (2 heures)	W02
Épisode hivernal de durée modérée (12 heures)	W12

La saison « estivale » est fixée par défaut entre les mois de juin et novembre. La saison « hivernale » correspond aux mois de décembre à mai.

Chaque type d'épisode est associé à un cumul de pluie correspondant à une période de retour 1 an, issu de la base de données SHYREG (Arnaud et Lavabre, 1999) et un hyétogramme théorique décrivant la répartition dans le temps du cumul de pluie sur la durée totale de l'épisode.

L'utilisateur doit renseigner dans le fichier de paramètres le type d'épisode pluvieux qu'il souhaite simuler à l'aide de l'une des quatre abréviations fournies dans le tableau précédent.

Idéalement, l'utilisateur pourra examiner les différents scénarios pour comprendre dans quelle(s) situation(s) climatique(s) la bande tampon est la plus efficace : sur des pluies intenses mais de courte durée ? sur des pluies plus modérées mais prolongées dans le temps ? Le choix peut aussi se restreindre à une saison particulière pour se concentrer sur la période habituelle d'application de produits phytosanitaires sur la surface contributive étudiée. Dans tous les cas on veillera à assurer la cohérence entre le choix du type d'épisode

pluvieux et les autres paramètres soumis à une variation saisonnière (Curve Number et profondeur de nappe sous la bande tampon notamment).

4.1.3. Pente de la surface contributive

La pente de la surface contributive est l'un des paramètres utilisé par la méthode du SCS-CN (cf. section 2.2.1) pour la construction de l'hydrogramme de ruissellement via la construction d'un hydrogramme unitaire.

Pour obtenir une valeur représentative, il est proposé de **renseigner la pente moyenne du versant en amont de la bande tampon. La valeur doit être renseignée en pourcent**. Pour effectuer le calcul, le recours aux outils SIG pour le traitement d'un modèle numérique de terrain est recommandé. Le modèle numérique de terrain utilisé doit alors être de résolution suffisamment fine pour obtenir une précision satisfaisante (résolution comprise entre 5 et 25m au maximum, par exemple le RGE ALTI® de l'IGN). Une mesure de déclivité réalisée sur le terrain peut aussi être utilisée sous réserve qu'elle soit représentative de la pente moyenne du versant.

4.1.4. Longueur de la surface contributive

La longueur de versant (ou longueur de pente) en amont de la bande tampon est un paramètre permettant de résumer la géométrie de la surface contributive. **Elle est mesurée en mètres dans le sens de la plus grande pente**. En considérant par défaut une géométrie rectangulaire et un ruissellement strictement diffus (voir l'encart ci-dessous), elle correspond à la surface interceptée par unité de longueur de bande tampon. Plus celle-ci est grande, plus la lame d'eau ruisselée sera importante (toutes choses égales par ailleurs).

Il est fait l'hypothèse que le ruissellement intercepté par la bande tampon est de nature diffuse, c'est-à-dire que la lame d'eau arrive de manière uniformément répartie sur tout le linéaire de bande tampon. Dans ce cas, le recours à une bande tampon de largeur constante convient. Néanmoins, une telle situation n'est pas toujours observée sur le terrain en raison de la topographie (voire de la microtopographie : traces de roues d'engin, sens de labour, dérayure) qui peut conduire à une concentration hydraulique progressive du ruissellement de l'amont vers l'aval. Si une telle concentration se manifeste, l'utilisation de l'outil et l'interprétation des résultats devront être pris avec précaution.

Dans ce cas, la mise en place d'aménagements susceptibles de redisperser l'écoulement en amont de la bande tampon (fascine ou banquettes de dispersion par exemple) pourra être envisagée.

L'hypothèse d'un ruissellement diffus est à vérifier impérativement avant de renseigner la longueur de versant afin d'éviter une mauvaise interprétation des résultats fournis. Sur le terrain, il est souvent possible de constater si la topographie est susceptible de faire converger localement le ruissellement, notamment par l'observation des écoulements en période humide. Une autre possibilité consiste à employer un modèle numérique de terrain (suffisamment fin) pour en extraire un schéma d'écoulement puis comptabiliser les mailles interceptées par unité de longueur de bande tampon (ce qui revient à calculer la surface en amont). Si une portion de la bande tampon intercepte localement une surface significativement supérieure au reste de la bande, le risque de concentration du ruissellement peut-être fortement présumé (Figure 9).

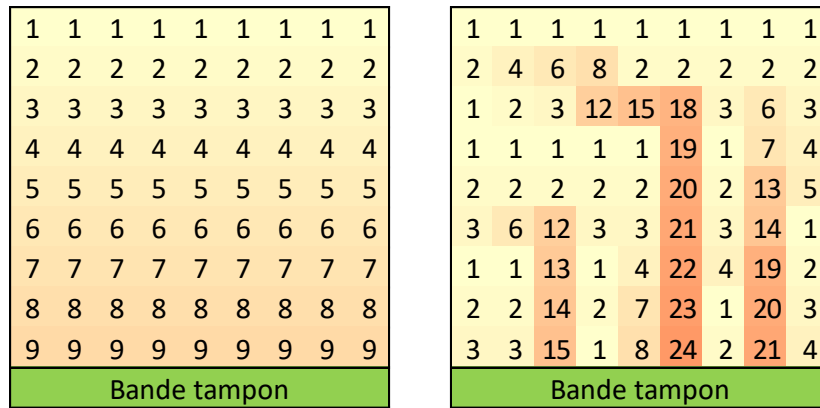


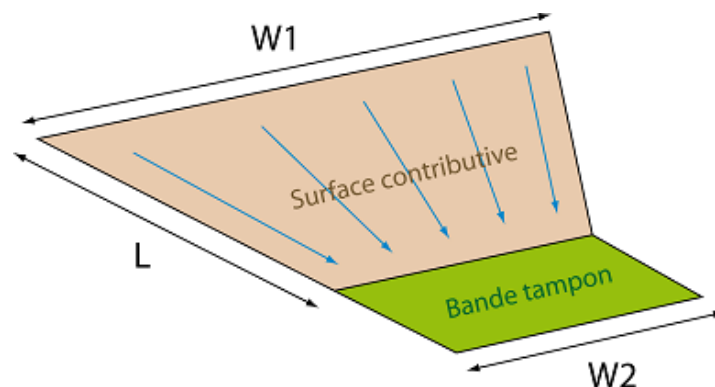
Figure 9 : Illustration de deux schémas d'écoulement théoriques déduits d'un MNT (calcul des pentes, des directions d'écoulement puis de la surface interceptée par unité de longueur de bande tampon) représentatifs d'un écoulement strictement diffus (à gauche) et d'un écoulement concentré au niveau de trois thalwegs principaux (à droite)

Plusieurs situations sont ainsi en mesure de se présenter :

- 1) La géométrie du versant intercepté par la bande tampon est rectangulaire ou s'en approche : la longueur de versant sera alors simple à déterminer, en réalisant la mesure dans le sens de la plus grande pente, soit directement sur le terrain, soit à l'aide d'outils de mesure sous SIG en partant d'un fond cartographique approprié (fond de plan cadastral, fond de carte IGN au 1/25000...)
- 2) La géométrie du versant intercepté fait légèrement converger les écoulements (l'hypothèse d'un ruissellement diffus reste encore acceptable) et peut-être assimilée à un trapèze. Une longueur de versant équivalente peut être calculée telle que :

$$\text{Longueur du versant} = L \cdot (W1+W2)/(2 \cdot W2)$$

Avec L la plus grande longueur du versant, W1 la longueur de la base du trapèze (côté amont) et W2 la longueur du sommet du trapèze (côté aval) comme indiqué sur la figure ci-dessous.



- 3) La géométrie du versant intercepté est clairement à l'origine d'une concentration du ruissellement (coin de parcelle, petit talweg). Dans ce cas, la longueur de versant n'est plus le paramètre approprié et l'outil atteint ses limites de validité.

Quelle limite amont dois-je prendre pour déterminer la longueur de versant ?

En théorie, il est nécessaire de considérer l'ensemble du versant en amont de la bande tampon, ce qui peut conduire à considérer des longueurs de versant particulièrement importantes. En pratique, il conviendra de s'assurer de la continuité hydraulique des écoulements dans le versant. Par exemple : en présence d'éléments linéaires en travers de la pente susceptibles d'intercepter les eaux de ruissellement

(fossé, voirie, caniveau...), les surfaces situées en amont ne seront pas comptabilisées dans la surface contributive de la bande tampon. On n'oubliera pas toutefois que ces ruissellements « détournés » pourront eux-aussi mériter d'une mesure d'atténuation avant qu'ils parviennent aux cours d'eau !

Les surfaces boisées, peu susceptibles de générer du ruissellement (et encore moins des ruissellements chargés en contaminants) pourront également être retranchées des surfaces contributives **si elles se situent intégralement à l'amont du versant**. Dans les autres cas (boisement en position intermédiaire dans le versant), leur rôle vis-à-vis du ruissellement généré par le versant sera pris en compte au travers du Curve Number (cf. calcul d'un Curve Number composite).

4.1.5. Curve number

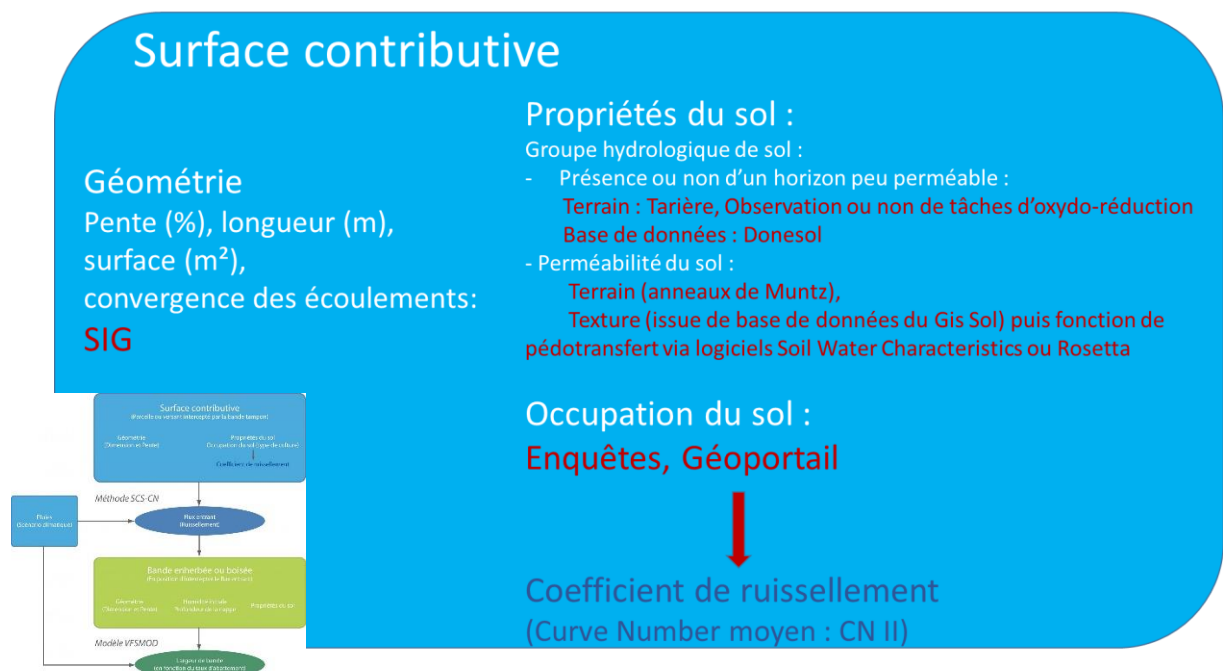


Figure 10 : Définition de la géométrie de la zone contributive. Choix du Curve Number

Le Curve Number (CN) est un paramètre empirique apparenté à un coefficient de ruissellement. Il a été développé par l'USDA dans le cadre de la méthode SCS-CN (USDA-SCS, 1972) pour estimer le ruissellement généré par un épisode pluvieux donné en fonction des caractéristiques du bassin versant dans lequel il survient. **Il dépend du type de sol, de sa couverture (type de culture par exemple) et des conditions d'humidité initiale du sol.**

Le Curve Number est l'un des paramètres les plus importants de la chaîne de dimensionnement : **les résultats s'avèrent très sensibles à ce paramètre et il convient donc de le déterminer avec soin**. Il contribue en effet à définir l'intensité du ruissellement émis par la surface contributive en amont de la bande tampon et donc le volume d'eau que doit intercepter la bande tampon.

Le Curve Number prend des valeurs entre 30 et 100. Les valeurs les plus faibles seront à l'origine d'un ruissellement nul ou très faible ; les valeurs les plus élevées correspondent à des conditions particulièrement sensibles au ruissellement (pour un CN = 100, l'ensemble de la pluie reçue ruisselle).

Quelques précisions utiles :

- Les valeurs de CN associées à différents contextes agro-pédo-climatiques ont été calibrées aux États-

Unis à partir de suivis de terrain. Leur validité reste à vérifier et adapter pour les différents contextes agro-pédo-climatiques français. Les tests effectués en France sur des bassins versants où l'on disposait d'assez de données relatives au ruissellement pour déterminer un Curve Number **conduisent à augmenter de 5 points les valeurs fournies par l'USDA pour une application en France** dans un contexte agropédologique équivalent. Les valeurs sont fournies dans le *Tableau 1*

- Compte tenu de la sensibilité de ce paramètre et de la difficulté à le déterminer de manière précise, l'outil calcule automatiquement les résultats de dimensionnement pour des valeurs de CN augmentées et diminuées de 3 points par rapport à la valeur renseignée par l'utilisateur. Ces résultats sont ensuite affichés sous la forme d'une enveloppe d'incertitude. Cette représentation vise à faire prendre conscience des situations où une attention particulière doit être portée à la détermination de ce paramètre.

Les deux premières étapes nécessaires à la détermination du Curve Number sont détaillées ci-après. La troisième est traitée indépendamment dans la section suivante (cf. section 4.1.6).

Étape 1 - Détermination d'un groupe hydrologique de sol

L'USDA a défini quatre grands groupes de comportements hydrologiques (notés A, B, C, D) dépendant des caractéristiques du sol, selon qu'elles induisent une plus ou moins grande sensibilité au ruissellement.

La classification dans l'un des groupes hydrologiques dépend :

- De la présence d'un horizon peu ou pas perméable (couche d'argile) à l'origine d'une saturation du sol (« nappe superficielle »). Cette saturation plus ou moins partielle du profil de sol constitue en effet un facteur limitant l'infiltration, indépendamment des propriétés hydrauliques des premières couches de sol. Cet aspect est développé plus en détail dans le premier encart ci-dessous.
- De la perméabilité du sol, caractérisée au travers de la conductivité hydraulique à saturation (en mm/h) **de l'horizon le moins perméable du profil sur la tranche de sol non saturée**. Celle-ci peut être obtenue par divers moyens : à l'aide de mesures sur le terrain (recommandé, on veillera à effectuer une ou plusieurs mesures représentatives des sols de la surface contributive), à partir des informations reportées dans les bases de données pédologiques ou encore à l'aide de règles de pédo-transfert basées sur la texture du sol. Cette dernière solution est détaillée dans le second encart ci-dessous.
- De l'existence de dispositifs de drainage enterrés destinés à évacuer l'eau des sols en période de saturation.

Déterminer la présence d'une couche imperméable à l'origine d'une saturation dans le sol :

Selon l'USDA-SCS (1972), un horizon de sol est considéré comme imperméable si sa conductivité hydraulique à saturation est inférieure à 0.035mm/h. L'eau ne parvient plus à s'infiltrer et peut alors provoquer une saturation plus ou moins complète des horizons sus-jacents. En pratique, cette situation se rencontre assez fréquemment en présence d'un contraste de perméabilité significatif entre deux horizons. Ce sera souvent le cas en présence d'un horizon argileux (même peu épais) voire en raison de l'existence d'une semelle de labour. Ces éléments peuvent être plus ou moins facilement identifiés sur le terrain (sondages à la tarière, fosse pédologique). Néanmoins les indices d'hydromorphie restent les meilleurs indicateurs pour déterminer l'existence de situations de saturation du sol prolongée dans le temps.

Ces indices consistent essentiellement en la présence de tâches d'oxydo-réduction dans les horizons sensibles à la saturation. Les tâches de couleur rouille sont caractéristiques du fer à l'état oxydé et indiquent que le sol n'est pas saturé mais sujet à des remontées périodiques de la nappe. Les tâches de couleur bleue-grise sont caractéristiques du fer à l'état réduit et indiquent que le sol est saturé. La limite supérieure de ces tâches, que l'on pourra mettre en évidence sur le terrain à l'aide de sondages à la tarière, définit la profondeur de

l'horizon saturé que l'on pourra utiliser pour caractériser le groupe hydrologique de sol.

Certaines bases de données pédologiques fournissent également ce type d'information. La base de données DONESOL en particulier (programme IGCS géré par l'INRA) compile différentes études pédologiques où certains champs indiquent la distribution et l'abondance des tâches d'oxydo-réduction dans les différents horizons décrits (<https://dw3.gissol.fr/login>).

Étant donnée la possible évolution de l'état de saturation du sol au cours du temps (sols saturés en hiver, asséchés en été), on veillera à déterminer puis renseigner la valeur en cohérence avec les autres paramètres soumis à une évolution saisonnière (type d'épisode pluvieux mais aussi couverture des sols et état d'humidité initiale qui participent à la détermination du Curve Number).

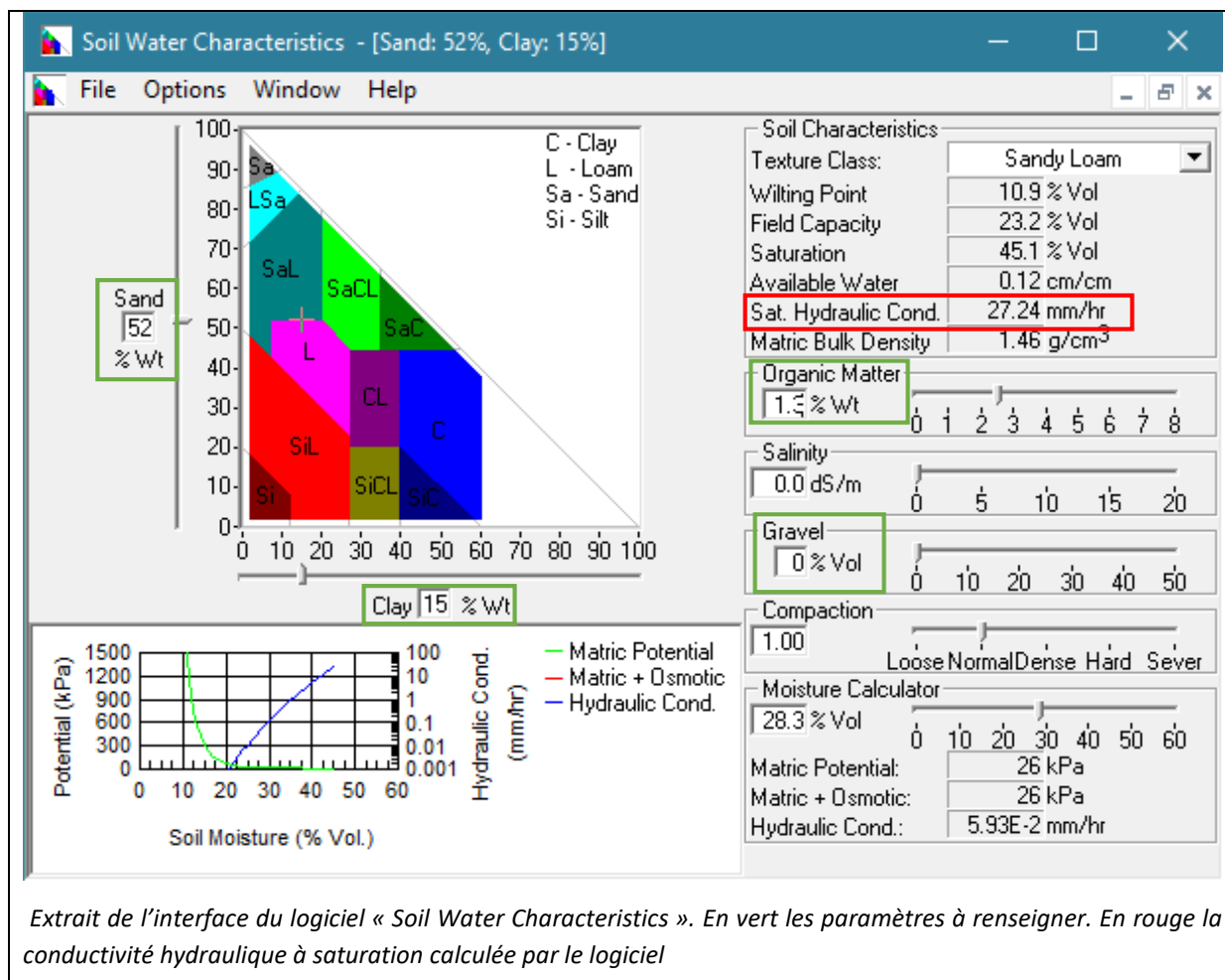
Utilisation de fonctions de pédo-transfert pour la détermination de la conductivité hydraulique à saturation d'un sol

En l'absence de réalisation de mesures directes sur le terrain (perméamètre, anneaux de Muntz...), il est possible d'obtenir une estimation de la conductivité hydraulique à saturation d'un sol à partir de fonctions de pédo-transfert. Ces fonctions s'appuient sur les données de texture du sol, le taux de matière organique et la densité apparente ou le degré de compaction. Ces données peuvent être acquises à partir de prélèvements de sol sur le terrain (à la tarière et à l'aide de cylindres métalliques) puis d'analyses en laboratoire. Elles sont aussi disponibles dans certaines bases de données pédologiques (BDGSF : <https://www.gissol.fr/tag/bdgsf>, BDAT : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-danalyses-des-terres-bdat-62>). Il faut cependant rester prudent en raison de la résolution de ce type de données, souvent insuffisamment détaillée pour restituer toute la variabilité spatiale des sols, notamment aux échelles considérées.

Une fois ces données recueillies, plusieurs logiciels offrent la possibilité d'appliquer des fonctions de pédo-transferts pour déterminer les différentes caractéristiques hydrauliques du sol étudié, dont la conductivité hydraulique à saturation. Les deux possibilités recommandées sont :

- Le logiciel « Soil Water Characteristics » développé par l'USDA (<http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/newregistration.html>)
- Le logiciel Rosetta développé par Schaap et al. (1999) (<http://cals.arizona.edu/research/rosetta/rosetta.html>)

On notera que les deux logiciels peuvent fournir des résultats différents en raison des modes de calcul et des fonctions implémentées dans chacun d'entre eux. Cela témoigne d'une certaine incertitude de ces méthodes. Toutefois, les valeurs recherchées sont avant tout des ordres de grandeur, ce qui limite l'impact de cette incertitude sur la détermination du groupe hydrologique de sol.



Lorsque ces informations sont connues, le tableau suivant permet de déterminer le groupe hydrologique correspondant :

Profondeur de l'horizon saturé (cm)	Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon le moins perméable sur la tranche de sol non saturée (mm/h)	Groupe hydrologique	
		Sol non drainé	Sol drainé
< 60 cm	>150 mm/h	D	A
	40 à 150 mm/h		B
	4 à 40 mm/h		C
	< 4mm/h		D
60 à 100 cm	>150 mm/h	A	
	40 à 150 mm/h	B	
	4 à 40 mm/h	C	
	< 4mm/h	D	

> 100 cm	> 40 mm/h	A
	15 à 40 mm/h	B
	1.5 à 15 mm/h	C
	< 1.5 mm/h	D

L'une des limites de la détermination du groupe hydrologique de sol résulte de l'absence de prise en compte explicite des états de surface qui peuvent évoluer au cours du temps et modifier le risque de générer du ruissellement. Le cas des sols limoneux battants mérite notamment une certaine attention selon que la croûte de battance est en place ou non (dans le contexte agro-pédologique du Pays de Caux, Richet et Ouvry (2012) ont montré que la mise en place d'une croûte de battance était effective après un cumul pluviométrique de 120mm après le semis). Le cas échéant, la capacité d'infiltration du sol chute notablement (atteignant des valeurs de l'ordre de 2mm/h selon Richet et Ouvry, 2012) et celui-ci peut donc être assimilé au groupe hydrologique D.

Étape 2 - Détermination d'un Curve Number en fonction du groupe hydrologique de sol et de la couverture du sol

Pour un même groupe hydrologique, la susceptibilité d'un sol au ruissellement est également déterminée par le type de couverture, selon la nature et la densité de végétation. Peuvent aussi intervenir des considérations agronomiques comme la présence de résidus de culture, le stade de croissance des végétaux cultivés (plus ou moins couvrant), voire le tassement du sol par le passage d'engins agricoles (chantier de récolte) ou de bétail. C'est pourquoi, outre le type de culture, sont introduites les notions de conditions favorables ou défavorables à l'infiltration (au détriment du ruissellement). Les règles en la matière ne sont pas nécessairement bien précisées par l'USDA, le choix est donc laissé à l'appréciation de l'utilisateur.

D'autre part, les couverts agricoles étant par nature évolutifs dans le temps (au cours d'une rotation voire en fonction du stade de croissance des végétaux cultivés), il convient de s'intéresser à un (ou plusieurs) scénario(s) types, correspondants aux situations d'occupation des sols observées lors des principales périodes d'application de produits phytosanitaires (par exemple application en pré-levée sur cultures d'hiver, application de fongicides sur vigne en début d'été...). **En parallèle, on veillera à la cohérence entre ces scénarios, le choix des épisodes pluvieux simulés (saison) et les conditions d'humidité initiale des sols.**

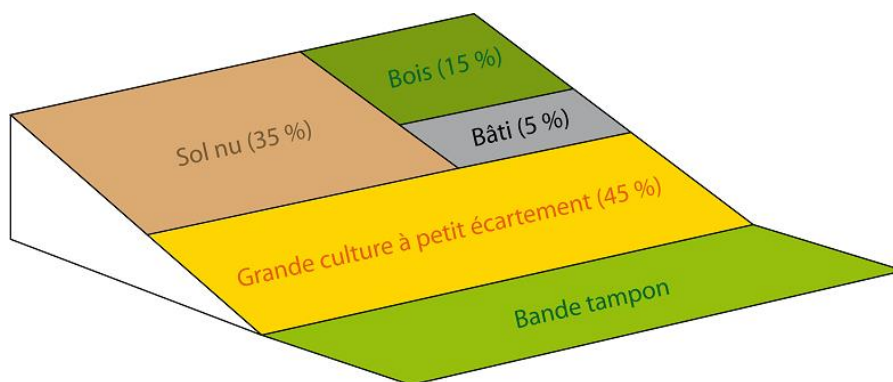
Le tableau ci-dessous fournit les différentes valeurs de Curve Number suggérées par l'USDA en fonction des éléments précédemment décrits, augmentées de 5 points pour tenir compte de l'adaptation au contexte métropolitain. Le cas des vignes et vergers est déterminé à partir d'une combinaison des CN fournis pour les sols nus (assimilé à un interrang désherbé), les prairies (assimilé à l'enherbement interrangs) et les bois (considérés comme représentatifs d'une végétation ligneuse).

Type de couverture	Conditions	Groupe hydrologique du sol			
		A	B	C	D
Sol nu	---	82	91	96	99
Résidu de culture	Défavorable <i>Par exemple : faible densité de résidus, partiellement enfouis après déchaumage, sol tassé par le chantier de récolte</i>	81	90	95	98

	Favorable <i>Par exemple : forte densité de résidus non enfouis, sol peu tassé par le chantier de récolte</i>	79	88	93	95
Grandes cultures à grand écartement (maïs, betterave, pomme de terre...)	Défavorable <i>Par exemple : premiers stades de levée (feuillage peu développé)</i>	77	86	93	96
	Favorable <i>Par exemple : feuillage bien développé</i>	72	83	90	94
Grandes cultures à petit écartement (blé, orge, triticale, colza, luzerne...)	Défavorable <i>Par exemple : premiers stades de levée (feuillage peu développé)</i>	70	81	89	93
	Favorable <i>Par exemple : feuillage bien développé, techniques de semis direct</i>	68	80	88	92
Vignes et Verger	Défavorable <i>Pas d'enherbement (sol nu entre les rangs)</i>	66	81	89	94
	Moyenne <i>Enherbement d'un rang sur deux</i>	59	76	86	91
	Favorable <i>Enherbement de tous les inter-rangs</i>	47	69	81	87
Prairies et pâturages	Défavorable <i>La végétation couvre moins de 50% de la surface et/ou pacage important</i>	73	84	91	94
	Moyenne <i>La végétation couvre entre 50% et 75% de la surface et pacage limité</i>	54	74	84	89
	Favorable <i>La végétation couvre plus de 75% de la surface et pacage limité</i>	44	66	79	85
Broussailles et Friches	Défavorable <i>La végétation couvre moins de 50%</i>	53	72	82	88
	Moyenne <i>La végétation couvre entre 50% et 75%</i>	40	61	75	82
	Favorable <i>La végétation couvre plus de 75%</i>	35	53	70	78
Bois et forêts	Défavorable <i>Elimination totale des strates herbacées et arbustives</i>	50	71	82	88
	Moyenne <i>Elimination partielle des strates herbacées et arbustives</i>	41	71	78	84
	Favorable <i>Strates herbacées et arbustives préservées</i>	35	60	75	82
Zones urbanisées (routes, chemins, bâti...)	---	100			

Tableau 1 : Valeur des Curve Number en fonction du type hydrologique de sol et de l'occupation du sol (valeurs corrigées pour une utilisation dans le contexte métropolitain)

À partir du tableau, il est également possible de déterminer le CN correspondant à une occupation des sols composite, lorsque plusieurs couverts coexistent sur la zone contributive en amont de la bande tampon. Il sera simplement fait une moyenne pondérée des CN de chaque couvert, en fonction de la proportion de surface occupée par chacun d'entre eux, comme montré dans l'exemple ci-dessous pour un groupe hydrologique de sol C.



Type de couverture	Conditions	Proportion de surface	Groupe hydrologique du sol
			C
Sol nu	-	0.35	96
Bois et forêts	Favorable <i>Strates herbacées et arbustives préservées</i>	0.15	75
Zones urbanisées (routes, chemins, bâti...)	-	0.05	103
Grandes cultures à petit écartement (blé, orge, triticale, colza, luzerne...)	Favorable <i>Par exemple : feuillage bien développé, techniques de semis direct</i>	0.50	88
Curve Number composite de la surface contributive		1	89

4.1.6. Conditions d'humidité initiale

La méthode du SCS-CN propose de corriger le CN en fonction des conditions d'humidité initiale du sol selon trois modalités : CN_I pour un sol sec, CN_{II} pour un sol moyennement humide (conditions « normales ») et CN_{III} pour un sol humide (supposant un précédent pluvieux significatif) avec CN_I < CN_{II} < CN_{III}. Ainsi, plus le sol est humide avant la survenue d'un épisode pluvieux plus le ruissellement généré sera important. Les valeurs données précédemment en section 4.1.5 correspondent à la modalité intermédiaire CN_{II}. Les corrections pour CN_I et CN_{III} sont appliquées automatiquement dans HyetoHydro à partir de cette valeur à l'aide de fonctions proposées par Chow et al. (1988).

L'utilisateur doit renseigner dans le fichier de paramètres la valeur 1, 2 ou 3 pour obtenir les valeurs correspondant aux conditions CN_I, CN_{II} et CN_{III} respectivement.

Condition d'humidité initiale	Pluie cumulée des 5 jours précédents (mm)	
	Saison hivernale	Saison de croissance de la végétation
I	Moins de 12.7	Moins de 35.5
II	De 12.7 à 27.9	De 35.5 à 53.3
III	Plus de 27.9	Plus de 53.3

Tableau 2 : Classification des classes de conditions d'humidité initiale pour la méthode du SCS (SCS, 1972)

Le Tableau 2 indique la condition d'humidité initiale en fonction de la précipitation cumulée des 5 jours précédents et de la période végétative.

Les différentes valeurs de ce paramètre peuvent être traitées comme autant de scénarios à tester pour déterminer le dimensionnement de la bande tampon dans différentes situations d'humidité des sols. Toutefois, dans un souci de cohérence, les conditions CN_I et CN_{II} seront préférentiellement associées aux situations estivales tandis que les conditions CN_{II} et CN_{III} seront préférentiellement associées aux conditions hivernales.

Le choix du scénario de pluie, et la définition des caractéristiques (géométrie, sol, occupation du sol et humidité initiale) de la zone contributive permettent le calcul de l'hydrogramme de ruissellement rentrant sur la zone tampon à dimensionner :

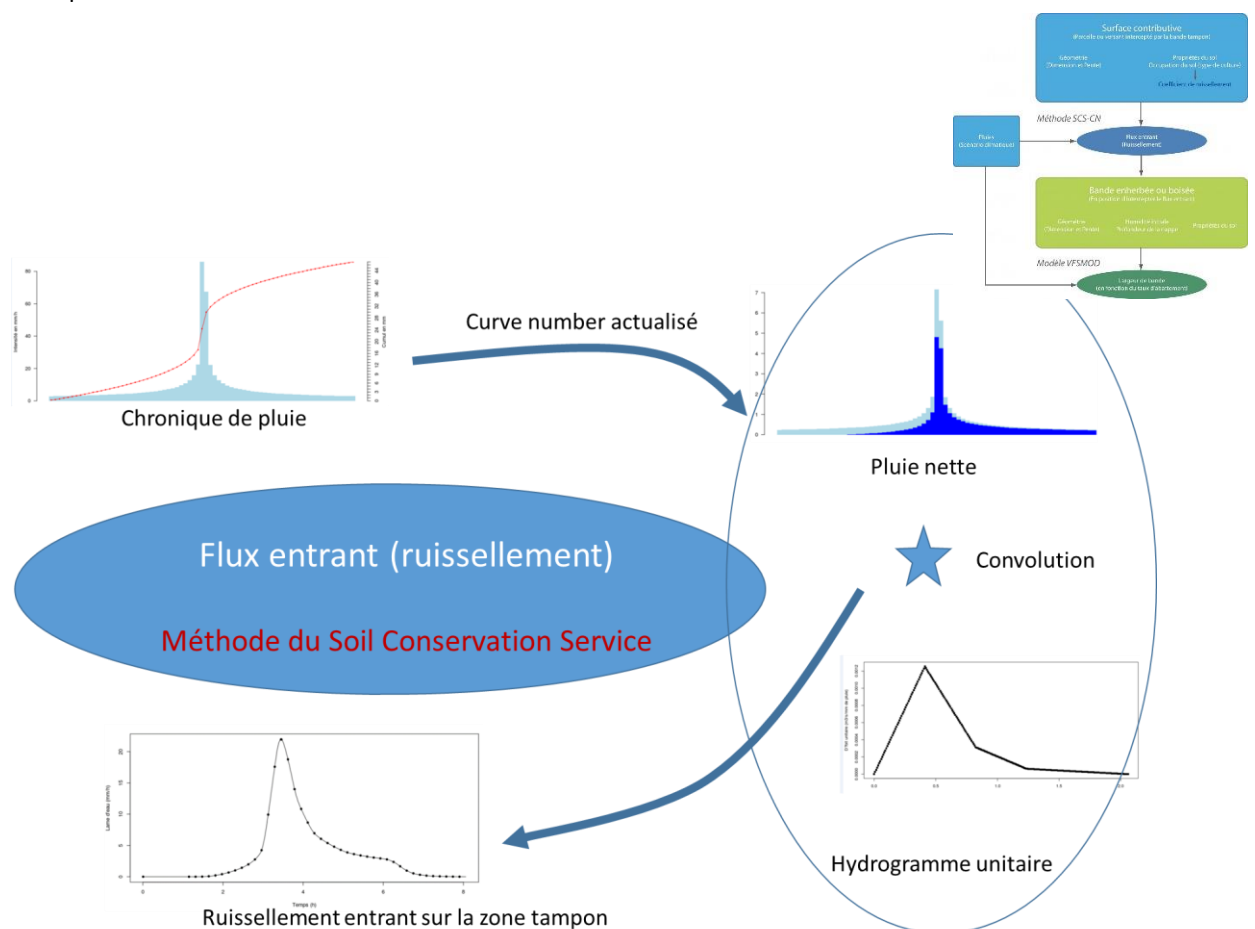


Figure 11 : Calcul de l'hydrogramme de ruissellement à partir du scénario de pluie et des caractéristiques de la zone contributive

4.2. Caractéristiques de la bande tampon végétalisée

Les caractéristiques de la bande tampon visent pour l'essentiel à décrire sa capacité de ralentissement puis d'infiltration du ruissellement entrant. Ces paramètres sont utilisés en entrée du modèle VFSmod pour déterminer l'efficacité de la bande tampon à atténuer le ruissellement en fonction d'une largeur donnée. Les paramètres à renseigner par l'utilisateur, détaillés ci-dessous, concernent principalement les propriétés

hydrauliques du sol (utilisées dans les équations d'infiltration). Les paramètres en rapport avec les propriétés de la végétation, employées pour caractériser la rugosité du couvert (coefficient de Manning), sont fixés par défaut pour un couvert herbacé (type ray-gras anglais semé) dense et homogène. Ils sont donc représentatifs d'une bande tampon correctement implantée et bien entretenue (fauche régulière). Ils sont aussi considérés comme valables pour un couvert constitué de végétation ligneuse (type haie) sous réserve qu'il existe une strate herbacée bien développée au pied des arbres et arbustes

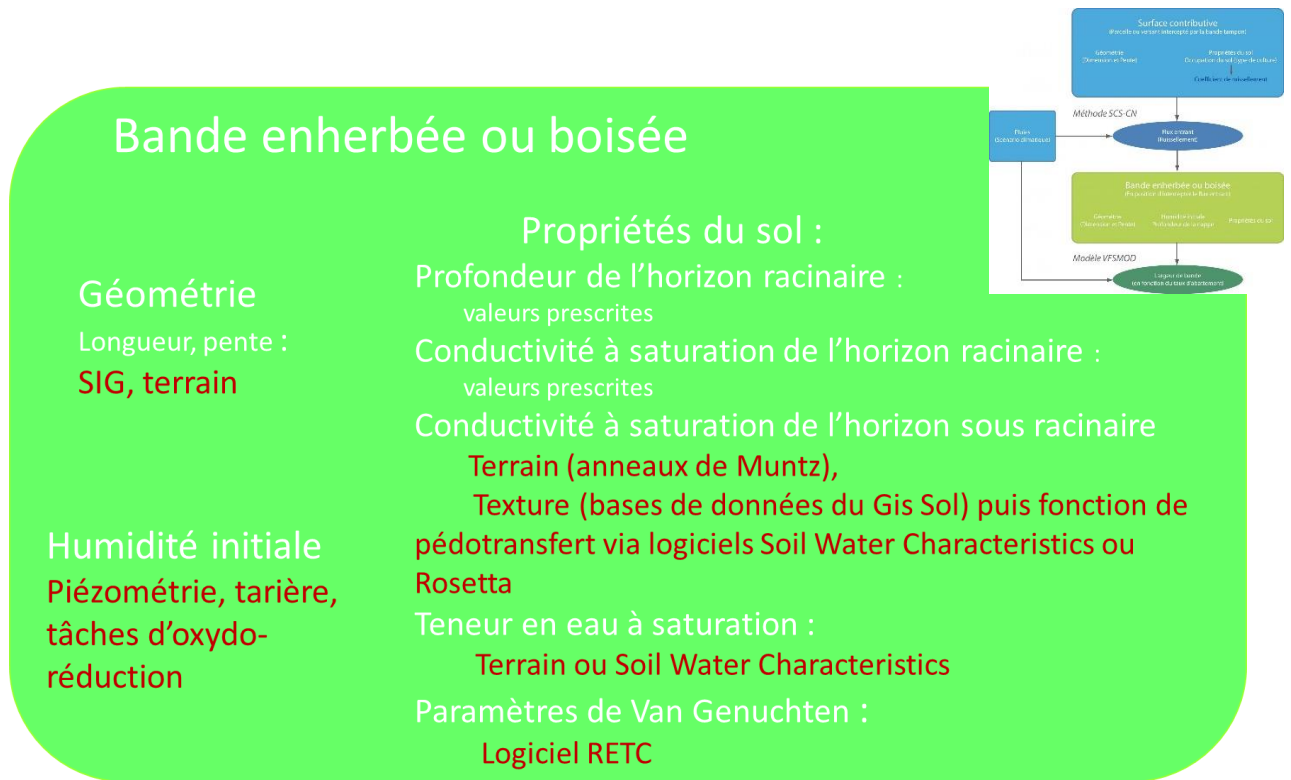


Figure 12 : Détermination des caractéristiques de la zone tampon.

4.2.1. Étendue de la bande tampon

L'étendue de la bande tampon correspond à la longueur de linéaire de bande tampon perpendiculairement à la pente, mesurée en mètres. Ce paramètre n'a pas de réelle influence sur le dimensionnement mais permet toutefois de préciser dans VFSmod la surface totale de la bande tampon (et par extension de son versant contributif) pour déterminer les volumes totaux de pluies et de ruissellement reçus.

4.2.2. Pente de la bande tampon

La pente de la bande tampon est employée dans VFSmod dans les équations d'onde cinématique caractérisant le ralentissement du ruissellement en lien avec la topographie locale (et la rugosité de la végétation). La pente de la bande tampon est mesurée en pourcent dans le sens des écoulements arrivant sur la bande, c'est-à-dire dans le sens de la largeur de la bande tampon. Compte tenu de l'échelle considérée (quelques mètres), une mesure de déclivité sur le terrain est fortement recommandée.

4.2.3. Profondeur de nappe sous la bande tampon

La présence d'une nappe d'eau à faible profondeur sous la bande tampon réduit son efficacité en limitant les possibilités d'infiltration du ruissellement émis par la zone contributive située en amont. En effet, le sol risque de se trouver plus rapidement saturé (la nappe « remonte ») au cours d'un épisode pluvieux,

notamment en cas de cumul important sur une certaine durée. L'eau en surplus ne s'infiltré plus et poursuit son chemin par ruissellement.

La présence d'une nappe à faible profondeur peut être liée à différents facteurs : proximité d'un cours d'eau, remontée de nappe phréatique (fréquent en milieu alluvial) ou encore rupture de perméabilité dans le sol (horizon plus argileux) induisant une saturation des horizons sus-jacents. Les sols affectés par la saturation sont généralement qualifiés d'hydromorphes et présentent des caractéristiques observables ou mesurables (plantes indicatrices, tâches de couleur, accumulation de matière organique, pH, potentiel redox...).

Sur le terrain, l'état de saturation plus ou moins temporaire du sol peut être mis en évidence à l'aide de sondages à la tarière en examinant la présence de 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 n'est pas saturé mais sujet à des remontées périodiques de la nappe. Les tâches de couleur bleue-grise sont caractéristiques du fer à l'état réduit et indiquent que le sol est saturé. La limite supérieure de la zone d'observation de ces tâches de couleur définit le plus haut niveau atteint par la nappe.

Le cas échéant, l'existence de piézomètres (et relevés piézométriques) peut aussi permettre de connaître les fluctuations de niveau d'eau, en particulier pour des nappes à plus grande profondeur (> 200 cm).

Enfin, certaines bases de données sur les sols contiennent également des informations sur l'état d'hydromorphie des sols. La base de données DONESOL en particulier (programme IGCS géré par l'INRA) compile différentes études pédologiques où peuvent être renseignées la distribution et l'abondance des tâches d'oxydo-réduction (<https://dw3.gissol.fr/login>).

Étant donnée l'existence de fluctuations parfois importantes de la profondeur de nappe en fonction de la saison (nappe haute en hiver, nappe basse en été), on veillera à déterminer puis renseigner la profondeur de nappe en cohérence avec les autres paramètres soumis à une évolution saisonnière (type d'épisode pluvieux et Curve Number).

Lorsqu'elle a été déterminée, la valeur de profondeur de nappe doit être renseignée en cm dans le fichier de paramètre. On précisera que ce paramètre est particulièrement sensible entre 0 et 400cm, au-delà, la présence d'une nappe n'a plus d'influence sur les résultats. Pour toutes les situations de nappe profonde (> 400cm) l'utilisateur peut alors renseigner cette valeur par défaut.

4.2.4. Profondeur de l'horizon racinaire

La profondeur de l'horizon racinaire de la végétation en place sur la bande tampon est employée de manière conjointe avec la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire (cf. section 4.2.5) et avec la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon sous racinaire (cf. section 4.2.6) pour calculer la conductivité hydraulique à saturation sur la totalité du profil de sol (moyenne harmonique). En effet, les capacités d'infiltration de ce premier horizon sont souvent nettement supérieures à celles du sol proprement dit (en raison du système racinaire et de la macroporosité liée à l'activité biologique). Elles peuvent donc influencer significativement sur les possibilités d'infiltration à l'échelle du profil entier et il est important d'en tenir compte.

Cette donnée peut être déterminée à partir des références de profondeur d'enracinement pour différents couverts (supposés bien développés). Il est ainsi recommandé d'employer :

- Une valeur de 15cm pour les couverts herbacés (de type ray-grass anglais semé)
- Une valeur de 40cm pour les couverts ligneux et mixtes (type haie)

4.2.5. Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire

La conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire est employée de manière conjointe avec la profondeur de l'horizon racinaire (cf. section 4.2.4) et avec la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon

sous racinaire (cf. section 4.2.6) pour calculer la conductivité hydraulique à saturation sur la totalité du profil de sol (moyenne harmonique). En effet, les capacités d'infiltration de ce premier horizon sont souvent nettement supérieures à celles du sol proprement dit (en raison du système racinaire et de la macroporosité liée à l'activité biologique). Elles peuvent donc influencer significativement sur les possibilités d'infiltration à l'échelle du profil entier et il est important d'en tenir compte.

La détermination de ce paramètre peut être effectuée sur le terrain à partir d'essais de perméabilité réalisés directement à la surface du sol (la méthode des anneaux de Muntz est recommandée dans la mesure où le dispositif peut être employé sans éliminer la végétation en place). Si une telle mesure n'est pas possible, (notamment s'il s'agit d'un projet d'implantation de bande tampon) des valeurs par défaut sont recommandées :

- **150mm/h pour les couverts herbacés (de type ray-grass anglais semé)**
- **400mm/h pour les couverts ligneux et mixtes (type haie)**

4.2.6. Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon sous racinaire

La conductivité hydraulique à saturation de l'horizon sous racinaire est employée de manière conjointe avec la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire (cf. section 4.2.5) pour calculer la conductivité hydraulique à saturation sur la totalité du profil de sol (moyenne harmonique). La profondeur du fond de l'horizon sous racinaire est fixée par défaut à 100 cm.

La conductivité hydraulique à saturation du profil de sol est l'un des paramètres les plus influents vis-à-vis des possibilités d'infiltration du ruissellement au sein de la bande tampon. Il convient donc de le déterminer avec le plus de précision possible, c'est pourquoi la réalisation de mesures sur le terrain est fortement recommandée. Elles permettront notamment de mieux tenir compte d'éventuels phénomènes de tassement du sol lié au passage d'engins agricoles.

Comme dans le cas des sols de la surface contributive, ce paramètre exprimé en mm/h, peut être obtenu par divers moyens :

- **à l'aide de mesures sur le terrain (recommandé).** Dans la mesure du possible on effectuera des mesures à différentes profondeurs pour déterminer l'existence de variations de conductivité hydraulique. Le cas échéant on retiendra la valeur de l'horizon le moins perméable du profil sur la tranche 0 et 100cm.
- **à partir des informations reportées dans les bases de données pédologiques.** Ce cas est malheureusement assez rare mais certaines des études pédologiques compilées par la base de données DONESOL (programme IGCS géré par l'INRA, <https://dw3.gissol.fr/login>) peuvent contenir des champs relatifs aux propriétés hydrauliques des sols.
- **à l'aide de règles de pédo-transfert basées sur la texture du sol.** Cette dernière solution est détaillée dans l'encart ci-dessous.

Utilisation de fonctions de pédo-transfert pour la détermination de la conductivité hydraulique à saturation d'un sol

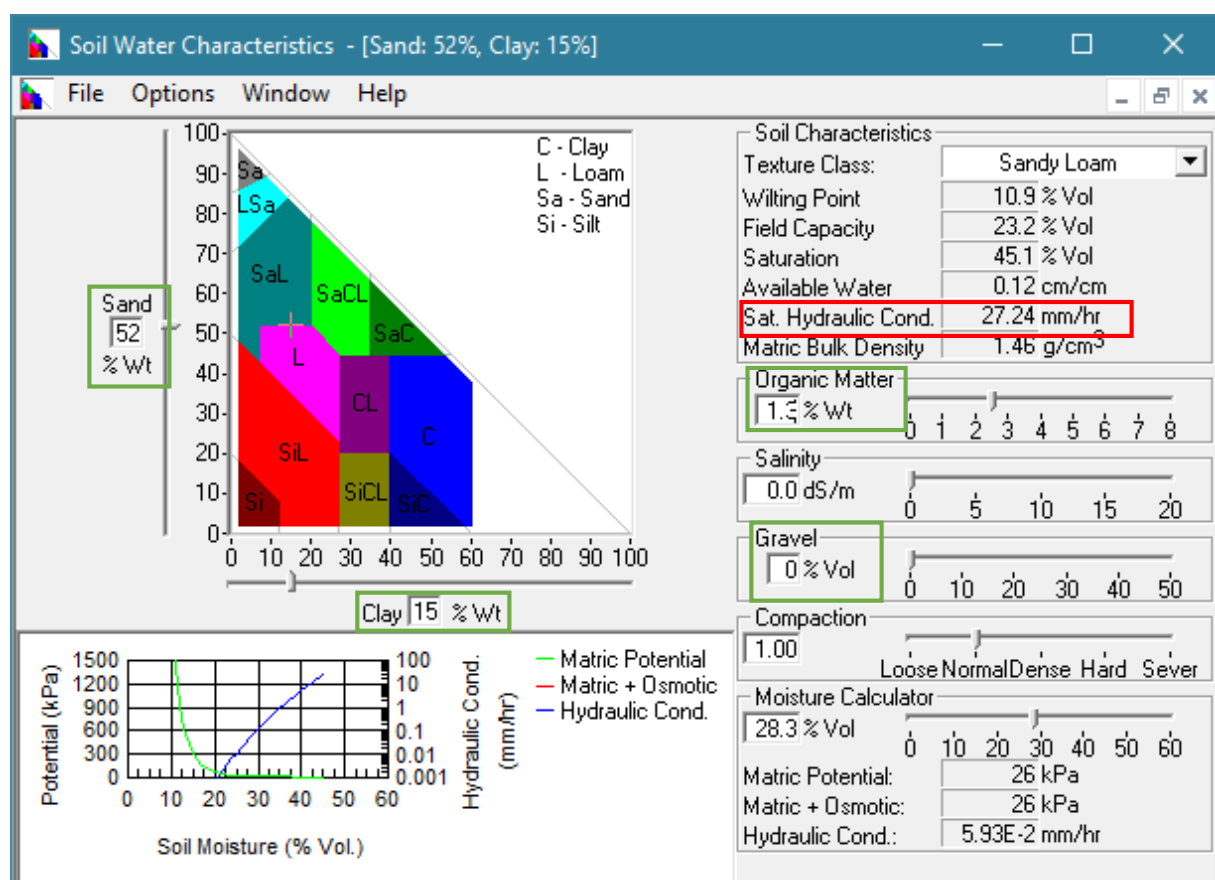
En l'absence de réalisation de mesures directes sur le terrain (perméamètre, anneaux de Muntz...), il est possible d'obtenir une estimation de la conductivité hydraulique à saturation d'un sol à partir de fonctions de pédo-transfert. Ces fonctions s'appuient sur les données de texture du sol, le taux de matière organique et la densité apparente ou le degré de compaction. Ces données peuvent être acquises sur le terrain par prélèvement de sol (à la tarière et à l'aide de cylindres métalliques) puis mesurées en laboratoire. Elles sont aussi disponibles dans certaines bases de données pédologiques (BDGSF : <https://www.gissol.fr/tag/bdgsf>, BDAT :

<https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-danalyses-des-terres-bdat-62>). Il faut cependant rester prudent en raison de la résolution de ce type de données, souvent insuffisamment détaillée pour restituer toute la variabilité spatiale des sols, notamment aux échelles considérées.

Une fois ces données recueillies, plusieurs logiciels offrent la possibilité d'appliquer des fonctions de pédo-transferts pour déterminer les différentes caractéristiques hydrauliques du sol étudié, dont la conductivité hydraulique à saturation. Les deux possibilités recommandées sont :

- Le logiciel « Soil Water Characteristics » développé par l'USDA (<http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/newregistration.html>)
- Le logiciel Rosetta développé par Schaap et al. (1999) (<http://cals.arizona.edu/research/rosetta/rosetta.html>)

On notera que les deux logiciels peuvent fournir des résultats différents en raison des modes de calcul et des fonctions implémentées dans chacun d'entre eux. Cela témoigne d'une certaine incertitude de ces méthodes.



Extrait de l'interface du logiciel « Soil Water Characteristics ». En vert les paramètres à renseigner. En rouge la conductivité hydraulique à saturation calculée par le logiciel

4.2.7. Teneur en eau à saturation du profil de sol

La teneur en eau à saturation d'un sol correspond à sa porosité, c'est-à-dire le volume de vides que peut occuper l'eau pour un volume de sol donné. Ce paramètre s'exprime donc en pourcent.

La détermination de la teneur en eau à saturation peut être effectuée :

- **à partir de prélèvements de sol de la bande tampon** (réalisés à l'aide de cylindres métalliques de manière à ne pas déstructurer l'échantillon) puis en laboratoire (méthode d'immersion, méthode de la poussée d'Archimède...). Idéalement, plusieurs prélèvements au sein de la bande tampon et à

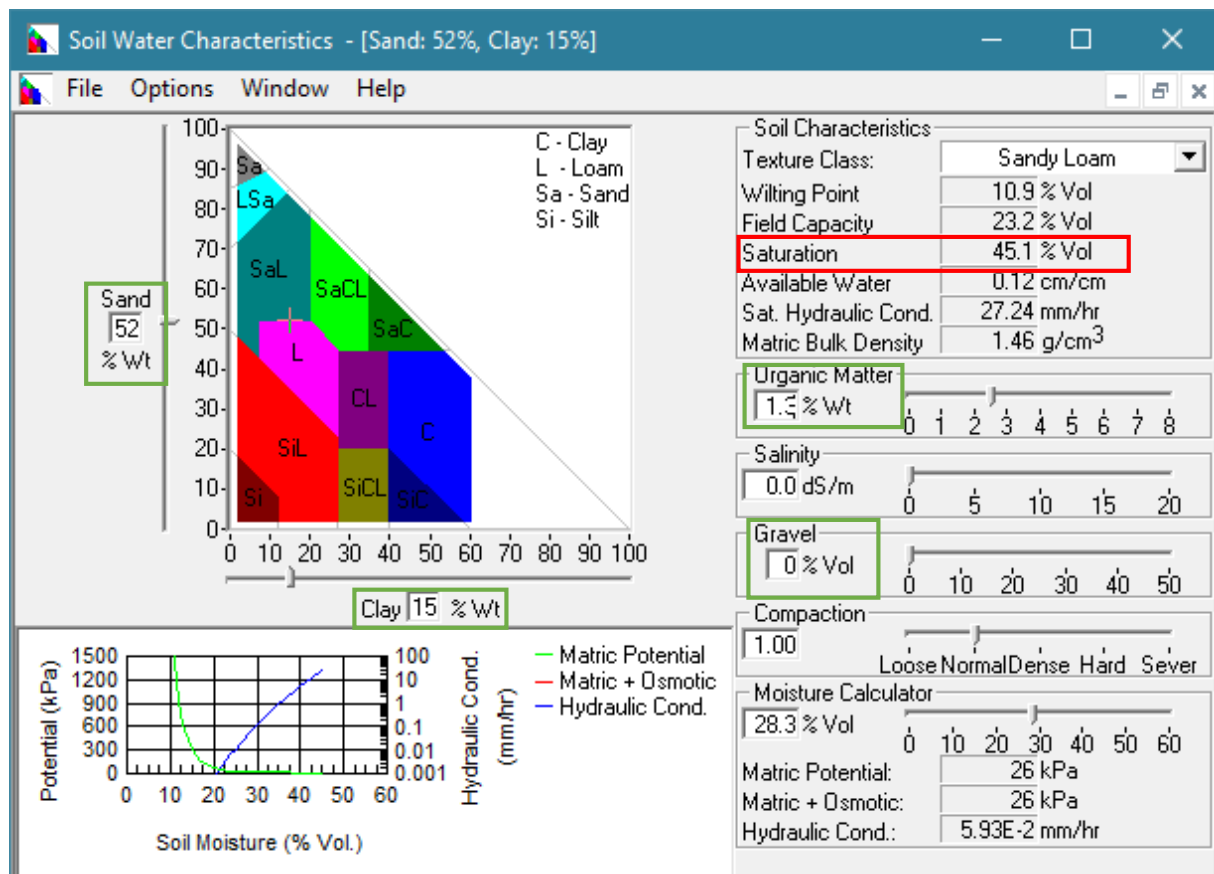
différentes profondeurs seront effectués pour déterminer l'existence de variations de porosité. Le cas échéant on retiendra la valeur de l'horizon le moins poreux du profil sur la tranche 0 et 100cm.

- à l'aide de règles de pédo-transfert basées sur la texture du sol. Cette dernière solution est détaillée dans l'encart ci-dessous.

Utilisation de fonctions de pédo-transfert pour la détermination de la teneur en eau à saturation d'un sol

En l'absence de mesures réalisées à partir d'échantillons non remaniés prélevés sur le terrain, il est possible d'obtenir une estimation de la teneur en eau à saturation d'un sol à partir de fonctions de pédo-transfert. Ces fonctions s'appuient sur les données de texture du sol, le taux de matière organique et la densité apparente ou le degré de compaction. Ces données peuvent être acquises sur le terrain par prélèvement de sol (à la tarière et à l'aide de cylindres métalliques) puis mesurées en laboratoire. Elles sont aussi disponibles dans certaines bases de données pédologiques (BDGSF : <https://www.gissol.fr/tag/bdgsf>, BDAT : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-danalyses-des-terres-bdat-62>). Il faut cependant rester prudent en raison de la résolution de ce type de données, souvent insuffisamment détaillée pour restituer toute la variabilité spatiale des sols, notamment aux échelles considérées.

Une fois ces données recueillies, il est recommandé d'utiliser le logiciel « Soil Water Characteristics » développé par l'USDA (<http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/newregistration.html>) pour déterminer la teneur en eau à saturation. Cette étape peut être réalisée au même moment que la détermination de la conductivité hydraulique à saturation.



Extrait de l'interface du logiciel « Soil Water Characteristics ». En vert les paramètres à renseigner. En rouge la teneur en eau à saturation calculée par le logiciel

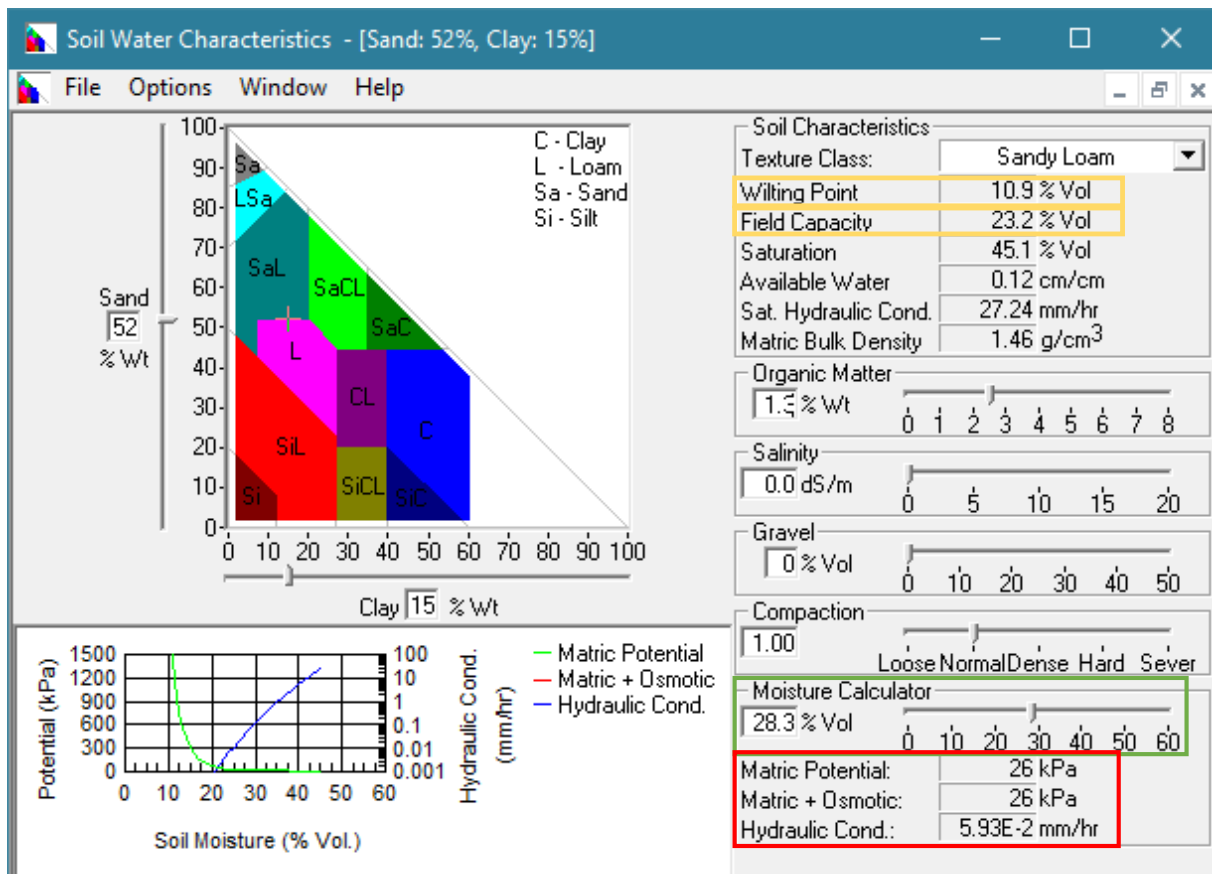
4.2.8. Teneur en eau résiduelle du profil de sol, paramètre alpha de Van Genuchten et paramètre n de Van Genuchten

La teneur en eau résiduelle ainsi que les paramètres alpha et n de Van Genuchten sont utilisés dans VFSmod pour calculer la courbe de rétention de l'eau dans le sol et déterminer la teneur en eau initiale du sol.

Ils peuvent être obtenus en faisant appel successivement aux logiciels « Soil Water Characteristics » (<http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/newregistration.html>) puis « RETC » (<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc-downloads>).

Etape 1 : détermination de la courbe de rétention de l'eau dans le sol à l'aide du logiciel « Soil Water Characteristics »

« Soil Water Characteristics » sera tout d'abord utilisé pour établir la courbe de rétention de l'eau dans le sol. Après avoir renseigné les pourcentages d'argile et de sable, la teneur en matière organique et le degré de compaction (de la même manière que dans le cas de la détermination de la conductivité hydraulique à saturation et de la teneur en eau à saturation, cf. sections 4.2.6 et 4.2.7), il convient de relever les valeurs de pression matricielle en cm (« Matric Potential ») et de conductivité hydraulique en cm/h (« Hydraulic Cond. ») obtenues pour différentes valeurs de teneur en eau que l'on fera varier à l'aide du curseur dédié (« Moisture Calculator »). Il est recommandé de constituer un tableau d'au moins 10 à 15 valeurs comprises entre la teneur en eau au point de flétrissement (« Wilting Point ») et la teneur en eau à saturation. Ce tableau est ensuite réutilisé dans RETC ; il est cependant important de ne pas oublier d'effectuer une conversion d'unité pour passer de bar en cm pour la pression matricielle (1 cm d'eau = $9,81 \times 10^{-4}$ bar).



Extrait de l'interface du logiciel « Soil Water Characteristics ». En vert : le curseur de teneur en eau. En jaune : les valeurs de point de flétrissement et de teneur en eau à saturation. En rouge : les valeurs de pression matricielle et de conductivité hydraulique permettant de constituer la courbe de rétention de l'eau dans le sol.

Etape 2 : détermination de la teneur en eau résiduelle et des paramètres *alpha* et *n* de Van Genuchten avec RETC

À la suite de la première étape, le logiciel RETC sera utilisé pour déterminer la teneur en eau résiduelle ainsi que les paramètres *alpha* et *n* de Van Genuchten. Pour ce faire on procédera selon les étapes suivantes (on veillera à bien utiliser les bonnes unités) :

- Dans la fenêtre d'accueil de RETC : ouvrir un nouveau fichier puis double cliquer sur « Type of Problem »
- Dans la fenêtre « Type of Problem » : sélectionner « Both retention data and conductivity/diffusivity data » puis cliquer sur « Next »
- Dans la fenêtre « Time and Space Units » : sélectionner les unités utilisées à l'étape 1 pour construire la courbe de rétention de l'eau dans le sol (mm, Hours) puis cliquer sur « Next »
- Dans la fenêtre « Type of Retention/Conductivity Model » : sélectionner « Van Genuchten, $m = 1 - 1/n$ – Mualem » et renseigner en bas le nombre de lignes du tableau construit à l'étape 1 puis cliquer sur « Next »
- Dans la fenêtre « Water Flow Parameters » : renseigner dans les valeurs de teneur en eau à saturation en pourcent du sol (« ThetaS ») et de conductivité hydraulique à saturation en mm/h (« Ks ») et cocher les cases Qr, Alpha, n et l de la ligne « Fitted » puis cliquer sur « Next »
- Dans la fenêtre « Retention Curve Data » : renseigner les valeurs de pression matricielle **en cm** (« Pressure ») et de teneur en eau en pourcent (« Theta ») obtenues à l'étape 1 à l'aide du logiciel « Soil Water Characteristics » puis cliquer sur « Next »
- Dans la fenêtre « Type of conductivity/Diffusivity Data » : sélectionner « Conductivity versus Pressur Head » et renseigner en bas le nombre de lignes du tableau construit à l'étape 1 puis cliquer sur « Next »
- Dans la fenêtre « Hydraulic Conductivity/Diffusivity Data » : renseigner les valeurs de pression matricielle en cm (« Pressure ») et de conductivité hydraulique en mm/h (« Theta ») obtenues à l'étape 1 à l'aide du logiciel « Soil Water Characteristics » puis cliquer sur « Next »
- Enregistrer les données et lancer le calcul en cliquant sur « OK » puis dans la fenêtre d'accueil de RETC double cliquer sur « RETC – Output Ascii File » pour consulter les paramètres calculés.

Enfin, l'utilisateur doit renseigner dans le fichier de paramètre de l'outil BUVARD les trois valeurs obtenues suite à ces calculs.

5. DIMENSIONNER UNE BANDE TAMPON VEGETALISEE AVEC BUVARD : INTERPRETATION DES RESULTATS

5.1. Format des résultats obtenus

À l'issue de chaque simulation, un fichier de résultat est écrit pour chaque scénario dans le répertoire du projet en cours. Le nom du fichier est systématiquement écrit au format suivant "results_myscenario.txt". Ce fichier de résultat se présente sous la forme d'un tableau comportant les principales sorties du modèle VFSmod ainsi qu'un calcul d'efficacité de la bande tampon appelé « Runoff Delivery Ratio Star » (RDR_star). Il correspond au rapport entre le ruissellement sortant de la bande (Runoff_out) d'une part et la somme des pluies reçues par la bande tampon (Rain) et du ruissellement entrant (Runoff_in) d'autre part. De là, le calcul

du taux d'atténuation du ruissellement de la bande tampon (en pourcent) peut être simplement obtenu en effectuant : $(1-RDR_star)*100$.

Les résultats pour chaque largeur de bande simulée (VFS_width) sont présentés en ligne. Les résultats sont successivement présentés pour le Curve Number renseigné par l'utilisateur puis pour des Curves Numbers augmentés et diminués de 3 points, comme expliqué en section 3.3 (Figure 13). Les séparateurs de colonne sont des tabulations.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Scenario	CN	VFS_Width_m	Rain_m3	Runoff_in_m3	Runoff_out_m3	Infilt_m3	RDR_p100	RDR_star_p100
2	exemple_S06	CN	1	0.361	16.44	14.122	2.679	0.859	0.841
3	exemple_S06	CN	4	1.443	16.438	8.644	9.237	0.526	0.483
4	exemple_S06	CN	7	2.525	16.427	4.09	14.862	0.249	0.216
5	exemple_S06	CN	10	3.608	16.438	1.261	18.785	0.077	0.063
6	exemple_S06	CN	15	5.412	16.441	0	21.853	0	0
7	exemple_S06	CN	20	7.216	16.439	0	23.654	0	0
8	exemple_S06	CN	25	9.02	16.44	0	25.46	0	0
9	exemple_S06	CN	30	10.823	16.441	0	27.264	0	0
10	exemple_S06	CN-2	1	0.361	13.873	11.477	2.758	0.827	0.806
11	exemple_S06	CN-2	4	1.443	13.872	5.869	9.446	0.423	0.383
12	exemple_S06	CN-2	7	2.525	13.88	1.623	14.782	0.117	0.099
13	exemple_S06	CN-2	10	3.608	13.875	0	17.483	0	0
14	exemple_S06	CN-2	15	5.412	13.873	0	19.285	0	0
15	exemple_S06	CN-2	20	7.216	13.88	0	21.096	0	0
16	exemple_S06	CN-2	25	9.02	13.873	0	22.893	0	0
17	exemple_S06	CN-2	30	10.823	13.881	0	24.704	0	0
18	exemple_S06	CN+2	1	0.361	19.457	17.154	2.664	0.882	0.866
19	exemple_S06	CN+2	4	1.443	19.458	12.038	8.863	0.619	0.576
20	exemple_S06	CN+2	7	2.525	19.464	7.409	14.58	0.381	0.337
21	exemple_S06	CN+2	10	3.608	19.458	3.84	19.226	0.197	0.166
22	exemple_S06	CN+2	15	5.412	19.456	0.828	24.04	0.043	0.033
23	exemple_S06	CN+2	20	7.216	19.467	0	26.683	0	0
24	exemple_S06	CN+2	25	9.02	19.468	0	28.487	0	0
25	exemple_S06	CN+2	30	10.823	19.457	0	30.28	0	0

Figure 13 : Exemple de tableau de résultat

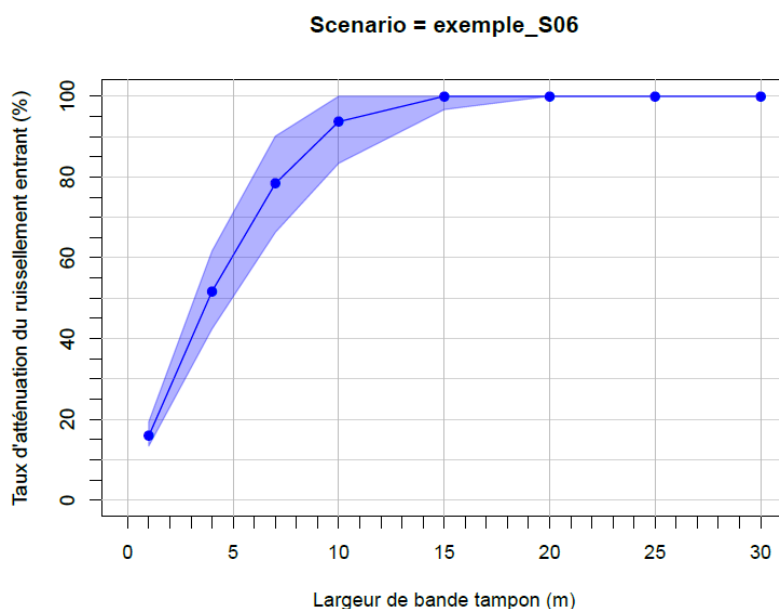


Figure 14 : Exemple de représentation graphique des résultats incluant les courbes enveloppes correspondant aux résultats obtenus pour des Curves Numbers augmentés et diminués de 2 points par rapport à la valeur renseignée par l'utilisateur.

Ce fichier peut être consulté et manipulé par l'utilisateur pour interpréter en détail ses résultats, par exemple à l'aide d'un tableur. Dans ce cas il est préférable d'effectuer une copie du fichier pour ne pas altérer le fichier d'origine. Parallèlement, une synthèse graphique de l'ensemble des scénarios d'un même projet est également fournie en format pdf. Les graphiques en question représentent l'efficacité de la bande tampon à

atténuer le ruissellement (en pourcent) en fonction de sa largeur (Figure 14). Ils permettent de lire aisément les résultats successifs afin de déterminer un dimensionnement optimal. Cette phase d'interprétation est détaillée dans la section suivante.

5.2. Exploitation et interprétation des résultats obtenus

À partir des résultats obtenus, l'utilisateur peut s'intéresser au dimensionnement d'une bande tampon :

- Pour un scénario climatique donné (en fonction par exemple de la période habituelle d'application des produits sur le site d'étude) en cherchant à déterminer une largeur optimale,
- Pour un objectif d'efficacité donné, en examinant la variabilité des résultats entre les différents scénarios climatiques et en déterminant un dimensionnement « acceptable »,
- Pour une largeur donnée, en examinant la gamme d'efficacité obtenue pour les différents scénarios climatiques et évaluant si le dimensionnement actuel d'une bande tampon est suffisant.

On rappellera que les calculs d'efficacité de la bande tampon sont réalisés par défaut pour des largeurs de 1, 4, 7, 10, 15, 20, 25 et 30m. Les valeurs intermédiaires peuvent être déduites par interpolation linéaire à partir des tableaux de résultats ou bien par lecture graphique.

En complément des résultats pour le scénario renseigné par l'utilisateur, des valeurs d'efficacité sont également fournies pour des valeurs de Curve Number augmentées et diminuées de 3 points. Ces résultats complémentaires visent à donner une indication sur l'incertitude affectant les résultats en relation avec la détermination du Curve Number (celle-ci peut en effet s'avérer assez imprécise ou incertaine, cf. section 4.1.5). Autrement dit, pour une même largeur de bande tampon, ces valeurs complémentaires peuvent être considérées comme les bornes d'efficacité supérieures et inférieures autour de la valeur renseignée par l'utilisateur. Une forte différence entre ces valeurs (> 10%) indique que le résultat s'avère particulièrement sensible au choix du Curve Number. Cela doit inciter l'utilisateur à nuancer les résultats ou tenter de valider plus précisément la valeur de Curve Number renseignée.

Quelques précisions utiles :

- Les résultats ne sont pas fournis pour des largeurs dépassant 30m. Au-delà, il est considéré que l'emprise du dispositif est trop importante et que celui-ci n'est pas susceptible de répondre efficacement à la problématique de ruissellement : le flux d'eau généré par la zone contributive est trop important pour être « absorbé » par la bande tampon. **Dans cette situation, il sera intéressant d'examiner la possibilité d'implanter d'autres bandes tampons plus haut dans le versant, avec des conditions locales d'implantation plus favorables à l'infiltration et des surfaces contributives plus raisonnables** (flux entrant moindre, nappe plus profonde, perméabilité du sol accrue) . En effet, il peut apparaître que les largeurs cumulées de bandes tampons réparties dans le versant soient plus avantageuses que la largeur d'un unique aménagement en bas de versant (notamment en situation d'hydromorphie, cf. section 5.2.3).
- La gamme d'efficacité considérée comme raisonnable est comprise entre 50% et 80%. En deçà, il est considéré que la bande tampon n'a pas ou peu d'intérêt et qu'il convient de rechercher une autre solution. Au-delà, les emprises nécessaires seront souvent disproportionnées (> 30m).
- **Certaines situations sont susceptibles de ne générer aucun ruissellement entrant ! Dans ce cas l'implantation d'une bande tampon n'est pas nécessaire (mais elle peut l'être pour d'autres scénarios et l'est dans tous les cas pour limiter la dérive en bordure de cours d'eau ou point d'eau).**

5.2.1. Optimiser le dimensionnement pour une situation particulière

Lorsque l'on s'intéresse à un unique scénario climatique, il peut être intéressant de rechercher un dimensionnement optimal en analysant l'allure de la courbe montrant l'évolution de l'efficacité de la bande tampon en fonction de sa largeur. En effet, dans bien des cas ces courbes montrent un accroissement significatif de l'efficacité suivi d'un palier plus ou moins franc, à partir duquel l'élargissement de la bande tampon n'apporte pas ou peu de gain d'efficacité supplémentaire (cf. Figure 14 où le palier est atteint pour une largeur autour de 10 m).

5.2.2. Déterminer un dimensionnement pour une efficacité donnée

Dans le cas où l'utilisateur fixe un objectif d'efficacité et s'intéresse conjointement à plusieurs scénarios climatiques, la diversité des résultats obtenus peut rendre complexe le choix d'un dimensionnement. Il est alors nécessaire de faire un choix sur les situations pour lesquelles la bande tampon atteindra l'efficacité escomptée. Un compromis est nécessaire entre la recherche d'efficacité et l'emprise dédiée à la zone tampon. Il est suggéré deux possibilités :

- En retenant la largeur de bande correspondant au pire scénario. Dans ce cas, l'efficacité souhaitée sera atteinte dans toutes les situations climatiques, ce qui peut nécessiter une emprise importante.
- En retenant une largeur de bande moins exigeante, correspondant par exemple à l'atteinte de l'objectif d'efficacité pour 75% des scénarios. Dans ce cas on vérifiera tout de même que la largeur de bande choisie ne conduit pas à un degré d'efficacité trop faible (< 50%) pour les scénarios « écartés ».

Exemple d'analyse des résultats :

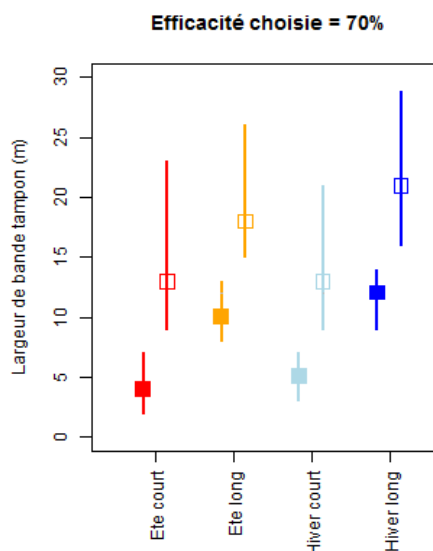
Dans l'exemple ci-dessous, une synthèse des résultats obtenus pour les quatre types de scénarios climatiques et deux conditions d'humidité initiale a été réalisée³. Les différentes valeurs de dimensionnement ont été extraites pour un objectif d'efficacité de 70% d'atténuation du ruissellement et reportées dans un graphique, incluant les bornes de l'incertitude liées à la détermination du Curve Number (valeurs entre crochets et barre d'erreur sur les graphiques présentés ci-dessous).

Les résultats sont fortement dispersés selon le scénario climatique considéré, avec des largeurs de bande tampon variant entre 2m et 29m (si l'on tient compte des bornes de l'incertitude liée à la détermination du Curve Number). On constate que les scénarios en conditions humides sont nettement plus défavorables que les scénarios en conditions sèches. Ils montrent aussi une plus forte sensibilité face au choix du Curve Number.

Dans cet exemple, le fait de retenir une largeur de bande tampon de 16m permet d'assurer l'objectif d'efficacité pour six des huit scénarios (soit 75% des scénarios). Par ailleurs, en examinant le résultat obtenu pour les deux scénarios restants avec 16m de bande tampon, on constate que la différence d'efficacité reste raisonnable (autour de 65%). Ce choix de dimensionnement s'avère donc tout à fait acceptable par rapport à l'objectif fixé.

³ Cette fonctionnalité n'est pas implémentée dans le programme mais il est fortement recommandé de s'en inspirer pour l'analyse des résultats.

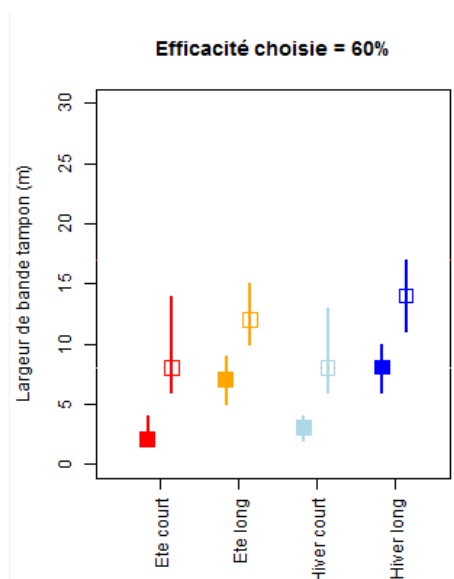
Episode pluvieux	Conditions sèches	Conditions humides
Estival court (1h)	4 [2 ; 7] m	13 [9 ; 23] m
Estival long (6h)	10 [8 ; 13] m	18 [15 ; 26] m
Hivernal court (2h)	5 [3 ; 7] m	13 [9 ; 21] m
Hivernal long (12h)	12 [9 ; 14] m	21 [16 ; 29] m



Le second exemple ci-dessous illustre le même résultat mais avec un objectif d'efficacité plus modeste, de 60%. Dans ce cas, une bande tampon de 17m remplit sa fonction pour l'ensemble des scénarios et une bande tampon de 11m permet d'atteindre l'efficacité escomptée pour six des huit scénarios (soit 5m de moins que pour atteindre 70% d'efficacité).

Dans ce cas, un gain de 5m sur l'emprise de bande tampon (environ 1/3 de surface en moins) pour une diminution d'efficacité de 10% peut s'avérer intéressant. Il n'est pas question de se prononcer ici sur le choix de l'une ou l'autre des solutions mais simplement de montrer un exemple de raisonnement visant à rechercher le meilleur compromis entre efficacité et emprise de la bande tampon. Les différentes possibilités peuvent être mises en discussion entre différents acteurs pour parvenir à choix de dimensionnement réellement personnalisé et adapté à chaque site d'implantation.

Episode pluvieux	Conditions sèches	Conditions humides
Estival court (1h)	2 [-2 ; 4] m	8 [6 ; 14] m
Estival long (6h)	7 [5 ; 9] m	12 [10 ; 15] m
Hivernal court (2h)	3 [-2 ; 4] m	8 [6 ; 13] m
Hivernal long (12h)	8 [6 ; 10] m	14 [11 ; 17] m



5.2.3. Vérifier l'efficacité d'une bande tampon dans différentes situations climatiques

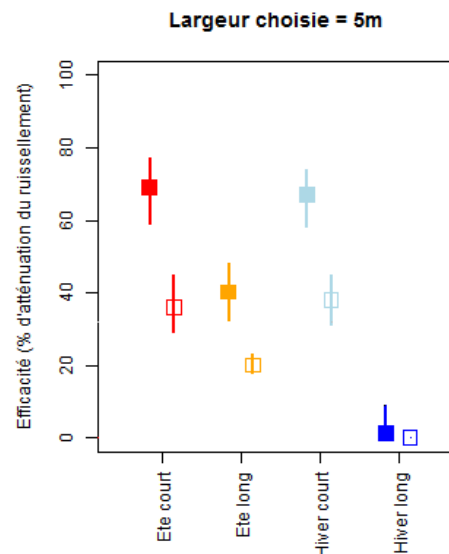
Lorsque l'utilisateur choisit d'examiner l'efficacité d'une bande tampon pour une largeur donnée, l'interprétation des résultats se résume à déterminer si la bande tampon atteint des performances satisfaisantes face aux différentes situations climatiques. Selon le niveau d'exigence, le seuil d'efficacité à atteindre peut être plus ou moins élevé (il est toutefois recommandé de toujours atteindre au moins 50%).

Ainsi, on vérifiera avant tout le résultat associé au pire scénario tandis que le score médian sera par exemple une indication intéressante sur les performances obtenues dans la moitié des cas. De là, il pourra être envisagé de jouer sur la largeur de la bande tampon pour déterminer dans quelle mesure l'élargissement de celle-ci peut permettre d'améliorer son efficacité.

Exemple d'analyse des résultats :

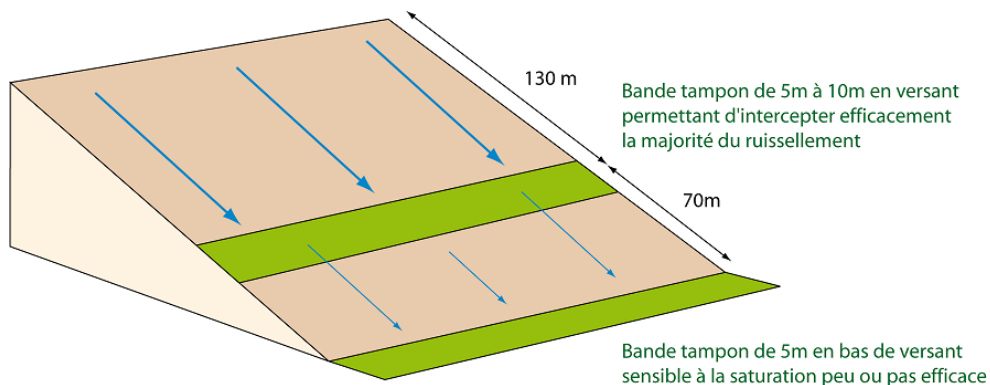
Dans l'exemple ci-dessous, l'efficacité d'une bande tampon rivulaire de 5m, sensible à la saturation (nappe à faible profondeur) et placée en aval d'une parcelle de 200m assez ruisselante est nettement insuffisante avec une efficacité nulle dans le pire des cas et une efficacité supérieure à 50% dans seulement deux situations climatiques. Il faut arriver à une largeur de 20m pour obtenir une efficacité d'au moins 50% pour six des huit scénarios (tandis que l'efficacité pour les deux autres scénarios reste encore très insuffisante, comprise en 9 et 31%).

Episode pluvieux	Conditions sèches	Conditions humides
Estival court (1h)	69 [59 ; 77] %	36 [29 ; 45] %
Estival long (6h)	40 [32 ; 48] %	20 [18 ; 23] %
Hivernal court (2h)	67 [58 ; 74] %	38 [31 ; 45] %
Hivernal long (12h)	1 [0 ; 9] %	0 [0 ; 0] %

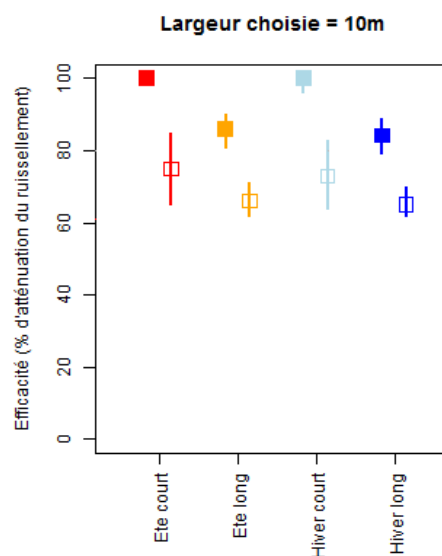


Dans une telle situation où la présence d'une nappe à faible profondeur au voisinage du cours d'eau constitue un facteur très défavorable, il sera intéressant d'envisager l'implantation d'une bande tampon complémentaire plus haut dans le versant, à l'écart de la zone affectée par la présence de la nappe.

Par exemple, en envisageant l'implantation d'une bande tampon intermédiaire aux deux tiers inférieurs de la parcelle initiale (soit en créant deux sous-ensembles de 70m et 130m environ), le ruissellement émis par la surface amont de 130m sera très bien atténué par une bande tampon de 10m (efficacité supérieure à 61% pour l'ensemble des scénarios climatiques, cas montré en exemple ci-dessous) voire 5m (efficacité comprise entre 48 et 99%). À l'aval, la bande tampon riveraine de 5m recevra également moins de ruissellement et sera donc elle aussi plus efficace. Ainsi par rapport à une unique bande tampon en bas de versant, cette solution possède l'avantage de maîtriser correctement la majorité du ruissellement émis par le versant contributeur sans nécessiter une emprise démesurée.



Episode pluvieux	Conditions sèches	Conditions humides
Estival court (1h)	100 [100 ; 100] %	75 [65 ; 85] %
Estival long (6h)	86 [80 ; 90] %	66 [61 ; 71] %
Hivernal court (2h)	100 [96 ; 100] %	73 [64 ; 83] %
Hivernal long (12h)	84 [79 ; 89] %	65 [62 ; 70] %



6. CONCLUSION

L'objectif de l'outil BUVARD (Buffer strip runoff Attenuation and pesticide Retention Design tool) est de mettre à disposition une méthode de dimensionnement des bandes enherbées adaptée à un usage opérationnel. Cet outil s'inscrit ainsi dans la démarche d'aménagement de zones tampons en territoire rural dans un but de limitation des pollutions diffuses par les pesticides (Catalogne et Le Hénaff, 2016, Catalogne et Le Hénaff, 2017).

Dans sa version complète, l'outil présente une certaine complexité, c'est pourquoi le présent guide a été élaboré pour fournir à l'utilisateur l'ensemble des éléments nécessaires à sa manipulation. Les différentes parties présentent successivement la démarche de dimensionnement, les outils de modélisation mobilisés, les instructions pour exécuter le programme, le paramétrage puis les modalités d'interprétation des résultats.

Le programme est mis à disposition sur demande auprès de l'équipe Pollutions Diffuses d'Irstea Lyon-Villeurbanne (ZT_eq_PollDiff@irstea.fr).

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boivin, A., Margoum, C., Guillemain, C., Ball, N., Carluer, N., Gril, J.J., Gouy, V. (2007). Water and pesticide transport dynamic in a grass buffer strip. WAPO : International Conference on WAtER POLLution in natural POrous media at different scales. Assessment of fate, impact and indicators., Barcelone.
- Carluer, N., Fontaine, A., Lauvernet, C., Munoz-Carpena, R. (2011). Guide de dimensionnement des zones tampons enherbées ou boisées pour réduire la contamination des cours d'eau par les produits phytosanitaires, Cemagref. DGPAAT du Ministère en charge de l'Agriculture.
- Carluer N., Noll D., Bernard K., Fontaine A., Lauvernet C. (2014). Dimensionner les zones tampons enherbées et boisées pour réduire le transfert hydrique des produits phytosanitaires. TSM, n°12, pp101-120.
- Carluer, N., C. Lauvernet, D. Noll and R. Munoz-Carpena (2017). "Defining context-specific scenarios to design vegetated buffer zones that limit pesticides transfer via surface runoff." Science of the Total Environment **575**: 701-712.
- Catalogne C., Le Hénaff G.(coordinateurs) (2017) : Guide d'aide à l'implantation des zones tampons pour l'atténuation des transferts de contaminants d'origine agricole. Elaboré dans la cadre du groupe techniques Zones Tampons. Agence française pour la biodiversité. *Collection Guides et Protocoles*. 64 pp
- Catalogne C., Le Hénaff G. (2016). Guide d'aide à l'implantation des zones tampons pour l'atténuation des transferts de contaminants d'origine agricole. Elaboré dans le cadre du groupe technique Zones tampons. Agence française pour la biodiversité, collection Guides et protocoles, 64 pages.
- Gril J-J., Le Hénaff G. (2010) - Guide de diagnostic de l'efficacité des zones tampons rivulaires vis-à-vis du transfert hydrique des pesticides. Rapport Irstea-ONEMA, 46 p.
- Gril J-J., Le Hénaff G., Faidix K. (2010) - Mise en place de zones tampons et évaluation de l'efficacité de zones tampons existantes destinées à limiter les transferts hydriques de pesticides : guide de diagnostic à l'échelle du petit bassin versant. Rapport Irstea-MAAP, 42 p.
- Lacas, J. G., Carluer, N., Voltz, V. (2012). "Surface-subsurface evaluation of the efficiency of a grassed buffer strip for herbicide retention." Pedosphere **22**(4): 580-592.)
- Muñoz-Carpena, R., Parsons, J.E., Gilliam, J.W. (1999). Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *Journal of Hydrology* 214, 111–129. doi:10.1016/S0022-1694(98)00272-8
- Muñoz-Carpena, R., Lauvernet, C., and Carluer, N. 2018. Shallow water table effects on water, sediment and pesticide transport in vegetative filter strips: Part A. non-uniform infiltration and soil water redistribution, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22:53-70. doi:10.5194/hess-22-53-2018
- USDA-SCS (1972). National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology. Washington, D.C.

Annexe I : Élaboration des hyétogrammes de pluie théoriques utilisés dans l'outil HyetoHydro

La chaîne de modélisation pour le dimensionnement des bandes tampons végétalisées destinées à l'atténuation des transferts de pesticides par ruissellement nécessite de définir des scénarios d'évènements pluvieux avant la construction d'un hydrogramme de ruissellement émis par la zone contributive (versant intercepté par la bande tampon). Le calcul de l'hydrogramme de ruissellement s'effectue selon la méthode du SCS-CN et nécessite la définition d'un hyétogramme de pluie donnant la répartition des intensités pluvieuses sur la durée D de l'évènement.

Les évènements pluvieux considérés sont issus de la méthode de régionalisation SHYREG (Arnaud et Lavabre, 1999⁴), caractérisés par :

- un cumul en mm
- une durée D (= 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24, 48, 72 h)
- une période de retour T de 1 an saisonnalisée (i.e. une valeur pour la période hivernale de décembre à mai et une valeur pour la période estivale de juin à novembre).

Les valeurs correspondantes sont disponibles à l'échelle de la France sur des mailles des 16 km². Afin de limiter le nombre de scénarios explorés, quatre types d'évènements pluvieux ont été retenus pour le dimensionnement :

- épisode estival court (D = 1h), dénommé S01 par la suite
- épisode estival long (D = 6h), dénommé S06 par la suite
- épisode hivernal court (D = 2h), dénommé W02 par la suite
- épisode hivernal long (D = 12h), dénommé W12 par la suite

Un travail a été entrepris afin d'affiner et différencier les structures temporelles des évènements pluvieux selon leur durée, la saison et la localisation géographique. Ce travail s'appuie sur l'analyse des observations à pas de temps fin réalisées par quatre postes pluviométriques jugés représentatifs de quatre grandes zones climatiques présentées ci-après.

La classification en zones climatiques

Cette étape est destinée à identifier un nombre réduit de grandes zones climatiques (cinq au maximum), considérées comme « homogènes » et pour lesquelles seront définies des structures temporelles de pluie types à partir de postes pluviométriques jugés représentatifs de chaque zone.

Ces zones ont été définies à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique (méthode de Ward) dont les variables d'entrée sont les valeurs d'intensité des quatre types d'épisodes pluvieux sélectionnés précédemment parmi les quantiles SHYREG.

Après examen des résultats (arbre de classification et carte), une première segmentation en quatre classes (ou zones) a été retenue. La discrimination s'effectue de manière univoque pour les quatre variables d'entrée : les valeurs d'intensités sont croissantes pour toutes les durées de pluies entre la classe 1 (régimes pluvieux de faibles intensités) et la classe 4 (régimes pluvieux de fortes intensités). Les classes sont non recouvrantes (bonne discrimination). La variance intraclasse par rapport à la variance totale est raisonnable (bonne homogénéité des classes) ; au-delà de quatre classe le gain en termes de diminution de la variance intraclasse s'avère beaucoup moins significatif.

⁴ P. Arnaud et J. Lavabre (1999). *Nouvelle approche de la prédétermination des pluies extrêmes*. C. R. Acad. Sci., Sciences de la Terre et des planètes, Géosciences de surface, hydrologie-hydrogéologie 328, 615-620

La cartographie des quatre zones montre que la discrimination est principalement liée au relief. A ce titre, la classe 4 (régimes pluvieux de fortes intensités), inféodée aux altitudes supérieures à 1200m (comme une partie de la classe 3), ne possède pas de réel intérêt dans le cadre de ces travaux compte tenu de l'usage faible ou nul de produits phytosanitaire par activités agricoles (et des besoins de bandes tampons qui en découlent) aux altitudes considérées (activité essentiellement pastorale). Un regroupement des classes 3 et 4 est par conséquent envisagé.

En revanche, la classe 1 recouvre un territoire particulièrement vaste. L'intérêt d'une nouvelle segmentation dans cette classe a été examiné (bien qu'elle ne soit pas la première proposée dans l'arbre de classification, la variance intraclasse étant plus importante dans les autres groupes). Elle apparaît assez pertinente du point de vue climatique avec une bonne discrimination du bassin Parisien (et plus secondairement des vallées abritées : plaine du Rhin, Limagne), moins arrosé⁵. Les deux nouvelles zones résultantes ont donc été conservées (dénommées zone 1a et zone 1b).

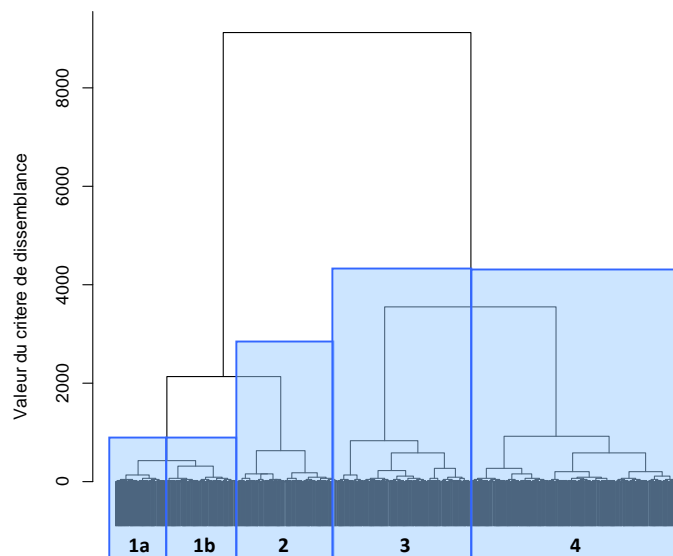


Figure 15 : Arbre de classification issu de la classification ascendante hiérarchique appliquée aux valeurs d'intensité S01, S06, W02, W12 extraites de la base SHYREG

⁵ Il apparaît indirectement ici un facteur de discrimination basé sur les cumuls pluviométriques sans que cette variable ait été explicitement introduite dans la classification.

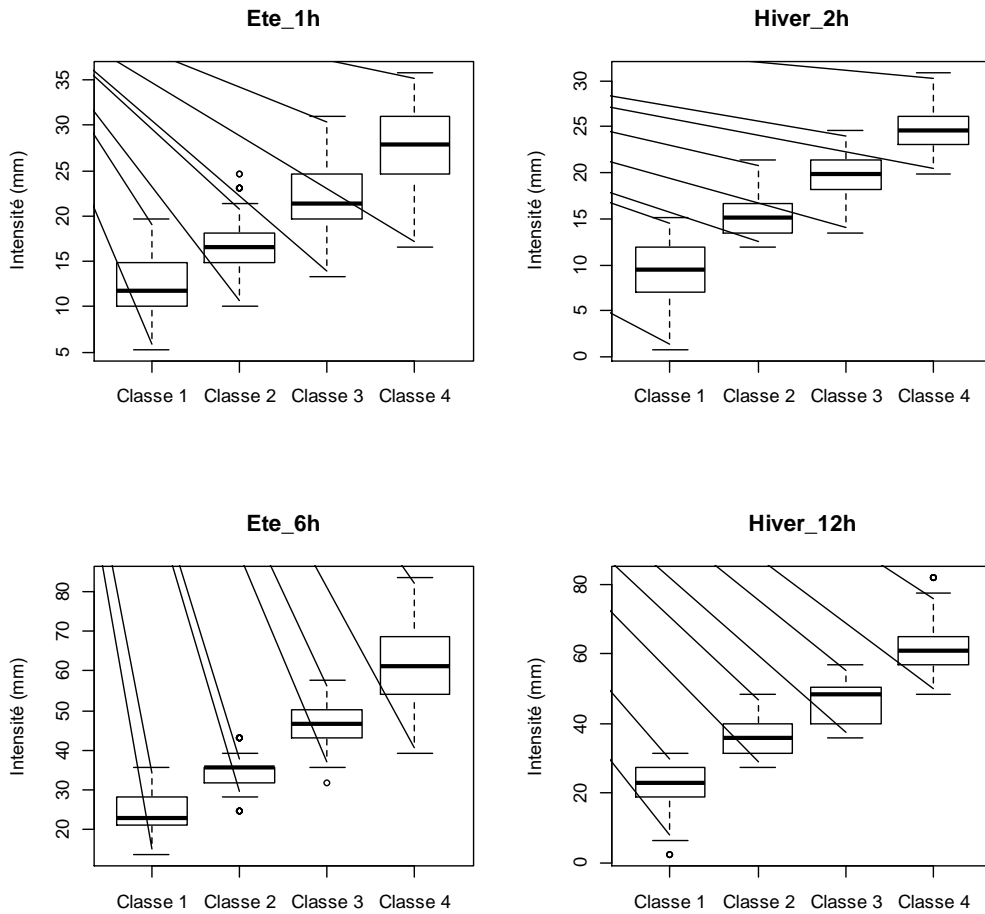


Figure 16 : Discrimination entre les classes climatiques pour les quatre types d'épisode étudiés

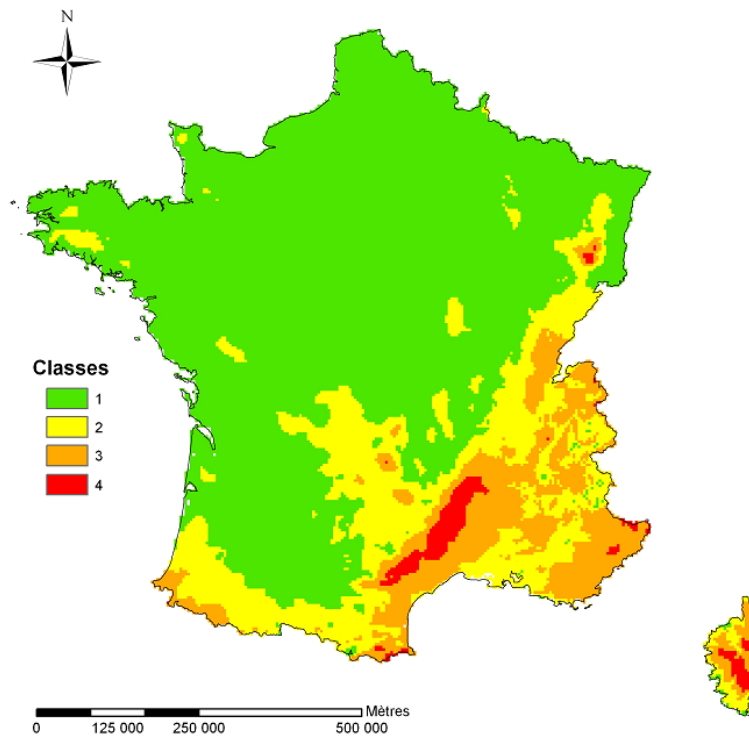


Figure 17 : Première cartographie des quatre classes climatiques obtenues suite à la classification ascendante hiérarchique

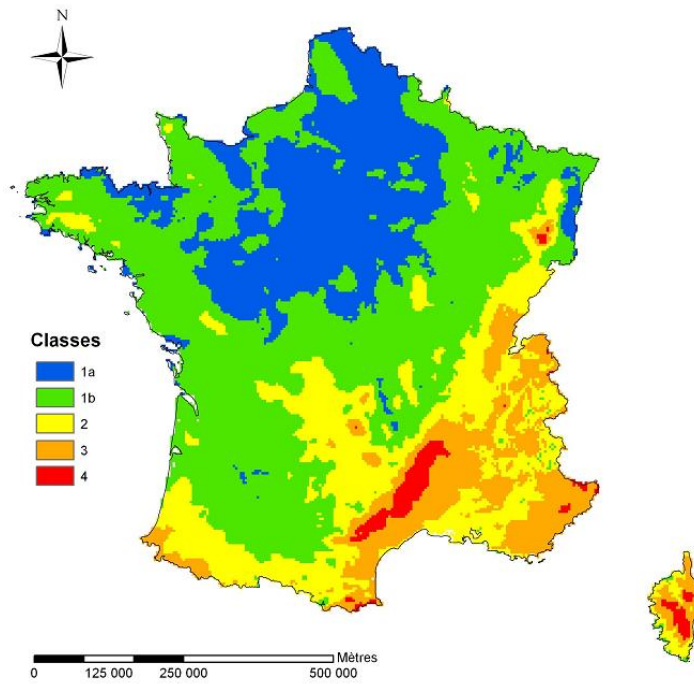


Figure 18 : Cartographie finale des cinq classes climatiques obtenues suite à la classification ascendante hiérarchique expertisée

Analyse des structures temporelles de pluies

Données mobilisées

Le protocole d'analyse a été appliqué sur quatre postes pluviométriques répartis dans les quatre zones climatiques présentées précédemment et disposant d'observations à pas de temps fin (pas de temps variable agrégé au pas de temps 5 minutes) sur au moins 15 années de manière à obtenir des résultats suffisamment stables du point de vue statistique. Ces postes sont jugés représentatifs de chaque zone climatique. L'analyse pourrait gagner en robustesse et en représentativité en élargissant la procédure à d'autres pluviomètres situés dans une même zone.

Les données mobilisées sont présentées dans le tableau suivant :

Zone	Dénomination du site	Coordonnées (Lambert II étendu)	Période d'observation utilisée	Sources et références
1a	Orgeval (77) (Station « BOISSY-P28 - BOISSY_P28 »)	X = 657 500 Y = 2426 500	1994 - 2015	http://data.datacite.org/10.17180/OBS.ORACLE http://gisoracle.irstea.fr/
1b	Bourville (76)	X = 490 500 Y = 2534 500	1995 - 2015	Richet J-B., Ouvry J-F (2013). Programme PESTICEROS I – Observatoire des transferts de pesticides dans les eaux de ruissellement du bassin versant érosif de Bourville (76). Rapport AREAS, 328 pp.
2	Yzeron (69) (Station « 69154011 - Pluviomètre Pollionnay »)	X = 785 500 Y = 2086 500	1997 - 2015	Lagouy, M.; Branger, F.; Thollet, F.; Breil, P.; Dramais, G.; (2015): Suivi hydrologique du bassin versant périurbain de l'Yzeron; Irstea. http://dx.doi.org/10.17180/OBS.YZERON
3 (4)	Roujan (34) (Station pluviographique ROG3)	X = 677 500 Y = 1834 500	1992 - 2015	OMERE observatory (http://www.obs-omere.org) - funded by french institutes INRA and IRD and coordinated by INAT Tuis, INGRES Tunis, UMR Hydrosociétés Montpellier and UMR LISAH Montpellier.

Les quantiles issus de la base de données SHYREG pour les quatre types d'épisodes pluvieux considérés associés à chacun des quatre postes pluviométriques sont présentés dans le tableau suivant :

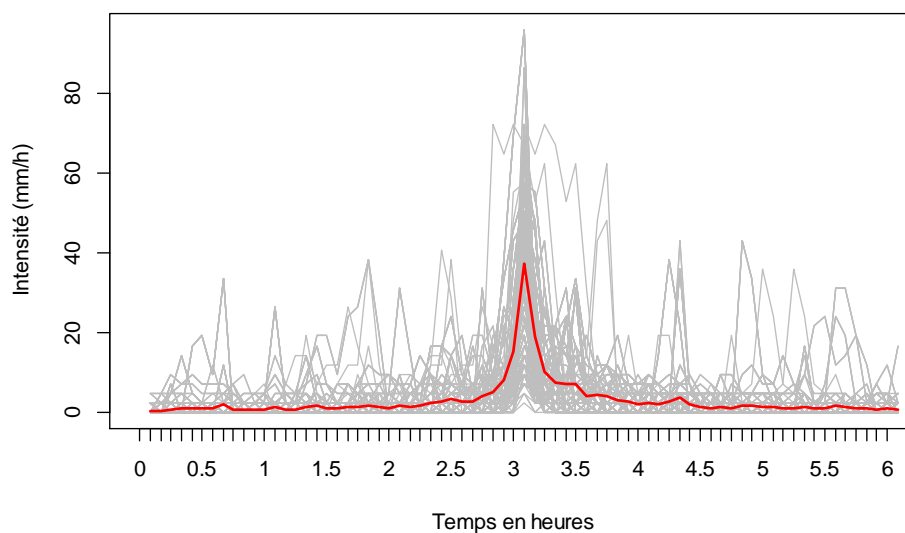
Zone	Dénomination du site	S01	S06	W02	W12
1a	Orgeval (77)	10.1	21.1	8.7	18.9
1b	Bourville (76)	11.7	24.7	8.7	23.1

2	Yzeron (69)	18.1	35.7	11.9	32.6
3 (4)	Roujan (34)	23	46.7	18.2	48.4

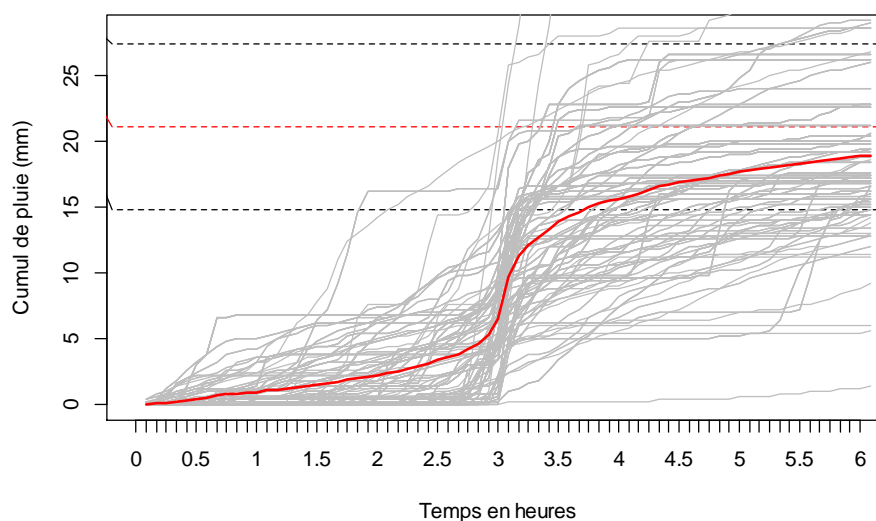
Extraction des hyétogrammes empiriques

Le protocole d'analyse consiste à extraire l'ensemble des épisodes de durée D et de cumul I pour la saison considérée (été ou hiver) observés dans les chroniques pluviométriques à pas de temps fin (cumuls sur 5 minutes). Afin d'obtenir un échantillon suffisamment large et statistiquement exploitable, une tolérance de 30% autour de la valeur de cumul I est adoptée. Les épisodes sélectionnés sont ensuite recentrés sur la valeur maximale observée à pas de temps fin (pic d'intensité) puis superposés⁶. Une moyenne est ensuite calculée pour obtenir la structure d'un épisode type (en intensité et en cumul sur la durée D), en s'assurant que le cumul obtenu s'éloigne peu de la valeur I. Un exemple de résultat obtenu selon ce protocole est présenté ci-dessous.

Saison = S - Durée = 6h - Intensité = 21.1mm



Saison = S - Durée = 6h - Intensité = 21.1mm



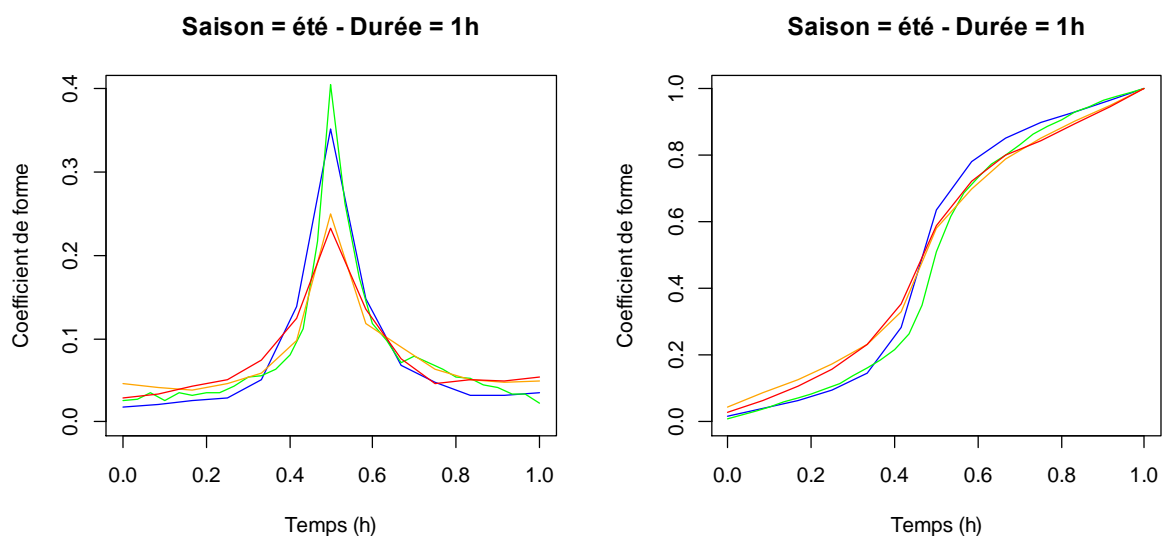
⁶ On note qu'il est fréquent d'inclure des « épisodes parasites » avant ou après le pic d'intensité.

Figure 19 : Exemple de hyétogramme empirique moyen (en rouge) obtenu après extraction de tous les épisodes d'intensité $I = 21.1\text{mm}$ observés sur $D = 6\text{h}$ pour l'Yzeron (exprimé en intensité en haut et sous la forme de cumul de pluie depuis le début de l'épisode en bas)

Quel que soit le site, l'analyse des hyétogrammes empiriques obtenus aux quatre postes pluviométriques montre que :

- La répartition des pluies dans le temps est généralement dissymétrique par rapport au pic avec une montée plus brutale que la descente. Cette dissymétrie est plus marquée pour les épisodes hivernaux. Elle n'était pas restituée avec les modèles de hyétogrammes utilisés par défaut jusqu'à présent.
- À durée égale, les épisodes estivaux présentent des pics d'intensité relative plus forts que les épisodes hivernaux. La pluie est donc « mieux répartie » sur la durée D durant les épisodes hivernaux. La différence entre les deux saisons s'avère toutefois nettement moins prononcée qu'attendu.
- De même, les pics d'intensité relative diminuent lorsque la durée de l'épisode augmente. Dans tous les cas, la forme de pic reste marquée quelle que soit la durée, invalidant ainsi le modèle de hyétogramme « Intermédiaire » utilisé par défaut jusqu'à présent pour les épisodes « longs ».

La comparaison entre sites montre que les différences liées à la zone géographique s'avèrent relativement mineures (mêmes ordres de grandeur)⁷ par rapport aux différences entre saisons ou durées d'épisode. Contre toute attente, les épisodes pluvieux observés sur le bassin de Bourville (climat océanique) et de l'Orgeval (climat océanique dégradé) présentent les pics d'intensité les plus forts sur au moins trois des types d'épisode ; les bassins de Roujan (climat méditerranéen) et de l'Yzeron (climat continental et semi-montagnard) s'avèrent relativement similaires avec des pics d'intensité plus faibles.



⁷ Attention, les coefficients étant adimensionnels, ils masquent les différences d'intensité et de cumul sur la durée D

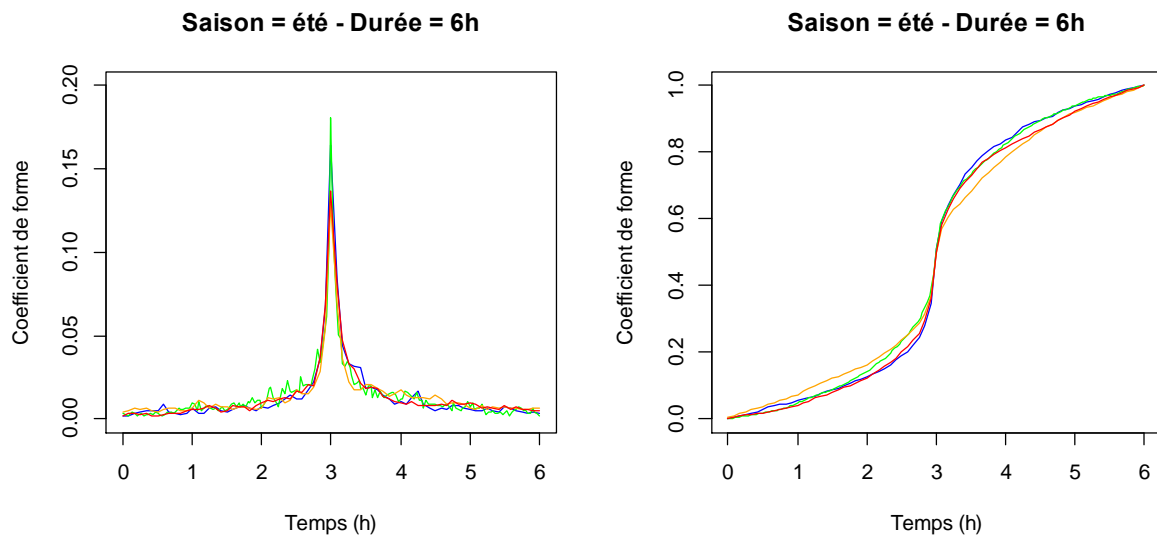


Figure 20 : Hyétogrammes empiriques bruts et cumulés obtenus pour Roujan (rouge), l'Yzeron (orange), Bourville (vert) et l'Orgeval (bleu) pour les épisodes S01 et S06

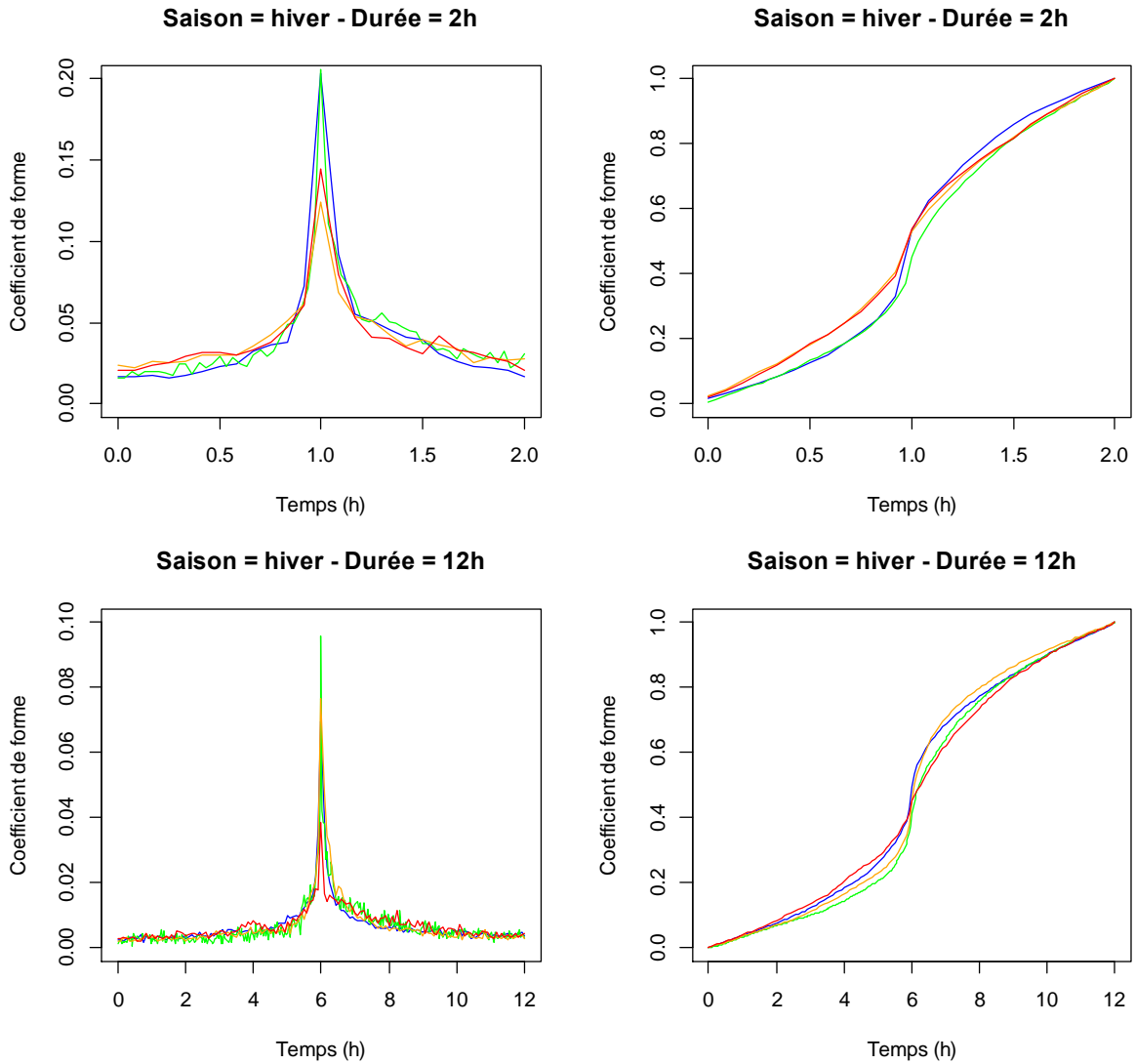


Figure 21 : Hyétogrammes empiriques bruts et cumulés obtenus pour Roujan (rouge), l'Yzeron (orange), Bourville (vert) et l'Orgeval (bleu) pour les épisodes W02 et W12

Ajustement de modèles de hyétogrammes

A partir des résultats obtenus pour chaque type d'épisode (S01, S06, W02 et W12), un modèle paramétrique est ajusté sur les observations de manière à définir un hyétogramme théorique continu et dérivable en tout point.

Le modèle employé est dérivé de l'équation de Haan *et al.* (1994)⁸, traditionnellement utilisée pour décrire la forme d'épisodes pluvieux de durée 24 heures aux États-Unis et réadapté par la suite pour différentes durées et d'autres contextes climatiques. Le modèle comporte sept paramètres (notés a à g), ajustés sur les cumuls de pluie adimensionnalisés (i.e. divisé par le cumul total sur l'épisode) en fonction du temps t^* ⁹ :

$$C(t^*) = a + \frac{t^* - b}{c} \cdot \left(\frac{d}{e \cdot |t^* - b| + f} \right)^g \quad (\text{eq. 1})$$

⁸ Haan, C.T., B. J. Barfield, and J. C. Hayes. 1994. Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press. New York

⁹ Un changement de variable est réalisé pour revenir au cas d'un ajustement sur 24 heures ($t/D \cdot 24$)

Un exemple d'ajustement réalisé sur les hyétogrammes empiriques obtenus sur le bassin de l'Yzeron pour les quatre types d'épisodes est présenté ci-dessous. Le résultat, sans être parfait, s'avère globalement satisfaisant (résidus très faibles). Le pic est parfois mal reproduit (par exemple sous-estimé de 15% dans le cas de l'épisode S06 ci-dessous) ou légèrement décalé dans le temps en raison de la très forte sensibilité du résultat à l'ajustement de la pente locale au point d'inflexion de la courbe cumulée. Le reste de l'épisode est généralement bien restitué.

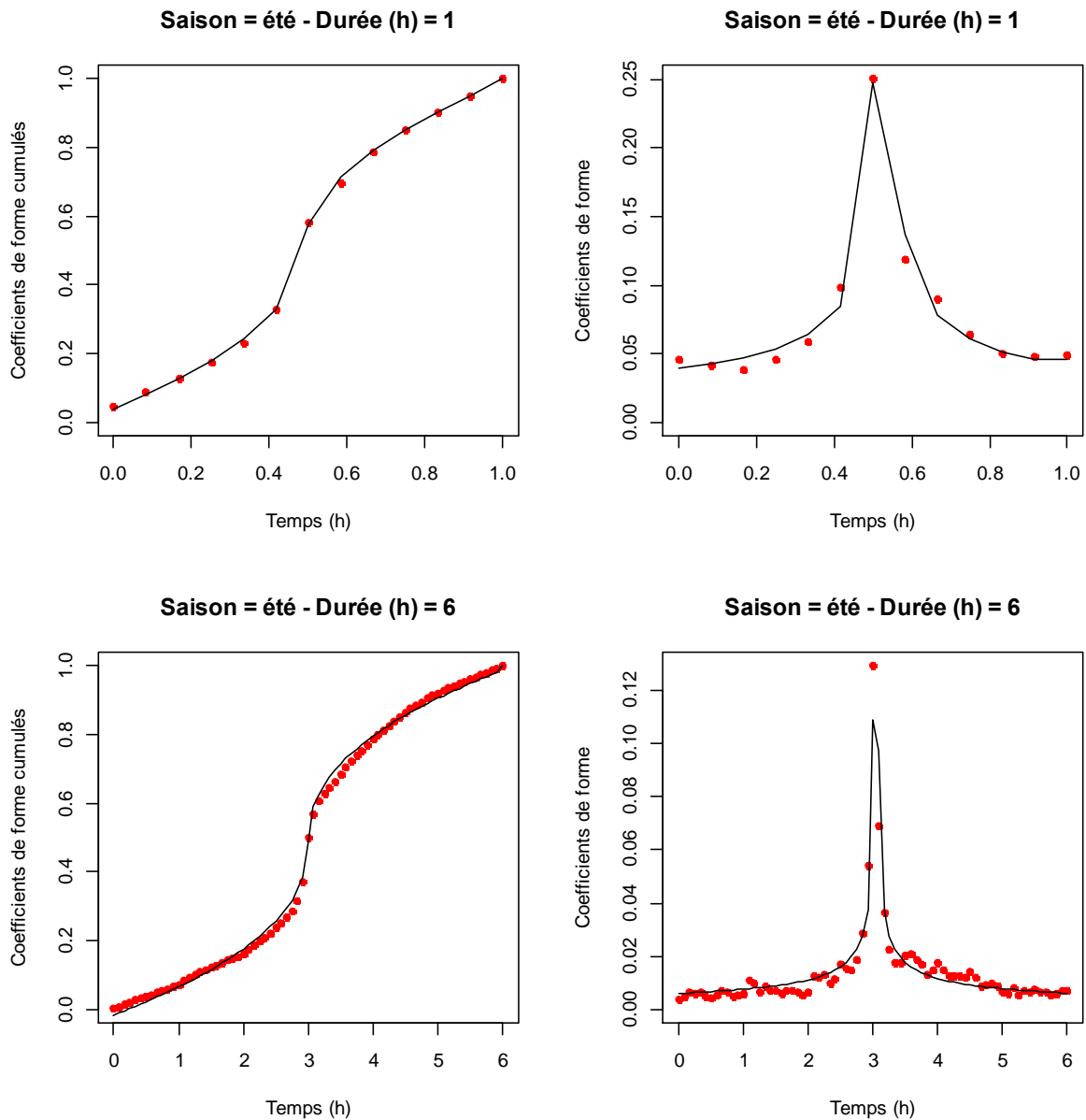


Figure 22 : Hyétogrammes empiriques (points rouges) et ajustés (trait plein) pour les épisodes S01 et S06 sur le bassin de l'Yzeron

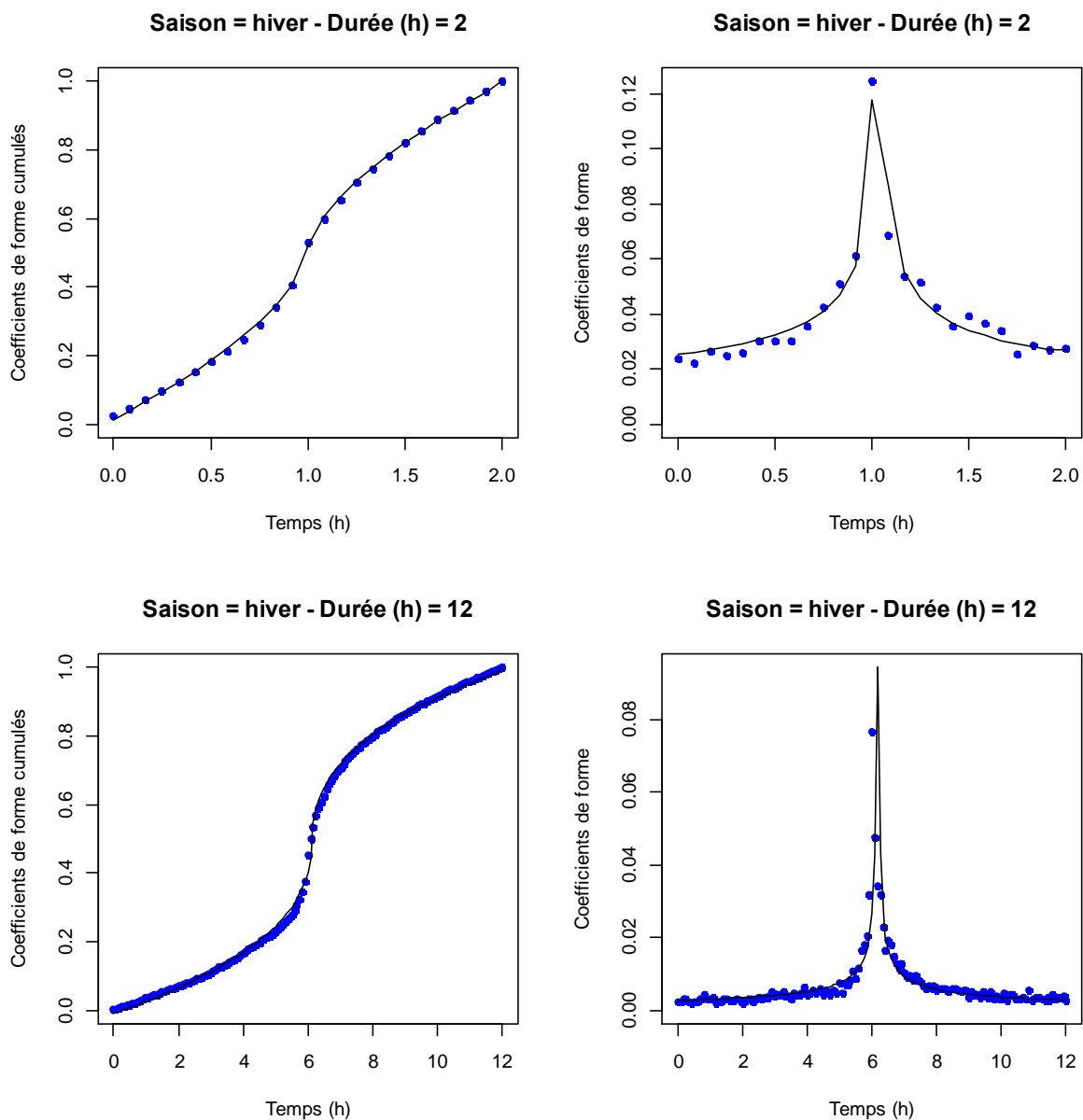


Figure 23 : Hyétogrammes empiriques (points rouges) et ajustés (trait plein) pour les épisodes W02 et W12 sur le bassin de l'Yzeron

Résultats : paramètres pour la reconstitution des hyétogrammes

Sont fournis dans les tableaux suivants les sept paramètres du modèle de hyétogramme ajusté sur les observations des quatre postes pluviométriques pour chaque type d'épisode pour permettre la reconstitution des hyétogrammes théoriques correspondants (à l'aide de l'équation 1).

Zone 1a (Orgeval)							
	a	b	c	d	e	f	g
S01	0.4963	13.6163	0.9493	10.5942	130.0004	0.5476	0.6475
S06	0.4881	12.3288	0.8345	10.5992	129.9924	1.644	0.671
W02	0.4915	12.9587	1.6901	10.5392	130.0049	0.5374	0.5315
W12	0.4844	12.1652	1.7678	10.5346	130.0053	0.5531	0.5222

Zone 1b (Bourville)							
	a	b	c	d	e	f	g
S01	0.4926	12.7915	1.3469	10.5667	130.0008	0.8848	0.5742
S06	0.4909	12.1318	0.981	10.5896	128.7961	18.367	0.6348
W02	0.4952	12.9911	2.4662	10.4709	128.7518	18.3535	0.4544
W12	0.4866	12.6337	1.5135	10.5544	129.7655	7.8973	0.5518

Zone 2 (Yzeron)							
	a	b	c	d	e	f	g
S01	0.5086	13.7491	2.1179	10.5034	130.0078	0.5396	0.4949
S06	0.4853	12.3312	1.456	10.5574	130.0035	0.5362	0.5604
W02	0.5012	12.9204	3.8119	10.3097	130.0233	0.5637	0.3703
W12	0.4941	12.4174	1.2487	10.5723	129.8343	8.1688	0.5917

Zone 3 (Roujan)							
	a	b	c	d	e	f	g
S01	0.4913	13.3178	2.2154	10.493	130.0086	0.5528	0.481
S06	0.4781	12.3294	0.9861	10.5912	130.0006	0.5654	0.6368
W02	0.501	12.8843	3.3437	10.3694	130.0186	0.5519	0.3965
W12	0.5081	12.8933	2.9439	10.4226	129.7706	7.9956	0.4144

Annexe II : Construction d'un hydrogramme de ruissellement à l'aide de la méthode SCS-CN

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)**.

Le Curve Number dépend de la classe hydrologique du sol, de la couverture du sol, des conditions hydrologiques et des conditions d'humidité initiales. À 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 et al. (1988) :

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

Construction du hyétogramme de pluie nette :

Pour un événement pluvieux donné, la pluie nette est calculée pour chaque pas de temps du hyétogramme à l'aide de l'équation suivante :

$$Q_t = \frac{(P_t - Ia)^2}{(P_t - Ia) + S} \quad \text{si } P_t > Ia$$

Et $Q_t = 0$ si $P_t \leq Ia$

Où Q (mm) est la pluie nette à chaque pas de temps, P (mm) est la pluie à chaque pas de temps, Ia (mm) sont les pertes initiales et S (mm) est la rétention du sol.

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

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

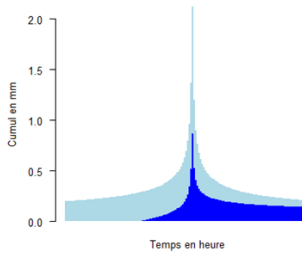
$$Ia = 0.2 * S$$

Où S (mm) est la rétention du sol, CN est le Curve Number et Ia sont les pertes initiales.

Construction de l'hydrogramme de ruissellement :

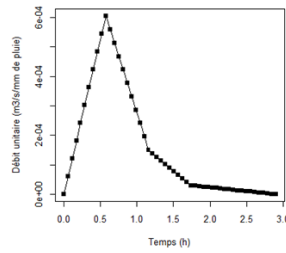
Dans la méthode SCS-CN, l'hydrogramme de ruissellement est obtenu par convolution entre les pluies nettes et un hydrogramme unitaire théorique déduit des caractéristiques du versant étudié. Ce dernier correspond à l'hydrogramme de ruissellement résultant d'une pluie nette unitaire de 1mm.

Hyetogramme de pluie brute (bleu clair) et de pluie nette (bleu foncé)



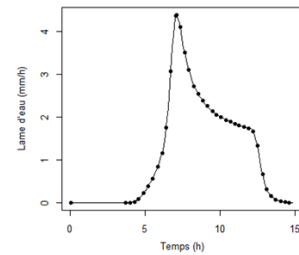
X

Hydrogramme unitaire



=

Hydrogramme de ruissellement résultant



L'hydrogramme unitaire est obtenu à partir de trois grandeurs caractéristiques définies ci-dessous :

Le **temps de retard** du bassin versant

$$L = \frac{\left(\frac{l}{0,3048}\right)^{0,8} * \left(\frac{S}{25,4} + 1\right)^{0,7}}{1900 * Y^{0,5}}$$

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

Le **temps de pointe** de l'hydrogramme unitaire

$$Tp = \left(\frac{\Delta D}{2}\right) + L$$

Où Tp (h) est le temps de pointe, ΔD (h) est la durée de l'averse élémentaire et L (h) est le temps de retard du bassin versant.

Le **débit de pointe** de l'hydrogramme unitaire

$$Qp = \frac{0,208 * A}{Tp}$$

Où A (km²) est la surface drainée et Tp (h) est le temps de pointe.

Annexe III : Aide-mémoire sur les paramètres à renseigner

Le tableau ci-dessous récapitule les paramètres nécessaires à la chaîne d'outil de dimensionnement : leur appellation, leur définition, leur unité et la plage de valeur admise.

Nom du paramètre	Définition	Unité	Plage de valeurs admise
X_coord	Coordonnées X (longitude) du site d'étude (Lambert II étendu)	m	30000 - 1207000
Y_coord	Coordonnées Y (latitude) du site d'étude (Lambert II étendu)	m	1604000 - 2685000
Episode	Type d'épisode pluvieux simulé	--	S01 = Épisode estival de courte durée (1 heure) S06 = Épisode estival de durée modérée (6 heures) W02 = Épisode hivernal de courte durée (2 heures) W12 = Épisode hivernal de durée modérée (12 heures)
Slope_CA	Pente moyenne de la surface contributive	%	0.1 - 20
Length_CA	Longueur de pente de la surface contributive	m	30 - 100
IM	Conditions d'humidité initiale du sol de la surface contributive	__	1 = Condition sèche 2 = Conditions d'humidité moyenne 3 = Conditions Humides
Width_VFS	Longueur de linéaire de bande tampon	m	5 - 100
Slope_VFS	Pente de la bande tampon	%	0.1 - 20
WTD_VFS	Profondeur de nappe sous la bande tampon	cm	1 - 400
roots_depth	Profondeur de l'horizon racinaire	cm	1 - 100
Ksat_roots	Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon racinaire	mm/h	1 - 500
Ksat_soil	Conductivité hydraulique à saturation de l'horizon non racinaire (horizon le moins	mm/h	1 - 200

	perméable sur la tranche de sol 0-100cm)		
Theta_S	Teneur en eau à saturation du profil de sol	%	0 - 100
Theta_R	Teneur en eau résiduelle du profil de sol	%	0 - 100 et < Theta_S
alpha_VG	Paramètre alpha de Van Genuchten	1/m	
n_VG	Paramètre n de Van Genuchten	--	

Irstea

1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex

01 40 96 61 21

www.irstea.fr

Agence Française pour la Biodiversité

Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.afbiodiversite.fr