

Communauté française de Belgique

**FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE
GEMBLoux**

**Comparaison par modélisation de la production de
ruissellement de toitures stockantes (toitures
végétalisées et toiture bac)**

Travail de fin d'études
Année académique 2006-2007

Présenté par : Eléonore Beckers

Promoteurs : Prof. S. Dautrebande
Dr. Ir. A. Degré

En vue de l'obtention du grade : Bioingénieur en Génie rural et environnemental

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de la Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux.

Le présent document n'engage que son auteur.

Communauté française de Belgique

**FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE
GEMBLoux**

**Comparaison par modélisation de la production de
ruissellement de toitures stockantes (toitures
végétalisées et toiture bac)**

Travail de fin d'études
Année académique 2006-2007

Présenté par : Eléonore Beckers

Promoteurs : Prof. S. Dautrebande
Dr. Ir. A. Degré

En vue de l'obtention du grade : Bioingénieur en Génie rural et environnemental

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mes promotrices, Prof. Mme S. Dautrebande et Dr. Ir. Mme A. Degré, pour leur encadrement de qualité et leurs précieux conseils.

Pour leurs informations utiles et leur disponibilité, je remercie Mr. Dutron, architecte chez Delhaize, Mr. Flamant de chez Eijkelkamp ainsi que Ir. Lievens de chez Tecmat qui m'a fourni des échantillons pour mes mesures.

Je remercie aussi Ir. O. Debauche et tout le personnel de l'Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique agricole.

Mes remerciements vont également à tous les professeurs et assistants de la faculté qui ont participé à ma formation.

Enfin, je remercie mes parents et mes proches, qui ont été présents et m'ont soutenue tout au long de mes études.

Résumé

L'imperméabilisation dans les zones urbaines et péri-urbaines implique une gestion de plus en plus complexe de l'évacuation des eaux de pluie. Restreindre la quantité des eaux pluviales évacuées par le réseau d'égouttage ou en déconnecter les eaux de toiture permet de soulager ce dernier. L'objet du présent travail est de présenter une première tentative de modélisation, par une approche physiquement basée, quant au fonctionnement hydrologique des toitures stockantes (toitures végétalisées et toiture bac). Leur comportement basé sur de longues périodes de conditions météorologiques de nos régions (1989-1995) a été testé et leurs réponses à la pluie ont été analysées et comparées quant à leurs effets respectifs sur la diminution et l'étalement dans le temps des flux de ruissellement.

Les résultats obtenus nous indiquent que la toiture bac réunirait les conditions permettant la réduction et l'étalement dans le temps du débit de ruissellement. Les toitures végétalisées permettent la diminution du volume d'écoulement mais elles présenteraient un intérêt moindre dans la lutte contre les inondations. Cependant, elles présentent différents avantages : paysagers, thermiques, écologiques (maintien de la biodiversité, maillage écologique, effet sur l'îlot de chaleur urbain, isolation thermique et acoustique).

Sous réserve d'études complémentaires (régulation hydraulique des débits de sortie et propriétés du substrat), lors d'averses intenses, la toiture bac présenterait un intérêt certain dans la prévention des inondations. Les toitures vertes sont moins performantes, mais il existe un réel intérêt à développer leurs propriétés de rétention (effet sur l'évaporation), ces toitures conciliant alors des intérêts au niveau de la gestion des pluies, de l'énergie et de la nature.

Abstract

Rainwater runoff management is becoming extremely complex as the result of the increasingly impervious nature of urban and suburban surfaces. Urbanisation can indeed lead to high volumes of surface water runoff. This undesirable effect could be reduced by disconnecting roofs from the sewer system. This study represents a first attempt to establish a model concerning green roofs and flat roof storage systems based on a physical approach method. The aim is to deduce their respective effect on water runoff management by analysing and comparing their performance based on a long period of meteorological conditions data (1989-1995).

Results show that the flat roof system could reduce peaks flow and distribute over a long time period runoff quantity. On the other hand, the green roof system more effectively reduces the volume of runoff and delay the initial time of runoff, but peak flow reduction is less efficient. However, they present other benefits such as urban heat island reduction, energy efficiency gain, thermic and acoustic insulation, or biodiversity preservation.

Subject to further studies, the flat roof method could be a great tool for flood prevention. The green roof method is less efficient in this instance, but could be more effective if its storage capacity was enhanced, thus making it interesting in terms of energy, nature and rainwater management.

Table des matières

1.	Introduction	60
2.	Matériel	5
2.1.	Types de toitures.....	5
2.1.1.	Toitures vertes.....	5
2.1.2.	Toiture bac.....	14
2.2.	Interfaces de modélisation.....	18
2.2.1.	ModelMaker 4.0.....	18
2.2.2.	Microsoft Visual studio 2005	19
3.	Modélisation.....	20
3.1.	Paramètres des bilans hydrologiques	20
3.1.1.	Les précipitations et l'arrosage.....	22
3.1.2.	L'évaporation et l'évapotranspiration potentielles, maximales et réelles	22
3.1.3.	L'interception.....	28
3.1.4.	L'infiltration	28
3.1.5.	Le ruissellement	28
3.1.6.	Le débit de fuite des toitures bacs.....	28
3.1.7.	Les paramètres physiques.....	28
3.1.8.	Les paramètres géométriques	32
3.2.	Développement des modèles hydrologiques	33
3.2.1.	Choix de l'interface de modélisation	33
3.2.2.	Présentation des modèles hydrologiques.....	34
4.	Simulations hydrologiques et discussion	45
4.1.	Simulations	45
4.2.	Résultats	46
4.2.1.	Le bilan hydrologique	46
4.2.2.	La réduction des pics.....	48
4.2.3.	Indicateurs divers	50
4.2.4.	Analyse graphique.....	50
4.3.	Comparaison.....	57
4.4.	Conclusion.....	60
5.	Premier test de validation des modèles.....	62
6.	Perspectives	63
6.1.	Perfectionnements du modèle.....	63
6.2.	Améliorations physiques des toitures vertes	63
6.3.	Perspective de validation sur site.....	64
6.4.	Répartition spatiale à l'échelle du bassin versant	67
7.	Conclusion.....	68
8.	Références bibliographiques	70
9.	Annexes.....	73
9.1.	Graphiques annuels.....	73
9.2.	Fiche technique de la sonde mini-Diver.....	77
9.3.	Calcul de l'évapotranspiration potentielle.....	78

Liste des figures

Figure 1 : Cycle de l'eau en milieu naturel.....	1
Figure 2 : Cycle de l'eau en milieu fortement imperméabilisé.....	2
Figure 3 : Augmentation du débit de pointe associée à une pluie donnée du fait de la réduction du temps de réponse.	2
Figure 4 : Les Jardins suspendus de Babylone, gravure du XVI ^e siècle (Maarten van Heemskerck)	5
Figure 5 : Toiture extensive.	6
Figure 6 : Toiture intensive.....	6
Figure 7 : Toiture semi-intensive	7
Figure 8 : Composition schématique des différents types de toitures vertes.....	8
Figure 9 : Principe d'une toiture verte en pente avec stockage d'eau.....	10
Figure 10 : Mise en place d'une toiture verte en pente, système de stockage d'eau.....	10
Figure 11 : Ecoulement cumulé en fonction du temps pour une toiture classique et une toiture verte.....	11
Figure 12 : Exemples de systèmes d'évacuation d'une toiture bac.....	15
Figure 13 : Représentation schématique d'une évacuation sur toiture stockante	16
Figure 14 : Vue des évacuations et du mur de protection d'une toiture récoltant les eaux de pluie.....	17
Figure 15 : Vue de l'étanchéité d'une toiture récoltant l'eau de pluie.	17
Figure 16 : Surélévation des appareillages.	18
Figure 17 : Représentation schématique du bilan hydrologique et des paramètres associés pour une toiture verte.	21
Figure 18 : Représentation schématique du bilan et des paramètres associés pour une toiture bac.	21
Figure 19 : Relation entre « Kc.Ks et le taux d'humidité du sol.....	26
Figure 20 : Echantillons mis à saturation.....	30
Figure 21 : Représentation schématique de l'appareil de Richards.	30
Figure 22 : Courbes de pF des 12 échantillons analysés.	31
Figure 23 : Comparaison des sorties d'une toiture verte extensive pour Excel et ModelMaker, exemple de l'année 1989.	34
Figure 24 : Interface de démarrage du programme de simulation.	35
Figure 25 : Interface utilisateur d'encodage des paramètres de la toiture verte extensive.	36
Figure 26 : Représentation schématique des étapes du modèle toiture verte extensive.	36'
Figure 27 : Représentation schématique des étapes du modèle toiture verte semi-intensive.	39'
Figure 28 : Interface utilisateur d'encodage des paramètres de la toiture verte semi-intensive.	40
Figure 29 : Interface utilisateur d'encodage des paramètres de la toiture intensive.	42
Figure 30 : Interface utilisateur d'encodage des paramètres de la toiture bac.	42
Figure 31 : Représentation schématique des étapes du modèle toiture bac.....	42'
Figure 32 : Ecoulements dus à l'arrosage excessif des toitures à végétation intensive.	47
Figure 33 : Représentation des droites de Gumbel pour chaque toiture.....	48'
Figure 34 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte extensive (mai 1995).....	51
Figure 35 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte semi-intensive (mai 1995).....	51
Figure 36 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte intensive (mai 1995).	52

Figure 37 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture bac (mai 1995).....	52
Figure 38 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte extensive (juin 1989).....	53
Figure 39 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte semi-intensive (juin 1989).....	53
Figure 40 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte intensive (juin 1989).....	54
Figure 41 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture bac (juin 1989).	54
Figure 42 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte extensive (octobre 1993).....	55
Figure 43 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte semi-intensive (octobre 1993).....	55
Figure 44 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte intensive (octobre 1993).....	56
Figure 45 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture bac (octobre 1993).....	56
Figure 46 : Comparaison des sorties cumulées pour tous les modèles (mai 1995).....	58
Figure 47 : Comparaison des sorties cumulées pour tous les modèles (juin 1989).	59
Figure 48 : Ruissellement observé sur une toiture verte extensive à Sheffield, UK [Stovin et Dunett, 2007] et ruissellement obtenu par modélisation de la même toiture.	62
Figure 49 : Aperçu des différentes zones de végétalisation	65
Figure 50 : Aperçu des différentes zones de végétalisation.....	65
Figure 51 : Evacuation d'une zone de toiture.	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques techniques des trois types de toitures vertes.	8
Tableau 2 : Répartition horaire de l'évapotranspiration journalière [Fortin, 2001].....	24
Tableau 3 : Teneur en eau volumétrique et moyenne des différents échantillons.	31
Tableau 4 : Valeurs des paramètres de la toiture verte extensive.	45
Tableau 5 : Valeurs des paramètres de la toiture verte semi-intensive.	45
Tableau 6 : Valeurs des paramètres de la toiture verte intensive.	46
Tableau 7 : Valeurs des paramètres de la toiture bac.	46
Tableau 8 : Bilan hydrologique annuel moyen sur 7 ans (1989-95) pour chaque toiture.	46
Tableau 9 : Moyennes annuelles des termes du bilan hydrologique des toitures à végétation intensive en fonction de l'arrosage.	47
Tableau 10 : Réduction des pics pour la toiture verte extensive.....	48
Tableau 11 : Réduction des pics pour la toiture verte semi-intensive.....	48
Tableau 12 : Réduction des pics pour la toiture verte intensive.	49
Tableau 13 : Réduction des pics pour la toiture bac.....	49
Tableau 14 : Indicateurs divers relatifs aux modèles testés.....	50
Tableau 15 : Caractéristiques des événements pluvieux analysés.	50
Tableau 16 : Moyenne sur 7 ans pour l'écoulement annuel et sur 10 débits pour la réduction des pics.	57
Tableau 17 : Comparaison des moyennes annuelles des termes du bilan hydrologique entre une toiture verte semi-intensive de 25 cm d'épaisseur et une toiture verte extensive de 5 cm d'épaisseur.....	61
Tableau 18 : Comparaison des moyennes annuelles des termes du bilan hydrologique entre une toiture verte semi-intensive de 25 cm d'épaisseur et une toiture verte extensive de 10 cm d'épaisseur.....	61
Tableau 19 : Caractéristiques de la toiture verte extensive à Sheffield, UK.	62
Tableau 20 : Coûts succincts de l'appareillage nécessaire à des mesures sur site de la sortie d'une toiture verte.	67

1. Introduction

Les difficultés croissantes de gestion de l'écoulement des eaux pluviales en zones urbaines et les inondations qui y sont liées poussent la réflexion vers des techniques alternatives de gestion du ruissellement compatibles avec les contraintes de zones densément occupées. Le stockage par les toitures s'inscrit parmi les alternatives à la collecte traditionnelle des eaux de pluie dans les réseaux d'égouttage.

Restreindre la quantité des eaux pluviales évacuées par le réseau d'égouttage ou en déconnecter les eaux de toiture vise le soulagement du réseau, la limitation des débordements mais concerne aussi les rejets directs au cours d'eau par temps de pluie via les déversoirs d'orage. On vise donc autant la réduction des flux que la limitation de la pollution directe des milieux naturels.

Urbanisation croissante des bassins versants

Le système de collecte et d'évacuation des eaux usées a évolué au cours des siècles, vers un système souterrain efficace. En effet, pour des raisons d'hygiène principalement, le but de ces réseaux était d'évacuer l'eau le plus rapidement possible. Le branchement au réseau des particuliers est devenu petit à petit obligatoire. L'installation d'un tel réseau et l'urbanisation ont conduit à l'imperméabilisation croissante des surfaces et à l'artificialisation des rivières urbaines. Tout ceci entraîne une perturbation du cycle de l'eau [Valla et al., 2005].

- Modification du cycle hydrologique

La figure 1 montre le cycle de l'eau naturel comprenant le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation de l'eau de pluie dans un site donné. La figure 2 représente les variations des flux naturels suite à l'urbanisation de ce site.

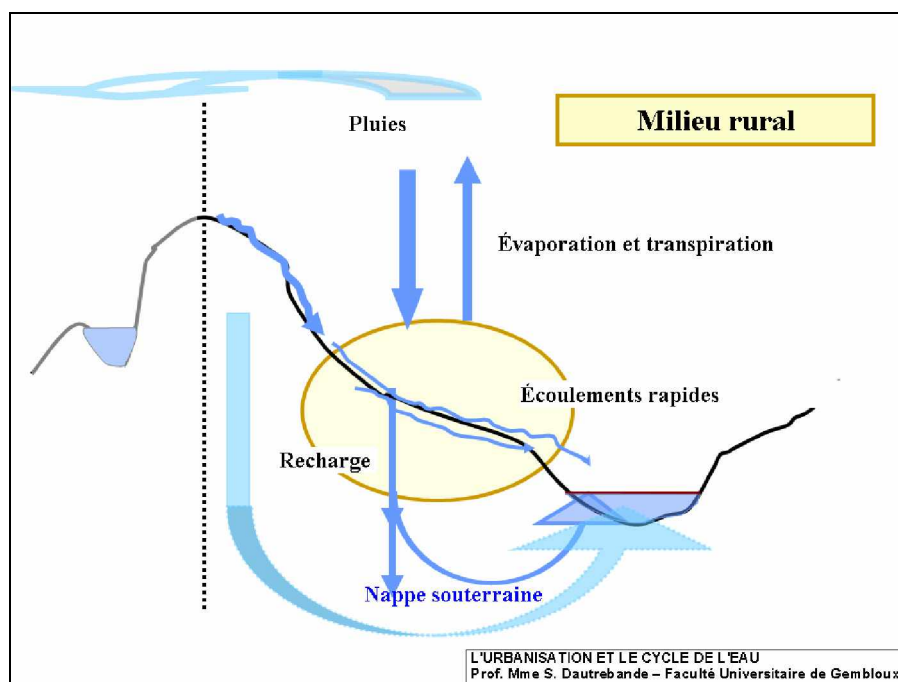


Figure 1 : Cycle de l'eau en milieu naturel [Source : Dautrebande, 2001].

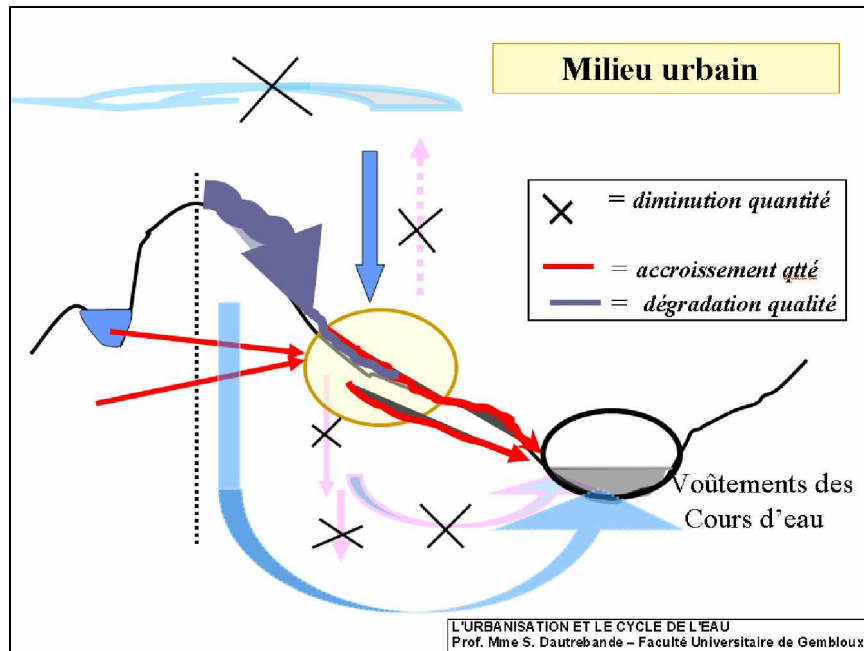


Figure 2 : Cycle de l'eau en milieu fortement imperméabilisé [Source : Dautrebande, 2001].

On voit que l'infiltration de l'eau diminue fortement. De là, la recharge des nappes diminue et l'apport des eaux souterraines au débit de base des cours d'eau diminue également. A contrario, le ruissellement de surface augmente, provoquant des augmentations rapides et importantes des débits, sans oublier les risques de saturation du réseau de collecte évoqués plus haut. Dans le même temps, la diminution de l'évapotranspiration limite le retour vers l'atmosphère de l'eau précipitée, ce qui intensifie les phénomènes décrits ci-dessus.

- Modification du temps de réponse

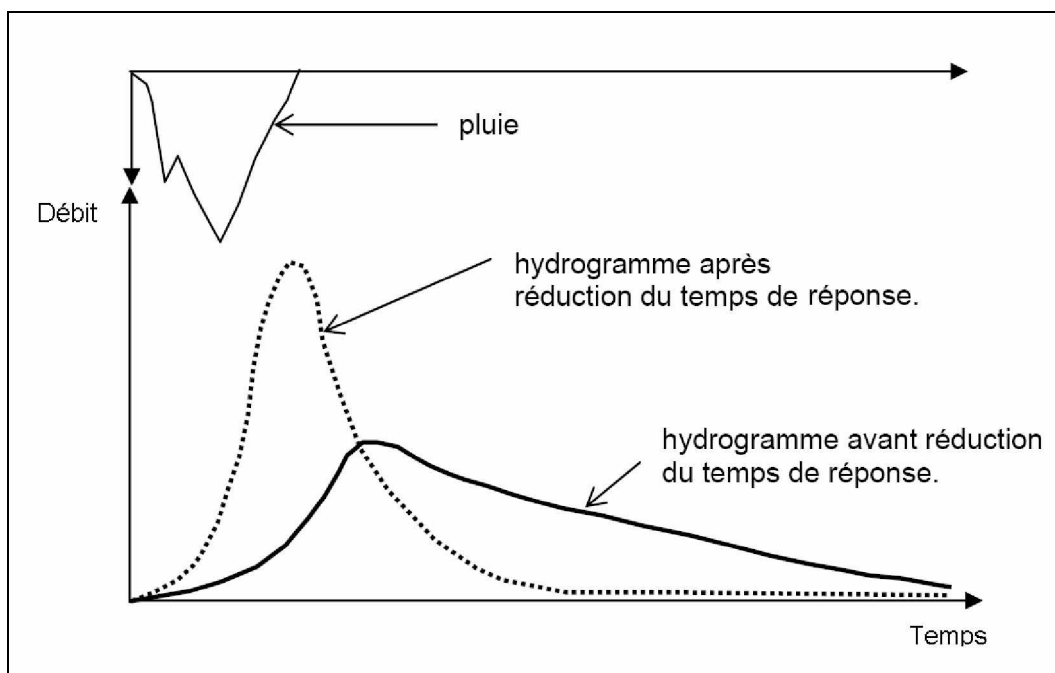


Figure 3 : Augmentation du débit de pointe associée à une pluie donnée du fait de la réduction du temps de réponse [Source : Valla et al., 2005].

Le temps de réponse est l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue ou du centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface (cf. figure 3). Il est diminué par la modification du linéaire d'écoulement, la rectitude du réseau, la faible rugosité du parcours par rapport à un réseau naturel sinueux, et par l'utilisation de pentes importantes artificiellement créées pour diminuer le diamètre des conduites.

Ces effets conjoints ont comme conséquences :

- une accélération de la réponse du bassin versant ;
 - une augmentation du débit de pointe.
-
- Modification des apports en polluants et nutriments

On peut encore noter que l'augmentation des apports en nutriments (tels que l'azote et le phosphore) et en polluants (herbicides, métaux lourds,...) est presque toujours associée à l'aménagement des sols d'un bassin versant. Ceci est notamment dû à l'augmentation du débit dans les réseaux hydrographiques qui conduit à la remobilisation des dépôts jusque là accumulés et à l'utilisation de biocides dans les matériaux de construction.

Gestion du risque inondation en zone urbaine

Actuellement, une nouvelle approche dans la prévention des inondations urbaines se développe via des techniques dites d'hydraulique douce reposant sur trois principes :

- favoriser l'infiltration en réduisant les surfaces imperméables ;
- ralentir les écoulements résiduels par l'allongement et l'augmentation de la rugosité du trajet ;
- réduire la charge polluante des écoulements par leur ralentissement. Une partie des polluants est ainsi absorbée par les végétaux.

Le stockage de l'eau de pluie et son retour vers le cycle naturel de l'eau par évaporation depuis les toitures s'inscrivent dans les techniques d'hydraulique douce. Le ralentissement de l'écoulement est dû au stockage temporaire de l'eau dans le substrat ou le bac, et la diminution du ruissellement se fait grâce à l'évaporation ou l'évapotranspiration de l'eau.

Au niveau d'une toiture végétalisée

La toiture végétalisée, ou « toiture verte », consiste en une couche de substrat d'épaisseur variable (cf. paragraphe 2.1.1.) ensemencée de végétaux, et qui vise le stockage d'une portion de l'eau de pluie dans le substrat voire dans la couche de drainage. L'eau ainsi stockée peut être utilisée par les plantes et évapotranspirée vers l'atmosphère. La réduction et le ralentissement du ruissellement par les toitures vertes interviennent à trois niveaux [Mentens et al., 2005] :

- le retard du début du ruissellement dû à l'infiltration de l'eau dans le substrat de la toiture verte ;
- une réduction du volume de ruissellement par rétention (et évapotranspiration) d'une partie de l'eau ;
- une distribution à plus long terme du ruissellement à travers un relâchement plus lent de l'eau stockée temporairement dans les pores du substrat et la couche de drainage.

Plusieurs facteurs entrent en jeu dans l'efficacité d'une toiture verte :

- le type de toiture (extensif, intensif, semi-intensif, cf. paragraphe 2.1.1.) ;
- la pente de la toiture ;
- l'épaisseur et la composition du substrat.

Au niveau d'une toiture bac

La « toiture bac », ou « toiture réservoir », consiste en un système de stockage temporaire de l'eau de pluie. Une sortie calibrée laisse passer en continu une faible quantité d'eau, tandis qu'un trop-plein permet d'évacuer rapidement le surplus éventuel [Revitt et al., 2003]. Ce système permet donc, tout comme les toitures vertes, de diminuer le ruissellement (le temps de stockage à l'air libre contribue en outre à évaporer l'eau) et de l'étaler dans le temps par un stockage temporaire. Les facteurs déterminant le fonctionnement de cette toiture sont la hauteur de stockage et le débit de fuite.

Les toitures végétalisées et les toitures bacs sont des exemples de techniques alternatives. Les réalisations concrètes commencent à se multiplier dans les pays voisins et en Belgique. Ces techniques jouissent d'une image positive tant concernant leur aspect que leur fonction. Cependant, si des études existent concernant ces toitures [Mentens et al., 2005 ; Stovin et Dunnett, 2007], aucune à notre connaissance ne propose un modèle physiquement basé ni une étude de leur effet hydrologique réel sous notre climat, particulièrement en ce qui concerne les événements pluvieux extrêmes. Nous proposons de pallier ce manque.

Objectifs du mémoire

L'objectif du présent travail est de présenter une première tentative de modélisation, par une approche physiquement basée, quant au fonctionnement hydrologique des toitures végétalisées et toiture bac, ensuite de tester leur comportement sur de longues périodes représentatives des conditions météorologiques de nos régions. Leur réponse à la pluie sera analysée et comparée quant à leurs effets respectifs sur la diminution et l'étalement dans le temps des flux pluviaux.

2. Matériel

2.1. Types de toitures

2.1.1. Toitures vertes

Le principe de la toiture verte est de recouvrir un toit de verdure. A l'origine, la végétalisation des toitures s'effectuait dans un but d'isolation des bâtiments et de protection des revêtements de toitures. On trouve, en figure 4, une illustration des jardins suspendus de Babylone.



Figure 4 : Les Jardins suspendus de Babylone, gravure du XVI^e siècle par l'artiste néerlandais Maarten van Heemskerck [Source : Wikipedia].

Actuellement, plusieurs types de toitures vertes sont référencés. Une toiture verte peut varier d'une végétation sommaire à un jardin complet.

A. Type extensif

La toiture extensive (cf. figure 5) est la plus simple. Elle est constituée d'une fine couche de substrat et couverte d'une végétation robuste nécessitant très peu d'entretien. Cependant, elle ne constitue pas un espace de récréation. C'est le procédé le moins coûteux tant au niveau de la mise en place (entre 50 et 100 EUR/m²) que de l'entretien.



Figure 5 : Toiture extensive [Source : Btech nv. sa, 2006 consulté le 10/07/06].

- Substrat : mélange de terreau minéral, de matière organique et de terre. Il contiendra jusqu'à 70% d'agrégats poreux, en volume, afin de conserver le plus d'eau possible.
- Epaisseur de 2 à 10 cm.
2 à 5 cm pour mousses et sédums
7 à 10 cm pour des plantes vivaces
- Poids entre 50 et 100 kg/m²
- Pas ou peu d'entretien
- Types de végétaux : Les plantes doivent résister aux conditions de leur environnement et pouvoir se propager seules. On a, par exemple, les lichens, mousses, sédums et plantes vivaces.

B. Type intensif

Un jardin terrasse intensif (cf. figure 6) est constitué d'une couche de substrat d'au moins 25 cm d'épaisseur et couvert d'une végétation variée. C'est un jardin combiné dans lequel on peut mélanger les zones pédestres avec les zones vertes. Il est donc comparable à un jardin classique, et peut servir d'espace récréatif.



Figure 6 : Toiture intensive [Source : Btech nv. sa, 2006 consulté le 10/07/06].

- Substrat : terre naturelle dont le volume d'agrégats est souvent réduit à 40% pour faire place à plus d'éléments nutritifs.
- L'épaisseur de la couche de substrat est adaptée en fonction des plantations mais varie souvent entre 1 et 2 mètres.
- Poids supérieur à 400 kg/m².
- Entretien important, comparable à celui d'un jardin classique.
- Types de végétaux : gazon, arbustes, arbres.

C. Type semi-intensif

Il s'agit de l'intermédiaire entre les deux types précédents. Un exemple est illustré en figure 7.

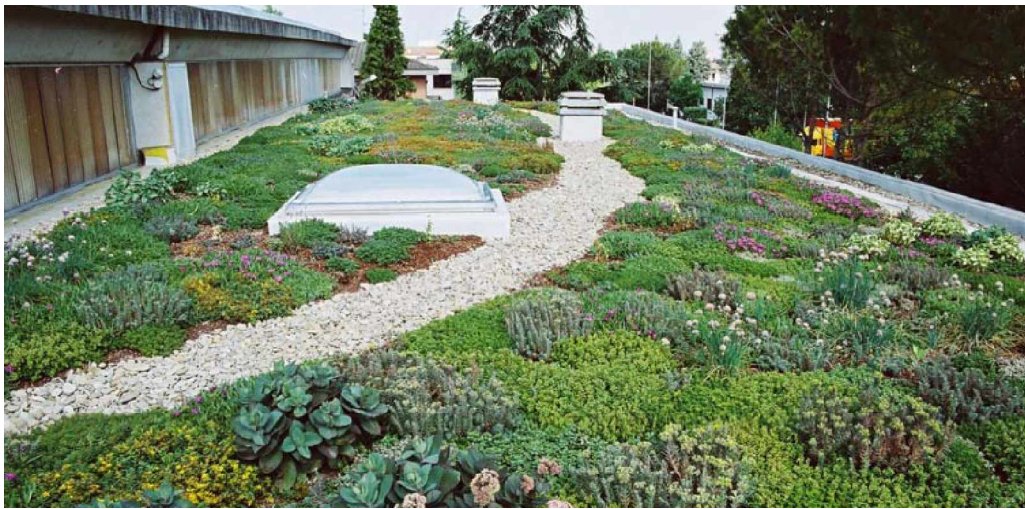


Figure 7 : Toiture semi-intensive [Source : Btech nv. sa, 2006 consulté le 10/07/06].

- Substrat : terre naturelle comprenant environ 50% d'agrégats poreux.
- Epaisseur de 10 à 25 cm.
- Poids entre 100 et 400 kg/m²
- Requier un entretien régulier (arrosage...)
- Types de végétaux : plantes à fleurs ou à feuillage, légumes et arbustes ou grimpants.

Il convient, pour les toitures de type intensif, de prévoir dans la conception du bâtiment la surcharge importante due à la toiture, ainsi que des structures particulières (accès, garde-fous...). Les toitures de type extensif, quant à elles, ne nécessitent généralement qu'une vérification de la portance du bâtiment, et peuvent donc souvent être installées sur des bâtiments déjà en place. Les contraintes techniques inhérentes à chaque toiture sont résumées au tableau 1 [CSTC¹, 2006 ; Tecmat, 2005].

¹ Centre Scientifique et Technique de la Construction

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques techniques des trois types de toitures vertes.

Caractéristiques	Végétation intensive		Végétation extensive
	Toiture-jardin	Toiture-jardin légère	Toiture végétalisée
Epaisseur (m)	> 0,25	0,1 < 0,25	< 0,1
Surcharge (kg/m ²)	> 400	100 < 400	entre 50 et 100
Installation sur un bâtiment existant	Non	Parfois	Oui
Installation sur une nouvelle construction	A prévoir	A prévoir	Oui
Accessibilité	Oui	Oui	Non
Pente usuelle	2 à 5%	2 à 50 ² %	2 à 70 ² % (selon l'orientation)
Entretien	Important	Moyen	Limité
Substrat	Minéral et organique	Minéral et organique	Dominante minérale
Plantation	Gazon, arbustes, arbres	Gazon, arbustes	Mousses, vivaces, sedums

D. Composition d'une toiture verte

La figure 8 illustre pour chacune de ces toitures aménagées, la composition recommandée.

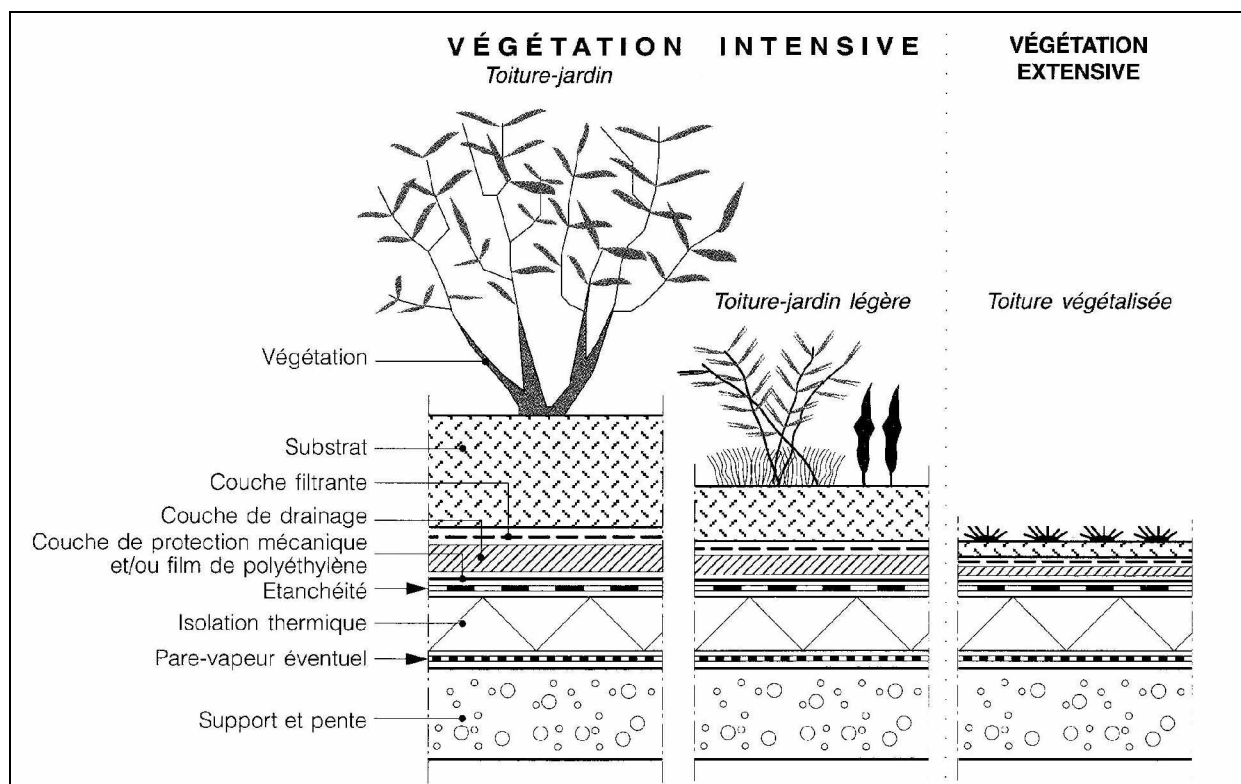


Figure 8 : Composition schématique des différents types de toitures vertes [Source : CSTC, 2006].

En partant du sommet de la figure 8 [CSTC, 2006], on trouve :

- la couche de végétation : elle est herbacée ou arbustive, choisie en fonction du climat de la région, de l'ensoleillement, de la pente du toit, de l'épaisseur du substrat, etc ;

² Pentes nécessitant des aménagements particuliers (couche drainante adaptée ou pose du substrat en escalier)

- le substrat de croissance : c'est le support de la végétation. Il doit permettre le développement des racines, remplir les besoins nécessaires au niveau physique, biologique et chimique. Il doit être stable, et capable de retenir une quantité d'eau suffisante pour satisfaire le besoin des plantes. Il doit être léger et résistant à la compaction tout en retenant l'eau. On utilise généralement des minéraux à pores ouverts, à savoir de la pierre volcanique, de l'argile expansée, de la pierre ponce et parfois des débris de briques, c'est-à-dire des matériaux dont la masse spécifique est assez faible ;
- la couche filtrante : il s'agit généralement d'un géotextile laissant passer l'eau, mais qui protège le système de drainage en filtrant les particules ;
- le système de drainage ou couche de graviers : il assure l'évacuation de l'eau en excès. En effet, l'eau excédentaire ne doit pas séjourner sur la toiture, et ceci afin d'éviter son infiltration dans les couches sous-jacentes ;
- la couche de protection mécanique : il s'agit d'une protection de l'étanchéité contre les activités liées à l'installation ou à l'entretien des toitures vertes susceptibles d'occasionner des dégâts ;
- la membrane d'étanchéité et la résistance aux racines : l'étanchéité prévient les risques d'infiltration d'eau. Son accessibilité étant très limitée par la présence de la toiture verte, il convient de soigner sa réalisation. L'étanchéité peut subir des dommages principalement par l'activité des racines. Il convient donc, soit d'utiliser une étanchéité qui présente une résistance face aux racines, soit de disposer un film de polyéthylène par-dessus l'étanchéité ;
- l'isolation thermique ;
- le pare-vapeur : il prévient l'humidification de l'isolant ;
- la structure portante : la structure portante d'une toiture peut être constituée de différents types de support. Il n'existe apparemment pas de contre-indications quant à l'installation des toitures vertes en fonction du type de support, mais, en cas de rénovation, il faut vérifier que la structure est capable de supporter le poids de l'installation prévue. Vu la surcharge importante induite par la mise en place d'une toiture verte de type intensif, il n'est généralement pas possible de les installer en rénovation, les fondations et la structure du bâtiment devant être dimensionnées en fonction de cette charge supplémentaire.

Il est recommandé de construire des terrasses avec une pente minimum de 1 à 2% afin de favoriser l'écoulement de l'eau et d'éviter ainsi des dommages importants pour le bâtiment en cas de fuite de l'étanchéité.

La mise en place de trop-pleins est également nécessaire pour l'évacuation rapide d'une pluie trop importante.

Selon les besoins en eau des plantes en place, on retrouve parfois un système de stockage d'eau. Il peut être directement intégré au système de drainage (illustré aux figures 9 et 10), ou faire l'objet d'une couche différenciée.

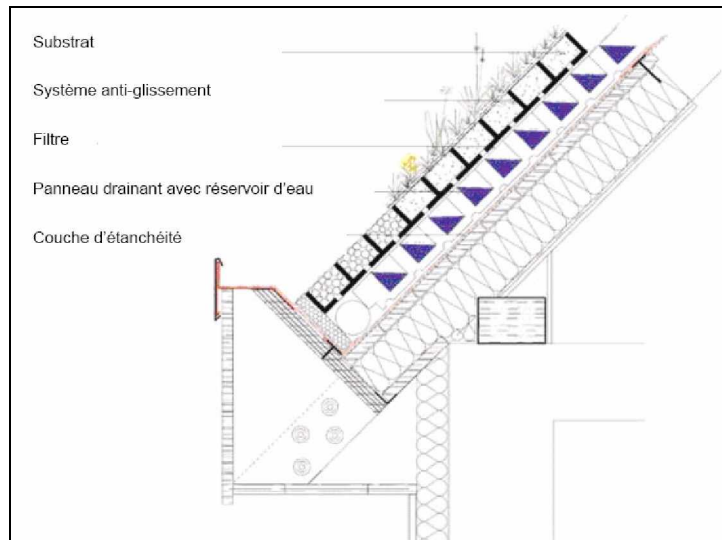


Figure 9 : Principe d'une toiture verte en pente avec stockage d'eau

[Source : Btech nv. sa, 2006 consulté le 10/07/06].



Figure 10 : Mise en place d'une toiture verte en pente, système de stockage d'eau

[Source : Btech nv. sa, 2006 consulté le 10/07/06].

E. Avantages et inconvénients d'une toiture verte

L'intérêt des toitures vertes qui fait l'objet du présent travail est leur capacité à diminuer le ruissellement et à restaurer en partie le cycle naturel de l'eau. Plusieurs études ont déjà été menées pour le démontrer. Leurs conclusions annoncent une diminution du ruissellement annuel importante, de l'ordre de 50 à 70%. Seule l'étude de Mentens et al. [2005] fournit des mesures de l'écoulement, nous présentons donc leurs résultats. Selon ces auteurs, une toiture verte extensive de 100mm d'épaisseur peut diminuer l'écoulement jusqu'à 70%. Leurs résultats, illustrés en figure 11, montrent que l'écoulement est effectivement diminué de 70%. Mais l'événement pluvieux représenté n'est que de 14,6 mm durant 24 heures, ce qui représente une pluie d'intensité très faible³. De plus, l'étude ne précise pas l'état hydrique du substrat avant la pluie.

³ Pour comparaison, une pluie de 14,6 mm/h pendant une heure présente une période de retour de 2 ans [Demarée, 1985].

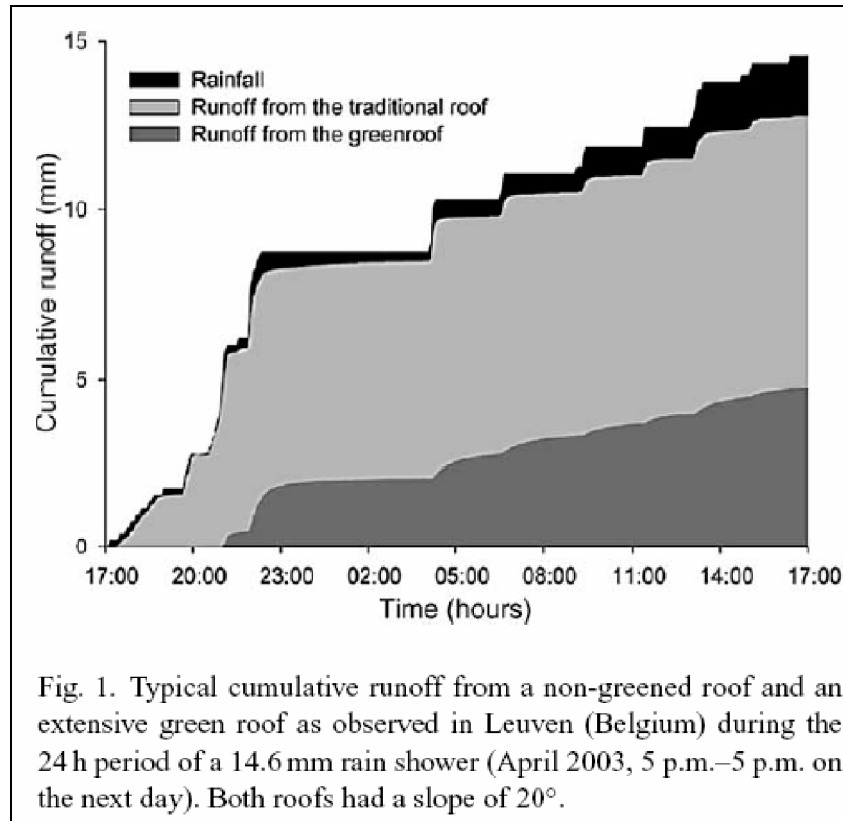


Figure 11 : Ecoulement cumulé en fonction du temps pour une toiture classique et une toiture verte [Source : Mentens et al., 2005].

Les influences du climat local, de la distribution des pluies et de leur intensité, du pouvoir évaporant de l'atmosphère, notamment, ne sont pas abordées dans cette étude.

Les mêmes auteurs présentent une étude concernant l'impact de l'implantation de toitures vertes sur le ruissellement à Bruxelles (moyennant le verdissement de 10% de toits bruxellois avec une réduction de 54% de l'écoulement par toiture). Cette étude montre une réduction de l'écoulement annuel de 2,7%. Si l'on ne considère que Bruxelles-centre dans la simulation, ce chiffre grimpe à 3,5%. Mais ces auteurs ne parlent pas de l'effet de la répartition géographique des toitures dans un bassin versant. De plus, les chiffres sur lesquels s'appuie cette extrapolation sont issus de l'étude présentée ci-dessus.

Ces éléments justifient donc pleinement une étude plus approfondie de l'intérêt hydrologique de tels dispositifs, en particulier pour les averses intenses.

Dans la littérature, on trouve, en outre, toute une série d'autres avantages liés aux toitures vertes. L'importance de ceux-ci peut varier avec le type de toiture. Ils ne feront pas l'objet d'approfondissement dans le présent mémoire. Nous les présentons néanmoins ci-dessous :

- Impact écologique
 - Protection de la nature et protection d'espèces menacées (maintien de la biodiversité et maillage écologique)

Ces toitures ajoutent des espaces naturels en milieu urbain où ils se font de plus en plus rares. En Suisse par exemple, plusieurs espèces végétales et animales

rare ou menacées ont été recensées sur des toits verts. Il s'agit notamment d'espèces de coléoptères ou d'araignées. Plusieurs cas de nids construits sur toits verts par des oiseaux couvant au sol ont aussi été constatés [Brenneisen, 2003].

- Effets sur le climat (îlot de chaleur urbain)
Selon Rosenzweig et al. [2006], une simulation pour la ville de Toronto a permis de constater, dans le cas du verdissement de 50% des toits de la ville, une réduction de l'îlot de chaleur urbain de 0,1-0,8°C.
- Filtration et épuration biologique des eaux de pluies
Cet intérêt est souvent cité dans des articles à caractère non scientifique [Hydrotech Inc ; IBGE⁴] mais a été démenti par des études menées sur la composition de l'eau issue des toitures vertes. Par exemple, selon Moran [2004], l'hypothèse d'une réduction des nitrates et phosphates suite au passage de l'eau dans une toiture verte a été démentie par une étude menée aux U.S.A. Lors de cette étude, aucune différence n'a été constatée entre les concentrations en ces deux composés dans les écoulements d'une toiture verte et d'une toiture de référence. Selon MacMilan [2004] cité par Liu [2004], on observe même une quantité plus importante de phosphates, métaux, anions et cations dans les eaux issues des toits verts. Ces éléments sont probablement présents à l'origine dans les couches constitutives de ces toitures vertes.
- Impact technique
 - Une isolation thermique
Une toiture verte permet de diminuer les fluctuations de température au niveau de la toiture et réduit les échanges de chaleur avec l'extérieur. Selon Liu et Baskaran [2005], la présence d'une toiture verte réduit de 47% les échanges de chaleur avec l'extérieur par rapport à une toiture de référence.
 - Une protection de la toiture contre les U.V. et contre les chocs thermiques
La membrane d'étanchéité n'est pas directement soumise aux ultra-violets. De plus, selon Wonga et al. [2003], si l'on mesure au cours de la journée la température de cette membrane, on constate qu'elle subit des variations de température atténuées par rapport à une toiture classique.
 - Une isolation acoustique
L'isolation intervient à deux niveaux. Tout d'abord, par l'amortissement supplémentaire que fournit la toiture verte, les bruits dus aux chocs des gouttes de pluie et de la grêle sont réduits. Ensuite, le couvert végétal apporte une masse supplémentaire favorable au confort acoustique. Elle augmente l'isolation acoustique de l'enveloppe du bâtiment et réduit donc la perception des bruits aériens [CSTC, 2006].

⁴ Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement

- Impact paysager et social

Les toitures vertes ont un caractère esthétique qui peut être non négligeable dans des villes où les espaces verts se font rares. Il est reconnu aussi que la présence d'espaces verts favorise une bonne santé mentale [CSTC, 2006].

Quant aux inconvénients inhérents aux toitures vertes, il faut signaler :

- une attention particulière à la mise en place des couches constitutives et surtout à l'étanchéité dont l'accessibilité est compromise à terme ;
- la sécurité incendie, les propriétés des toitures vertes en la matière étant difficiles à estimer.

Et, plus particulièrement dans le cas d'une végétation intensive :

- une surcharge importante due à la toiture, dont il faudra tenir compte dès la conception du bâtiment ;
- des structures particulières dues à l'accès possible par le public devront être mises en place (accès aisé et sécurisé) ;
- un entretien régulier et important, comparable à celui d'un jardin classique ;
- le coût relativement élevé de ce genre d'installation.

F. Réalisations et incitations

Les toits verts dans le monde

Historiquement, la construction de toitures végétales se fait de manière traditionnelle dans plusieurs pays scandinaves et européens et chez les amérindiens. Le mélange de terre et de végétaux enracinés sur les toits permet de réaliser des toitures relativement bien isolées avec des matériaux facilement disponibles.

Actuellement, plusieurs pays retournent vers ce genre de procédés. Certains incitent la mise en place de toitures vertes par des primes à l'installation [Laroche et al., 2004]:

- Allemagne : réduction de taxe environnementale aux promoteurs immobiliers qui utilisent les toits végétaux et subsides pour l'installation (remboursement d'environ 17,5 à 22,5 EUR/m²⁵) ;
- Japon : la plupart des quartiers de la ville de Tokyo offrent des mesures incitatives couvrant jusqu'à la moitié des coûts de construction ;
- Autriche : des programmes d'incitation ont financé 200 toitures depuis 1989.

D'autres exigent que toute nouvelle construction commerciale ou industrielle possède une toiture verte :

- Allemagne : à Stuttgart, le règlement d'urbanisme oblige à installer un jardin-terrasse sur le toit de tout nouveau bâtiment industriel ;
- Suisse : les entrepreneurs sont tenus de munir leurs nouvelles constructions de toitures vertes ;
- Japon : toute construction occupant plus de 1000 m² de terrain doit être couverte de végétaux sur au moins 20% de sa surface.

⁵ Le prix d'une toiture verte extensive varie, en Belgique, entre 50 et 100 EUR/m²

Les toits verts en Belgique

En Belgique, en 2003, 509 toitures vertes étaient recensées en Flandres et à Bruxelles : 39% sont extensives, 56% intensives et 5% semi-intensives [Mentens, 2003]. La région de Bruxelles-Capitale offre 7,5 EUR/m² pour une toiture extensive et 15 EUR/m² pour une toiture intensive.

A Bruxelles, la directive-cadre européenne sur l'eau (DCE) a des implications dans la gestion des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques. La DCE oblige les pays d'Europe à mettre en place une gestion intégrée du cycle de l'eau au niveau des bassins hydrographiques via quatre thèmes dont l'utilisation rationnelle de l'eau par l'installation de toitures végétales [Communauté européenne, 2000].

En Wallonie, aucune prise de position officielle n'existe jusqu'à présent concernant directement les toitures vertes. Par contre, pour autant que démonstration de leur efficacité soit faite, l'installation de celles-ci pourrait s'inscrire dans les buts poursuivis par le plan PLuIES ou plan global et intégré de **Prévention et Lutte** contre les **Inondations** et leurs **Effets** sur les **Sinistrés** [Lambot et Dewil, 2003]. Ce plan fait écho au projet de directive européenne destinée à aider les Etats membres à prévenir et à limiter les inondations et leurs conséquences dommageables pour la santé humaine, l'environnement, les infrastructures et les biens. Pour l'exécution du plan, 27 actions ont été énoncées. Ces actions doivent contribuer à la réalisation concrète du plan, articulé autour de cinq objectifs :

- objectif 1 : améliorer la connaissance du risque « inondation » ;
- objectif 2 : diminuer et ralentir le ruissellement sur les bassins versants ;
- objectif 3 : aménager les lits des rivières et les plaines alluviales en tenant compte des aléas météorologique et hydrologique, tout en respectant et en favorisant les habitats naturels, gages de stabilité ;
- objectif 4 : diminuer la vulnérabilité dans les zones inondables ;
- objectif 5 : améliorer la gestion de crise.

L'installation d'une toiture verte s'inscrit dans la réalisation de l'objectif 2 par la diminution et le ralentissement du ruissellement, tout comme les toitures bacs qui sont décrites au paragraphe suivant.

Les coûts relatifs à ces deux types de structures stockantes doivent être balancés avec les coûts des interventions d'urgence en cas d'inondation. Reste à démontrer toutefois leur efficacité en cas d'averse inondante, puisque les études menées à ce jour concernent plus spécifiquement les écoulements annuels ou les averses de faible intensité.

2.1.2. Toiture bac

Cette technique consiste à étaler dans le temps le ruissellement grâce à un stockage temporaire de l'eau sur les toitures. Sur les toitures-terrasses, le volume de stockage est établi avec un parapet en pourtour de toiture. Ce type de toiture inclut habituellement les éléments suivants :

- du matériel de portance ;
- un isolant thermique et un pare-vapeur ;
- une couche d'étanchéité ;
- une protection pour la couche d'étanchéité ;

- un système de drainage.

Généralement, ces toitures fonctionnent avec des dispositifs de contrôle du débit de sortie ainsi que des dispositifs de sécurité. Le rôle du dispositif de contrôle de débit est de limiter le débit sortant de la toiture, il s'agit de sorties calibrées protégées par des grilles. Le débit de fuite varie d'une toiture à l'autre. Le système de sécurité consiste en un trop-plein, qui permet de ne pas dépasser une certaine hauteur d'eau, fonction de la capacité de portance du bâtiment. Le débit de sortie du trop-plein doit être important afin d'évacuer rapidement l'eau en surplus lors d'événements pluvieux exceptionnels. Il est conseillé qu'il soit de l'ordre de 3 L/min.m² [Revitt et al., 2003]. Le principe exposé aux figures suivantes (figures 12 et 13) consiste donc à retenir une certaine hauteur d'eau, tout en la relâchant à faible débit dans le réseau traditionnel.

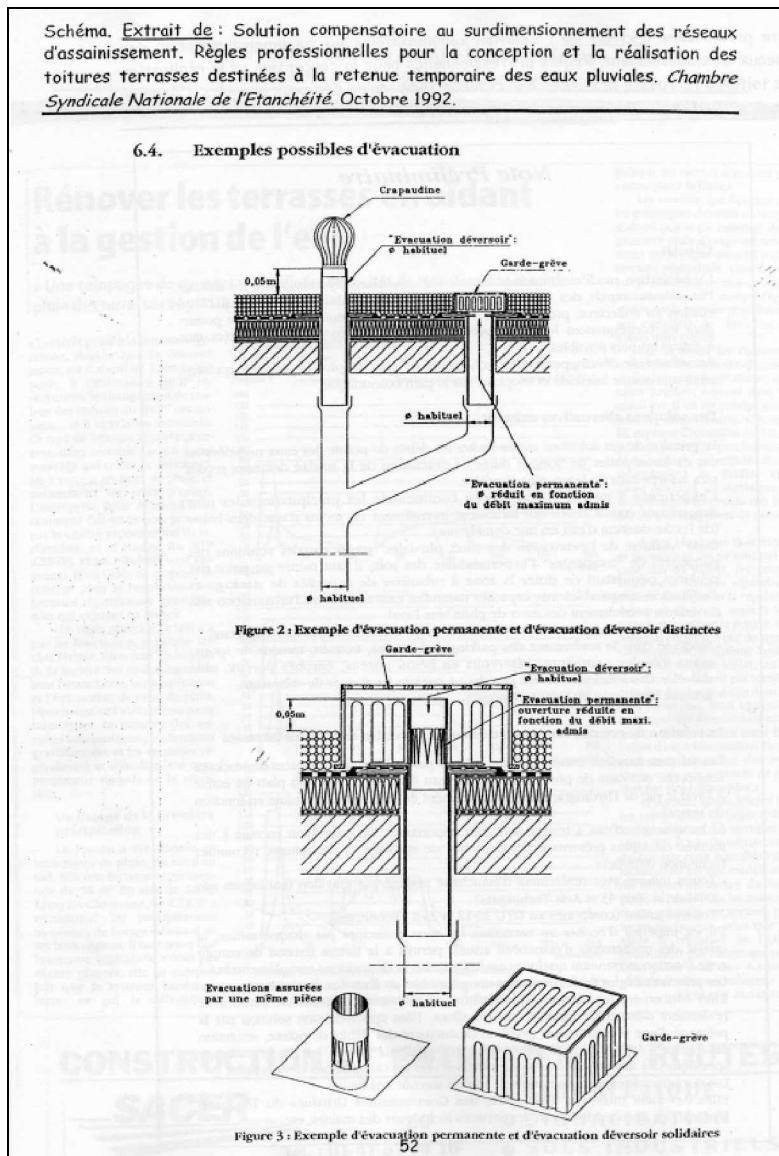


Figure 12 : Exemples de systèmes d'évacuation d'une toiture bac
[Source : Revitt et al., 2003].

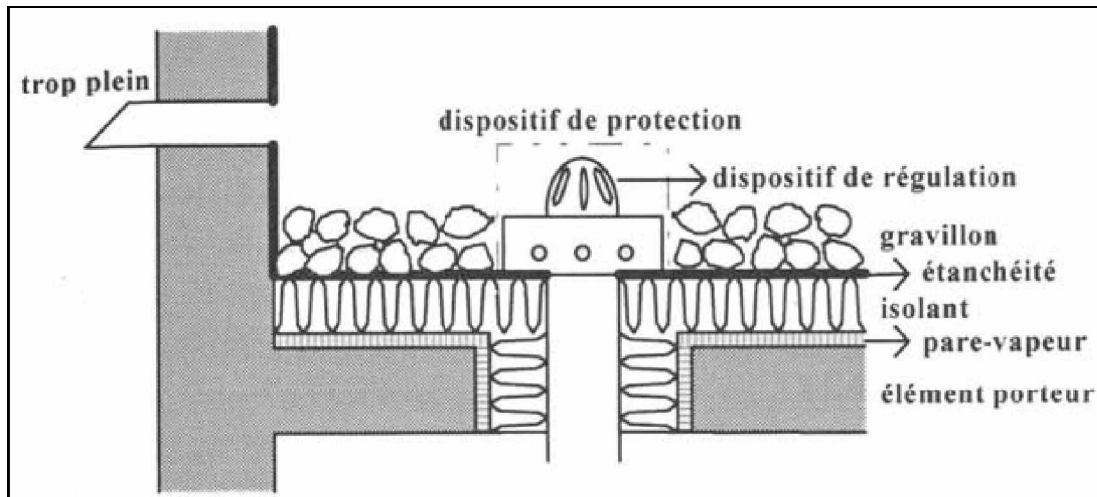


Figure 13 : Représentation schématique d'une évacuation sur toiture stockante

[Source : Bellefontaine, 2006].

Ce système présente des avantages communs avec les toitures végétalisées :

- pas d'emprise au sol supplémentaire ;
- adaptables aux toitures traditionnelles (limitation par la portance du bâtiment) ;
- techniques relativement simples ;
- très bonne intégration dans l'architecture et l'aménagement.

Contraintes techniques :

Selon Revitt et al. [2003], il est recommandé que chaque point du toit se trouve à une distance maximale de 30 m d'une évacuation, et que chaque bouche d'évacuation reprenne au maximum 700 m² de toiture. L'épaisseur de stockage dépend de la pluie de projet choisie pour le dimensionnement. Par exemple, si l'on prend comme pluie de projet une pluie exceptionnelle d'intensité égale à 60mm/h pendant une heure, la profondeur utile de stockage devra être égale à au moins 6 cm⁶, et le bâtiment devra pouvoir supporter une charge d'au moins 60 kg/m² supplémentaire.

Ce système de stockage s'installe le plus souvent sur des toits plats, mais peut se rencontrer sur des toits en pente de 0,1 à 5 % maximum. Sur toits en pente, le stockage est possible en utilisant des caissons cloisonnant la surface. Il convient de vérifier la capacité du bâtiment à supporter cette charge supplémentaire dans le cas d'une rénovation. Une bonne étanchéité est impérative.

⁶ Si une couche de gravier est présente, il faut considérer ce chiffre comme le volume interstitiel disponible



Figure 14 : Vue des évacuations et du mur de protection d'une toiture récoltant les eaux de pluie [Auteur : Degré A., 2006].

Aux figures 14 à 16, une toiture collectant les eaux de pluies est illustrée. A la figure 14, on se situe en bas de pente de toiture, où se trouvent les bouches de récolte des eaux de pluie, et où un pourtour muni de trop-pleins évite le débordement de la toiture. A la figure 15, on peut voir le soin apporté à la réalisation de l'étanchéité, et, à la figure 16, la surélévation des appareillages de la toiture.

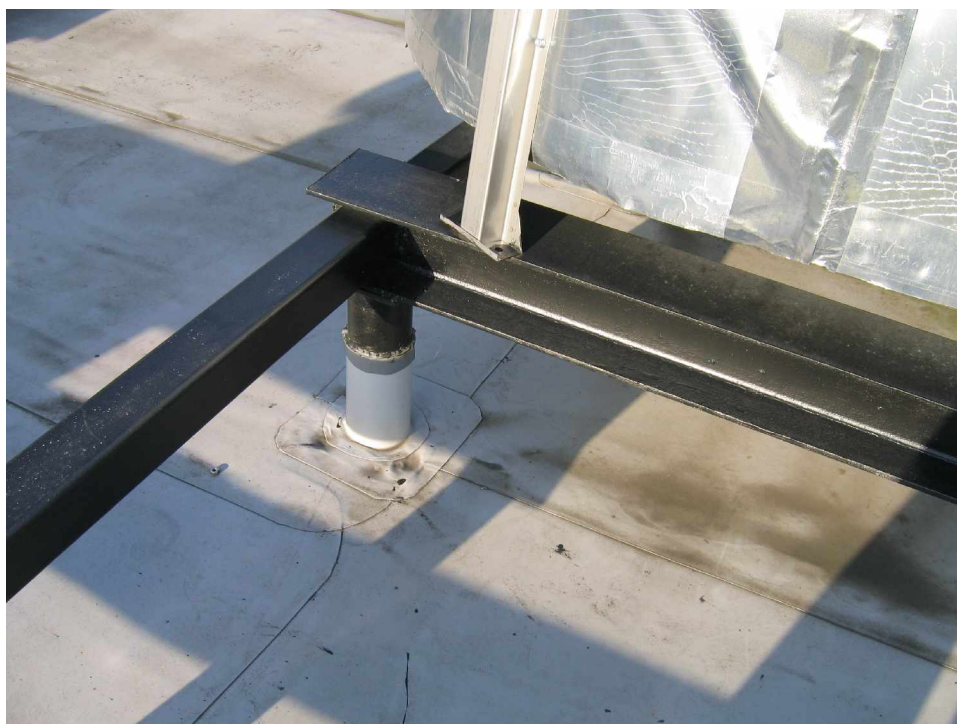


Figure 15 : Vue de l'étanchéité d'une toiture récoltant l'eau de pluie [Auteur : Degré A., 2006].



Figure 16 : Surélévation des appareillages [Auteur : Degré A., 2006].

Ce genre de technique n'engage pas de surcoût pour son installation, mais nécessite deux inspections par an : en automne pour vérifier que les feuilles mortes n'empêchent pas l'évacuation, et en été pour vérifier le fonctionnement de l'éventuel système de drainage [Bellefontaine, 2006].

2.2. Interfaces de modélisation

Afin de développer une modélisation hydrologique des toitures vertes, d'une toiture bac et, à titre de comparaison, d'une toiture classique (Blanco), nous avons eu recours à un logiciel de programmation.

Deux produits ont été testés : d'une part, ModelMaker 4.0 édité par Cherwell Scientific Ltd® utilisé dans les domaines des sciences de la vie tels que l'hydrologie, les sciences humaines, l'écologie des populations etc., d'autre part, Visual Studio 2005, logiciel édité par Microsoft®, de manipulation courante et dépourvu d'orientation thématique.

2.2.1. ModelMaker 4.0

ModelMaker permet la création et le développement de modèles mécanistes ou empiriques. Ces modèles sont composés d'étapes, reliées entre elles par des relations mathématiques. ModelMaker permet l'agencement de ces différentes étapes entre elles, ainsi que leur description mathématique à travers la disposition d'objets ayant différentes fonctions. Les éléments de base de ce programme sont les compartiments. Ils jouent le rôle de réservoir, et des flèches les relient entre eux ou à d'autres composants. Ces flèches peuvent soit consister en un flux de matière d'un compartiment à l'autre, soit juste consister en une influence d'un compartiment sur un autre. Chaque composant de ModelMaker peut avoir une valeur conditionnelle, c'est-à-dire dépendante de la valeur d'un autre composant. Les simulations se font sur base d'une variable de contrôle, par exemple le temps.

2.2.2. Microsoft Visual studio 2005

Visual Studio est une mise à jour du programme Visual Basic. Elle permet de combiner différents langages (V.B., C#, C++,...). Cette mise à jour implique quelques changements dans la déclaration des variables et le nom des extensions. En dehors de cela, les fonctions disponibles dans la précédente version (V.B. 6.0) sont identiques.

L'environnement de développement d'un projet comprend une interface pouvant recevoir des objets ou contrôles liés à des événements. Les événements déclencheront les procédures associées. Parmi les objets ou contrôles, citons : les étiquettes, les zones de texte, les boutons de commande, les boutons d'options... A chaque objet est associé un certain nombre de propriétés, modifiables par des événements ou directement dans la zone de développement du projet.

Au niveau de la programmation, citons les éléments séquentiels du langage qui permettent de coder les instructions :

- la forme des instructions peut être composée de lettres majuscules et minuscules, de chiffres, de caractères spéciaux, de mots de vocabulaires spécifiques à V.B. renvoyant des instructions précises ;
- les variables, qui permettent de stocker des valeurs, doivent être déclarées selon leur type (logique, entier, entier long, décimal, décimal double précision, alphanumérique) ;
- les constantes ;
- les instructions arithmétiques comprenant des symboles, des variables ou des constantes, des fonctions V.B. ;
- les variables indicées ou matrices et vecteurs, dont chaque élément est identifié par un indice sur lequel il est possible d'appliquer des instructions.

Les instructions de base dans le langage V.B. peuvent être classées en différentes catégories :

- les instructions liées à une décision (If...Then) ;
- les instructions liées à des répétitions ou boucles (For...Next ; Do While...Loop ; Do...Loop Until).

Citons encore la possibilité de lier le projet à des fichiers d'entrée ou de sortie, permettant la lecture de données externes ou l'écriture des résultats dans un fichier texte.

La programmation en V.B. permet une liberté au concepteur dans ses instructions et dans leur séquençage. De plus, la programmation est facilitée par les objets, fonctions et instructions déjà disponibles dans le langage Visual Basic.

3. Modélisation

3.1. Paramètres des bilans hydrologiques

Afin d'estimer l'effet potentiel des différents types de toitures présentés ci-dessus, les termes du bilan hydrologique sont modélisés. Les variables nécessaires sont les données météorologiques d'une part, et les paramètres propres à chaque type de toiture d'autre part.

Les données météorologiques issues de l'IRM⁷ ont été obtenues auprès de la DGRNE⁸, aux pas de temps horaire et journalier pour la station d'Ernage durant les années 1989 à 1995. Ces données comprennent :

- les données de pluies horaires ou journalières [mm] ;
- le rayonnement solaire global [cal/cm².jour] ;
- la température [°C] ;
- l'humidité relative [%] ;
- la vitesse du vent à 2m [m/s] ;
- l'insolation réelle [minutes/jour] ;
- l'insolation maximale fonction de la latitude [minutes/jour].

En dehors des données de pluviosité, les autres données sont introduites exclusivement sous forme de moyenne journalière.

Les dimensions des toitures ont été fixées arbitrairement pour permettre une comparaison et une discussion des résultats des simulations. Ces paramètres peuvent néanmoins être modifiés aisément grâce à l'interface qui a été créée.

On a ainsi fixé, dans un premier temps, la surface de la toiture, sa pente, l'épaisseur de stockage (niveau des trop-pleins pour la toiture bac et épaisseur du substrat pour les toitures vertes).

Les modèles hydrologiques développés ici font appel à divers phénomènes physiques qui doivent être pris en compte dans les bilans propres à chaque toiture. Ces éléments n'interviennent pas dans tous les modèles, c'est pourquoi nous commençons par une explication succincte du principe de base de chaque modèle. Les figures 17 et 18 l'illustrent de manière schématique pour la toiture verte et la toiture bac respectivement.

Toitures vertes

Les toitures vertes sont assimilées à des systèmes eau-sol-plantes. La pluie arrive sur la toiture, et va se répartir en différents flux qui sont l'interception, l'infiltration et le ruissellement. La quantité d'eau qui atteint le substrat va être en partie utilisée par les plantes et évapotranspirée vers l'atmosphère et en partie évacuée vers la sortie ; celle-ci sera donc constituée de la part d'eau qui ruisselle et de la part de l'eau qui s'infiltrate et qui n'est pas retenue dans le substrat.

⁷ Institut Royal Météorologique

⁸ Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (Ministère de la Région Wallonne)

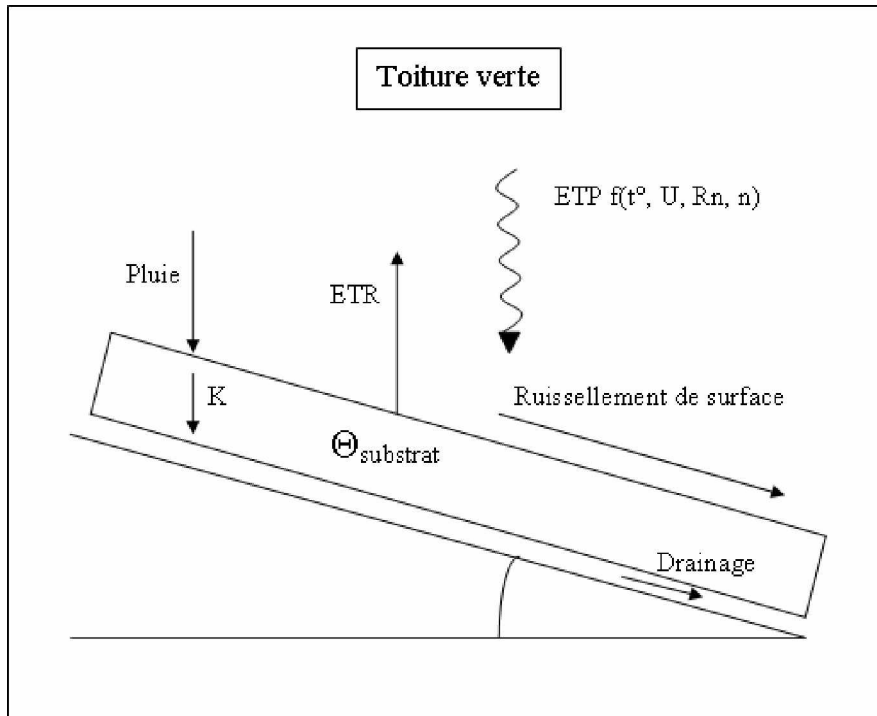


Figure 17 : Représentation schématique du bilan hydrologique et des paramètres associés pour une toiture verte.

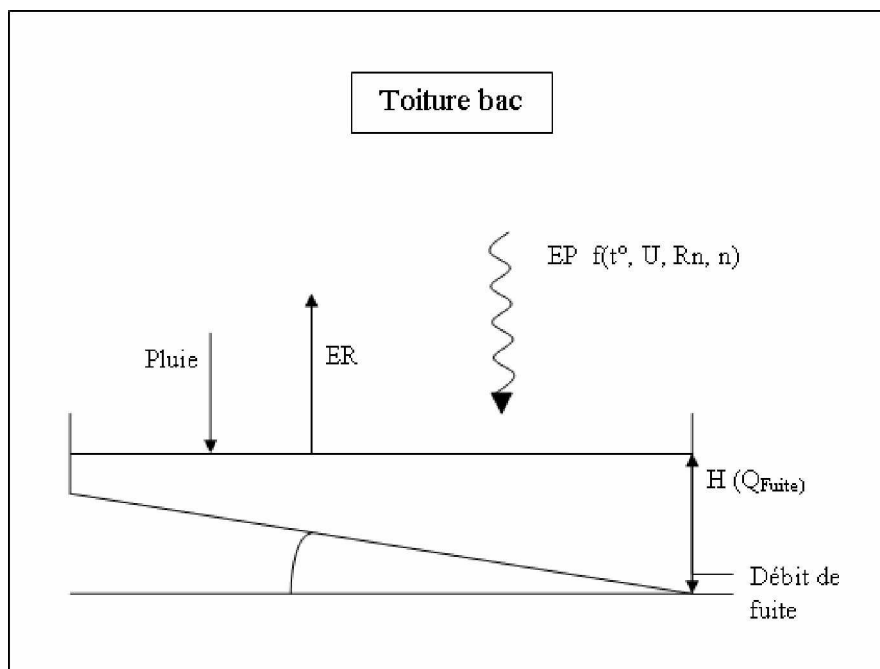


Figure 18 : Représentation schématique du bilan et des paramètres associés pour une toiture bac.

Toiture bac

Les éléments à prendre en compte pour ce système sont moins nombreux que dans le cas d'une toiture verte. En effet, il repose sur un principe simple : une quantité de pluie est apportée à la toiture, et une quantité en est exportée par évaporation. Une évacuation continue à faible débit permet une vidange régulière de la toiture et un stockage sur celle-ci dès que l'intensité de la pluie devient plus importante que le débit évacué. La résultante

constitue la variation de stock du toit. Dès que ce stock dépasse la capacité du toit (fonction des dimensions qui lui sont données), ce surplus est évacué via le trop-plein vers le système classique de récolte des eaux de pluie.

Nous détaillons ci-dessous les éléments du bilan hydrologique et les paramètres qui leur sont liés, leur intervention ou non dans un modèle est explicitée lors de cette présentation.

3.1.1. Les précipitations et l'arrosage

Nous considérons ici les précipitations en millimètres par pas de temps de simulation. Les données sont fournies par la DGRNE aux pas de temps horaire et journalier, les données journalières du pluviomètre devant être réparties dans le temps au moyen des mesures horaires issues du pluviographe.

La pluie constitue le seul apport d'eau à la toiture dans le cas des toitures extensives et des toitures bacs. Cependant, les toitures vertes semi-intensives et intensives nécessitent un arrosage.

Pour quantifier l'arrosage de la toiture, deux points de vue sont considérés : le point de vue du jardinier qui, selon Econeau [2006], arrose son gazon une fois par semaine pendant la belle saison, à raison de 25 mm d'eau si la semaine a été sèche ; ainsi que le point de vue agronomique, qui se base sur le niveau de la réserve utile du sol.

Dans le modèle qui nous occupe, les deux points de vue sont développés et font l'objet d'un choix dans la feuille de paramètres des modèles concernés (cf. paragraphe 3.2.2.) c'est-à-dire la toiture verte semi-intensive et la toiture verte intensive.

3.1.2. L'évaporation et l'évapotranspiration potentielles, maximales et réelles

On distingue trois types d'évapotranspiration :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP), définie comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance et abondamment pourvue en eau ;
- l'évapotranspiration maximale (ETM) d'une végétation donnée est définie à différents stades de développement de la végétation lorsque l'alimentation en eau est abondante ;
- l'évapotranspiration réelle (ETR), définie comme le taux d'évapotranspiration des plantes et du sol lorsque ce dernier est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel.

On a les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{ETM} &= K_c \cdot \text{ETP} \\ \text{ETR} &= K_s \cdot \text{ETM} \end{aligned}$$

Concernant l'évaporation et l'évapotranspiration potentielles, c'est la formule originale de Penman (cf. annexe 9.3.) qui a été choisie. Celle-ci permet de calculer, soit l'évaporation d'un bac d'eau, soit l'évapotranspiration potentielle d'un couvert végétal correctement alimenté en eau et donc d'avoir une estimation qualitativement semblable dans les deux cas. Il s'agit

d'une formule physiquement basée, largement validée et utilisée dans de nombreux modèles (EPIC⁹, SWAT¹⁰).

La formule est la suivante :

$$Eb \text{ ou } ETP = \frac{d}{d+a} \cdot \frac{Rn}{L} + \frac{a}{d+a} \cdot (A + BU) \cdot (e'_a - e_a) \quad [\text{Maidment, 1993}]$$

Avec :

- Eb Evaporation d'un bac d'eau libre [mm/jour]
- ETP Evapotranspiration potentielle d'un couvert végétal [mm/jour]
- d Pente de la courbe de saturation de la vapeur d'eau à la température de l'air [mm Hg.°C⁻¹]
- a Coefficient psychrométrique (= 0,5) [mm Hg.°C⁻¹]
- Rn Rayonnement net [cal.cm⁻².j⁻¹]
- L Chaleur latente de vaporisation [cal.0,1 gr⁻¹]
- A Coefficient numérique valant [Guyon, 1958] : 0,175 pour de la végétation
0,350 pour de l'eau libre
- B Coefficient numérique valant 0,184
- U Vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol [m.s⁻¹]
- e'_a Tension de vapeur saturante à la température de l'air [mm Hg]
- e_a Tension de vapeur à la température de l'air [mm Hg]

Considérant que chaque terme représente un phénomène physique distinct participant à l'évaporation, nous avons décidé, tout comme Météo-France [Ducharne A., 2002], de restreindre cette estimation par des conditions d'application, à savoir que chaque terme de l'équation doit être égal ou supérieur à zéro. En effet, si ces phénomènes sont distincts (évaporation par transmission de chaleur et évaporation par effet du vent/pouvoir évaporant de l'air), ils n'influent pas l'un sur l'autre. Mais, par rapport à d'autres modèles d'estimation de l'évapotranspiration potentielle, celui-ci entraîne une surestimation de l'ETP (cf. annexe 9.3.).

Les différents paramètres fonction de données météorologiques peuvent être évalués par les formules suivantes :

$$d = \frac{40990 \cdot e'_a}{(t + 273,3)^2 \cdot 0,133322} \quad [\text{Maidment, 1993}]$$

$$e'_a = 6,108 \cdot e^{17,27 \cdot \frac{t}{t+237,3}} \quad [\text{Maidment, 1993}]$$

$$e_a = e'_a \cdot \frac{HR}{100} \quad [\text{Maidment, 1993}]$$

Avec :

- t Température [°C]

⁹ Erosion Productivity Impact Calculator

¹⁰ Soil Water Assessment Tool

HR Humidité relative [%]

$$Rn = Rg.(1 - \alpha) - Rb \quad [\text{Maidment, 1993}]$$

Avec :

Rg Rayonnement global [$\text{cal.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$]

Rb Rayonnement thermique [$\text{cal.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$]

α Albédo de la surface considérée (cf. paragraphe 3.1.8)

$$Rb = \varepsilon.\sigma.T^4.(0,56 - 0,092.\sqrt{e_a}).(0,1 + 0,9.\frac{n}{N}) \quad [\text{Maidment, 1993}]$$

Avec :

ε Emissivité de la surface

σ Constante de Stefan-Boltzmann (= $1,18.10^{-7}$) [$\text{cal.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$]

n Durée d'insolation observée [min]

N Durée d'insolation possible [min]

Nous ne disposons des données météorologiques (hors pluie) qu'au pas de temps journalier. Or, pour les simulations horaires, nous avons besoin de connaître la répartition de l'évapotranspiration potentielle selon les heures de la journée. Un modèle de simulation hydrologique appelé Hydrotel [Fortin, 2001] propose une répartition horaire de l'ETP. Cette répartition horaire de l'ETP est donnée au tableau 2 :

Tableau 2 : Répartition horaire de l'évapotranspiration journalière [Fortin, 2001].

Heure	% ETP	Heure	% ETP
1	0,5	13	10,9
2	0,5	14	10,8
3	0,5	15	9,6
4	0,5	16	7,8
5	1,0	17	5,0
6	2,2	18	2,0
7	4,0	19	0,5
8	5,4	20	0,5
9	8,0	21	0,5
10	8,4	22	0,5
11	9,6	23	0,5
12	10,4	24	0,5

Cette répartition est somme toute logique, les taux d'évapotranspiration potentielle étant faibles la nuit et maximaux entre midi et 14h. Nous utiliserons donc cette répartition dans nos modèles.

Pour la toiture bac, la formule de Penman nous donne directement l'évaporation d'une surface d'eau libre. Par contre, pour les toitures vertes, l'évaluation de l'évapotranspiration maximale et réelle dépend du type de toiture considéré.

A. Toiture verte extensive

Plusieurs études concernant l'estimation de l'évapotranspiration réelle des sédums à partir de l'évapotranspiration potentielle existent.

- L'étude de Rezaei et Jarret [2005] a consisté à mesurer en enceinte contrôlée l'évapotranspiration d'un mélange de *Delosperma nubigenum* à hauteur de 80% et de *Sedum album* à hauteur de 20%. Les paramètres météorologiques (température de l'air, vitesse du vent, rayonnement et humidité) étaient contrôlés afin de reproduire les conditions des différentes saisons (hiver, printemps/automne, été précoce, été caniculaire) pendant 21 jours sans eau. Une régression linéaire entre les valeurs mesurées et les différents modèles de prédiction pour chaque saison a permis d'aboutir à un coefficient d'ajustement de l'évapotranspiration potentielle. La conduite de l'étude a été la suivante : Quatre box, d'épaisseur de substrat de 10 cm, ont été plantés avec le mélange d'espèces cité ci-dessus et quatre autres ont servi de Blanco (même composition excepté les plantes). Les conditions de température propres à une saison étaient appliquées pendant deux ou trois semaines, permettant aux plantes d'adapter leur régime. Les box étaient alors arrosés jusqu'à leur capacité au champ. Pendant les 21 jours suivants aucune pluie n'était appliquée et la perte de poids de chacun des box était mesurée toutes les 10 secondes. Les mesures permettent l'obtention d'équations reliant la valeur calculée par un modèle et la valeur mesurée. Pour l'hiver, la régression linéaire a été faite à partir des mesures effectuées sur 21 jours, pour le printemps/automne 10 jours, pour l'été précoce 6 jours et pour l'été caniculaire 4 jours. Après ce laps de temps, on est en situation de stress hydrique (teneur en eau inférieure à 40% de la réserve utile), et le comportement des box plantés est le même que celui des box non plantés.
- L'étude de Lazzarin et al. [2005] consiste en la détermination du potentiel de réduction d'une toiture verte pour les échanges de chaleur. L'évapotranspiration des sédums est déterminée par des mesures sur le terrain. Les variables météorologiques mesurées sont les suivantes : rayonnement, température de l'air, pluviosité, humidité relative de l'air, humidité du sol. Les mesures ont permis l'évaluation de l'albédo de la toiture verte constituée d'un mélange de sédums, il est dans ce cas de 0,23.

La valeur de l'évapotranspiration potentielle est calculée par la méthode de Penman. Le modèle permet alors le calcul d'un coefficient comme le rapport entre les valeurs mesurées et calculées de l'évapotranspiration, celui-ci dépendant du taux d'humidité du sol. Il s'agit en fait d'un coefficient égal à la multiplication de K_c par K_s .

En fonction de ces considérations, nous retenons pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle, en cas d'alimentation en eau correcte, l'étude de Lazzarin et al. [2005].

En cas de stress hydrique (lorsque la quantité d'eau dans le substrat est inférieure à 40% de la réserve utile), nous suivrons les constatations de la première étude qui indique que l'ETR correspond à ce moment à l'évaporation d'un sol nu. En effet, les sédums sont des plantes retenant l'eau en cas d'insuffisance, elles ne transpirent donc pas lors de périodes de stress hydrique.

Les résultats de Lazzarin et al. [2005] sont fournis à la figure 19. On peut en déduire que le K_c associé aux sédums est de 0,53 (K_s est égal à 1 pour un sol dont le taux d'humidité est maximum).

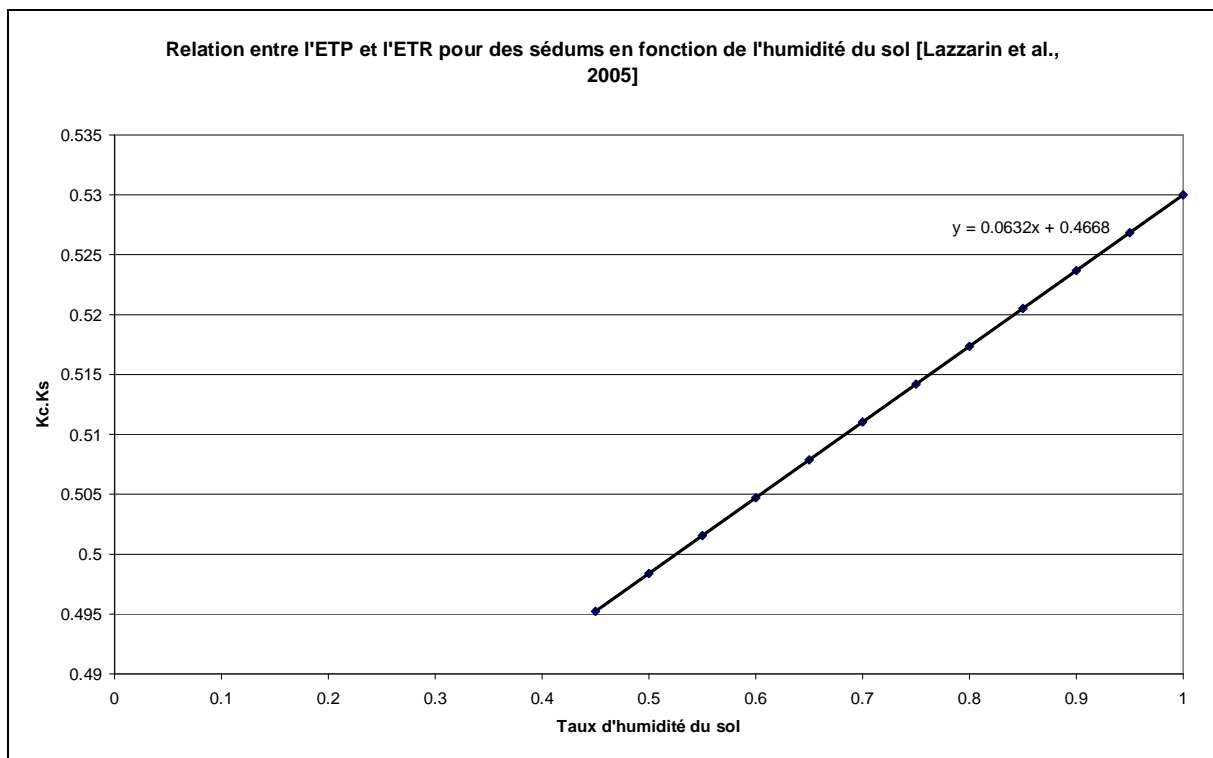


Figure 19 : Relation entre « Kc.Ks et le taux d'humidité du sol [Lazzarin et al., 2005].

L'ajout d'une courbe de tendance nous permet d'obtenir une équation facilement intégrable dans le modèle.

B. Toiture semi-intensive

Nous prenons un K_c égal à 1, en considérant qu'il s'agit de gazon et que la végétation est bien installée, l'évapotranspiration maximale est donc égale à l'évapotranspiration de référence.

Le passage à l'évapotranspiration réelle est fonction de l'alimentation en eau de la végétation. Lorsque l'arrosage se fait en fonction du niveau d'eau de la réserve utile, la végétation est abondamment fournie en eau. Selon la FAO¹¹, les plantes évapotranspirent moins que leur niveau de référence lorsqu'elles sont en conditions de stress hydrique, c'est-à-dire lorsque la réserve en eau du substrat est inférieure en moyenne à 50%¹² de la réserve utile. Nous avons donc fixé cette valeur comme étant la valeur limite à laquelle il faut arroser le substrat, la quantité apportée étant déterminée de façon à revenir à la capacité au champ du substrat. C'est donc finalement la valeur de référence de Penman pour l'évapotranspiration qui est adoptée dans ce cas.

Par contre, lorsque l'arrosage se fait en fonction des conditions météorologiques, il se peut que la quantité d'eau dans le substrat soit inférieure à cette valeur limite et induise un stress

¹¹ Food and Agriculture Organization

¹² Cette valeur diffère de celle utilisée pour les toitures extensives car la végétation considérée est différente. La valeur de 50% est une moyenne pour différentes espèces, la valeur précise pour le gazon n'est pas connue.

hydrique chez les végétaux. Il est possible de quantifier cet effet sur l'évapotranspiration via le calcul du facteur correctif K_s [Allen et al., 1998].

On calcule tout d'abord la réserve facilement utilisable pour la plante (RFU), c'est-à-dire la quantité d'eau qui est suffisante pour que la plante évapotranspire à son maximum et soit en bonne condition d'alimentation en eau :

$$RFU = p.RU$$

Avec :

RU Réserve utile en eau (cf. paragraphe 3.1.7.)

RFU Réserve facilement utilisable

p Fraction de la réserve utile qui peut être utilisée par les plantes avant d'être en condition de stress (0,5)

On trouve ensuite le facteur K_s par la formule suivante :

$$K_s = \frac{RU - D_{r,i}}{RU - RFU}$$

Avec :

$D_{r,i}$ Quantité d'eau comprise entre la capacité au champ et le niveau réel i du substrat

L'évapotranspiration réelle s'obtient simplement comme suit :

$$ETR = K_s . K_c . ETP$$

C. Toiture verte intensive

Dans le cas d'une toiture intensive, la liberté d'aménagement est beaucoup plus grande. L'augmentation considérable de l'épaisseur du substrat par rapport aux deux types précédents permet l'installation de végétaux de plus grandes tailles, le tout formant un jardin classique.

L'évapotranspiration de fleurs, d'arbustes ou d'arbres va varier par rapport à celle du gazon. Dans la littérature, on trouve le rapport entre l'évapotranspiration de ces différentes végétations et celle d'un gazon, considérant le tout comme bien entretenu. En permettant l'encodage des surfaces de chaque type de végétation en pourcentage du total, nous pourrions donc estimer la part de chacun dans le phénomène évaporatoire. Les arbustes ou les arbres consomment moins d'eau qu'un gazon, de l'ordre de 80% des besoins d'une pelouse. Les fleurs, quant à elles, en consomment environ 1,2 fois plus. Ce sont ces valeurs qui ont été entrées dans le programme [SMEGREG, 2006].

L'évaluation de l'évapotranspiration réelle va tenir compte d'un éventuel stress hydrique de la même manière que pour une toiture semi-intensive via le facteur K_s (cf. paragraphe 3.1.2.B.).

3.1.3. L'interception

C'est la part de la pluie interceptée par le feuillage et qui est évaporée avant d'atteindre le sol. Dans le cas d'une forêt dense, ces pertes peuvent être importantes. Mais, dans notre cas, la faible importance de ce phénomène par rapport aux autres conduit à le négliger [Musy, 2005].

3.1.4. L'infiltration

L'infiltration ne concerne que les toitures vertes composées de substrat. Sa quantification nécessite la détermination de la conductivité hydraulique (K). IBIC bvba (entreprise mettant en place des toitures végétalisées) fournit une valeur de K à saturation égale à 0,07 cm/s pour du substrat type Vulkatech®. Nous avons tenté de mesurer ce paramètre en laboratoire sur un échantillon de substrat afin de confirmer cette valeur. Nous mesurons un K de 0,14 cm/s, le double de la valeur fournie par IBIC. Considérant que l'échantillon fourni par IBIC bvba n'est peut-être pas totalement représentatif d'un substrat en place (granulométrie différente, échantillon fort remanié, altéré...), nous préférons utiliser la valeur de 0,07 cm/s.

Cette vitesse est celle de l'eau au sein du substrat lorsque celui-ci est à saturation. Pour des teneurs en eau inférieures à la saturation, la vitesse de l'eau au sein du substrat sera plus faible. Dans nos modèles, nous négligeons la variation de K en fonction de la teneur en eau, ce qui entraîne une erreur d'estimation de l'écoulement. Cette erreur n'a probablement pas, ou peu, d'impact lorsque la toiture est munie d'une couche de drainage, car dans ce cas le parcours effectué par l'eau est très court. Par contre, pour des toitures à forte pente, l'erreur risque d'être plus importante.

3.1.5. Le ruissellement

Vu la valeur élevée de la capacité d'infiltration à saturation, la totalité de la pluie passera par le substrat avant d'atteindre la sortie. Il n'y a donc pas de ruissellement de surface. En effet, il faudrait une pluie d'intensité supérieure à 2520 mm/h pour qu'une part de l'eau ne s'infilte pas.

3.1.6. Le débit de fuite des toitures bacs

Comme expliqué au paragraphe 2.1.2, une sortie calibrée permet une évacuation permanente à débit régulé de la toiture. Selon Tassin [2006], la valeur attribuée au débit de fuite correspond en général à la valeur du ruissellement de la parcelle avant construction. L'absence d'informations relatives à la détermination de ce paramètre nous conduit à lui imposer une valeur arbitraire. Nous avons dès lors choisi d'attribuer à ce débit une valeur équivalente à l'évacuation de 2% d'une pluie de 60 mm/h pendant une heure, soit 0,12 m³/h si une sortie reprend 100 m² de toiture. Une pluie d'intensité plus importante que ce débit de fuite induira un stockage sur la toiture. Nous avons également considéré ce débit comme constant quelle que soit la hauteur de charge.

3.1.7. Les paramètres physiques

Les paramètres propres à chaque type de toiture et ceux intervenant dans la quantification des termes du bilan décrits ci-dessus sont détaillés ci-après :

A. L'albédo

La valeur de l'albédo varie en fonction de la surface considérée.

- Toiture verte extensive

Deux paramètres sont à considérer : l'albédo de la végétation et l'albédo du sol nu. En effet, selon le niveau d'humidité du sol, l'évaporation sera soit celle de la végétation en place, soit celle du sol nu (cf. paragraphe 3.1.2.). La valeur de l'albédo de la végétation est une valeur récurrente de la littérature en ce qui concerne les sédums [Rosenzweig et al., 2004 ; Rezaei et Jarret, 2005], elle est considérée comme égale à 0,3. L'albédo d'un sol nu varie entre 0,02 pour des sols noirs et humides et 0,4 pour des sols clairs [Maidment, 1993]. On propose, en fonction de ces considérations, une valeur de 0,15. Des études complémentaires permettraient la détermination de sa valeur exacte.

- Toitures vertes semi-intensive et intensive

La valeur de l'albédo d'un gazon est une valeur récurrente de la littérature [Maidment, 1993], elle vaut 0,25.

- Toiture bac

Dans le cas de ce modèle, l'albédo choisi est celui d'une surface d'eau libre, il vaut donc 0,05 [Maidment, 1993].

B. La teneur en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au point de flétrissement

Le pF est une notion introduite par Schofield [1935]. Il s'agit de la transformation logarithmique en base 10 du potentiel de capillarité d'un sol. Les courbes de pF, obtenues à l'aide de l'appareil de Richards ou d'un potentiomètre, nous donnent la relation entre le potentiel matriciel et la teneur en eau du sol [Richards, 1928]. Ces courbes présentent des points particuliers tels que la capacité au champ et le point de flétrissement.

- La capacité au champ correspond à la teneur en eau du sol lorsque toute l'eau gravitaire s'est écoulée. Le pF correspondant à la capacité au champ dépend d'un sol à l'autre.
- Le point de flétrissement, quant à lui, est égal à la teneur en eau pour $pF = 4,2$. Les plantes ne sont pas capables d'extraire l'eau en-dessous de cette teneur en humidité, l'eau étant trop fortement retenue par le sol.

La différence entre ces deux valeurs nous fournit la quantité d'eau égale à la réserve utile en eau. Celle-ci est donc définie comme la portion d'eau non gravitaire dans le sol qui peut être utilisée par les plantes pour leurs besoins.

Pour modéliser correctement le comportement des toitures vertes, nous devons connaître ces différentes valeurs, qui vont intervenir dans le retardement et le stockage de l'eau de pluie. Nous avons donc effectué des mesures au laboratoire d'Hydrologie et d'Hydraulique agricole (FUSAGx) avec l'appareil de Richards sur des échantillons de substrat (fournis par Tecmat). Les échantillons étaient au nombre de douze : six pour le

substrat de type extensif, et six pour le substrat intensif (le type de substrat est généralement identique pour les toitures semi-intensives et intensives).

Nous allons brièvement décrire le déroulement des mesures avec l'appareil de Richards avant de présenter les résultats obtenus.

Les mesures nécessitent la préparation des échantillons. Le substrat est placé dans un anneau volumétrique de volume connu (100 cm³), et les échantillons sont mis à saturation par humectation ascendante (cf. figure 20).



Figure 20 : Echantillons mis à saturation [Auteur : Becquevort , 2007].

Ils sont ensuite placés dans une casserole à pression réglable, sur une plaque poreuse (cf. figure 21). Les échantillons ont été répartis dans deux casseroles, chacune contenant trois échantillons des deux types. La casserole est fermée et portée à la pression désirée. Lorsque l'équilibre est atteint (plus de sortie d'eau), les échantillons sont sortis et pesés.

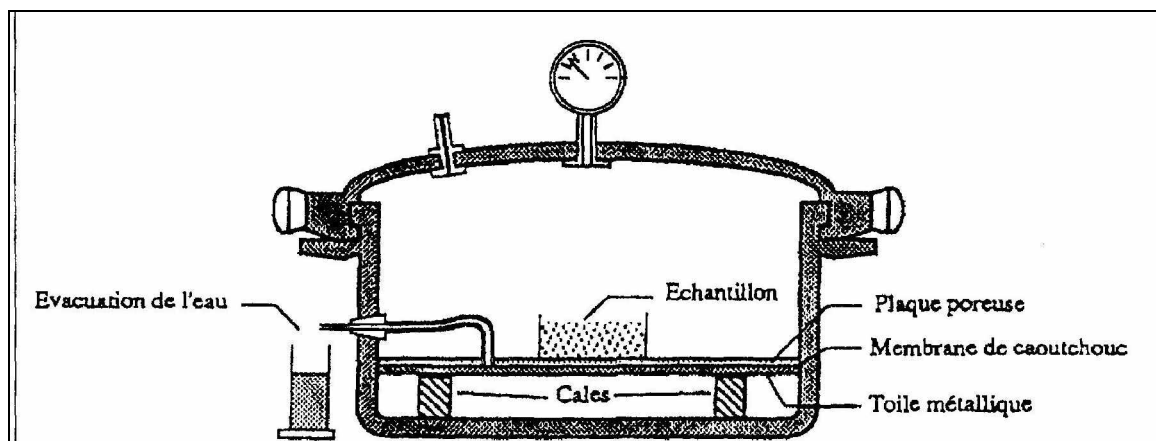


Figure 21 : Représentation schématique de l'appareil de Richards [Source : Dautrebande, 2004].

Cette opération est répétée pour des pressions croissantes, jusqu'à la pression correspondant au pF de 4,2 (15 000 cm de colonne d'eau). Les échantillons sont alors placés à l'étuve puis pesés, afin de déterminer leurs poids secs. Les différentes pesées permettent de tracer les points de la courbe pF-teneur en eau.

Les courbes obtenues pour nos échantillons sont représentées à la figure 22 :

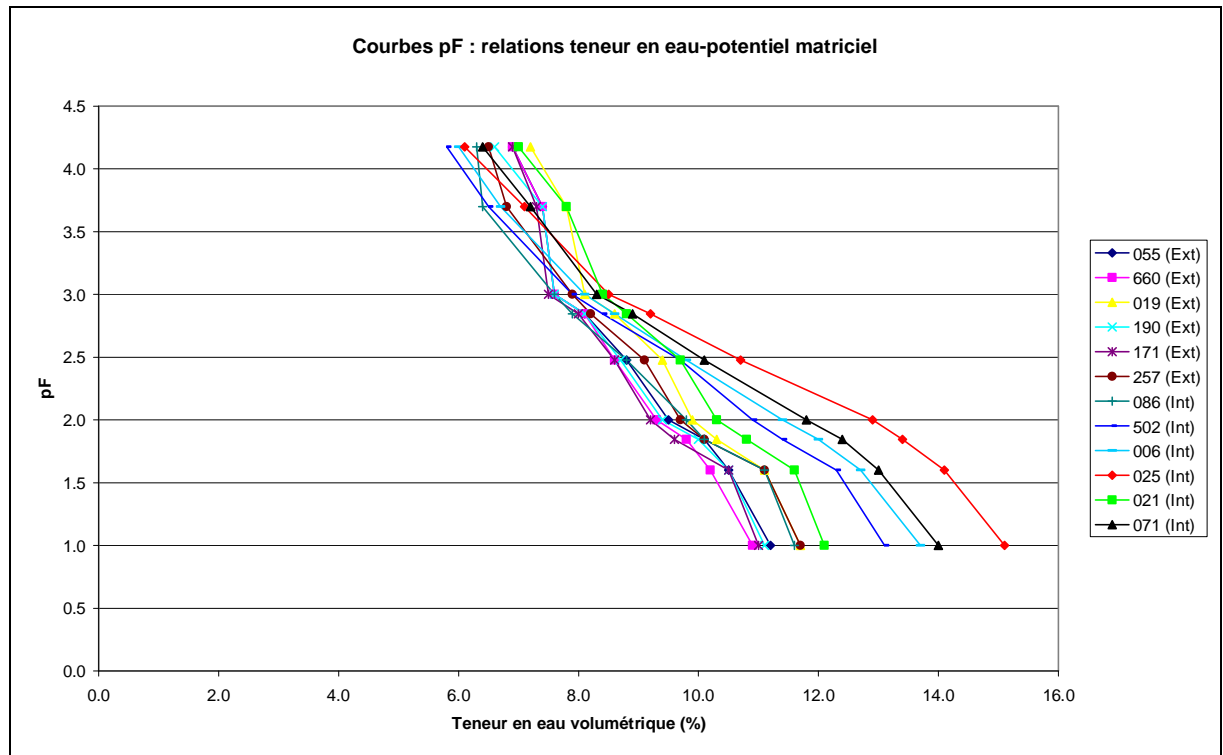


Figure 22 : Courbes de pF des 12 échantillons analysés.

Les valeurs acceptées des points particuliers sont les moyennes des différents échantillons. Ces résultats exprimés en pourcentage volumétrique sont résumés au tableau 3.

Tableau 3 : Teneur en eau volumétrique et moyenne des différents échantillons.

Echantillons extensifs	055	660	019	190	171	257	Moyenne
Teneur en eau à la capacité au champ (%)	9,5	9,3	9,9	9,4	9,2	9,7	9,5
Teneur en eau au point de flétrissement (%)	6,9	6,9	7,2	6,6	6,9	6,5	6,8
Eau utile (%)	2,6	2,4	2,7	2,8	2,3	3,2	2,7

Echantillons intensifs	086	502	006	021	071	Moyenne
Teneur en eau à la capacité au champ (%)	9,8	10,9	11,4	10,3	11,8	10,8
Teneur en eau au point de flétrissement (%)	6,3	5,8	6,0	7,0	6,4	6,3
Eau utile (%)	3,5	5,1	5,4	3,3	5,4	4,5

Ces résultats, donnés en pourcentage de volume du sol, souffrent d'une légère imprécision. En effet, vu le type de sol déstructuré auquel nous avons affaire, le volume contenu dans les anneaux n'est pas déterminé exactement.

Il convient aussi de noter ici que le profil hydrique du sol n'est pas connu de manière exacte. La détermination de ce profil requiert des mesures du sol en place avec une sonde TDR. Les résultats évoqués dans ce travail doivent donc être interprétés en tenant compte de cette indétermination.

N.B. : Pour le type intensif, l'échantillon n° 025 n'a pas été pris en compte suite à une erreur de manipulation au cours de la mesure.

C. La teneur en eau à saturation

La teneur en eau à saturation est fournie dans les caractéristiques liées au substrat. Pour le Vulkatech®, la valeur annoncée de la teneur en eau volumétrique est de 40% (valeur fournie par IBIC bvba). Grâce aux mesures faites avec l'appareil de Richards et expliquées ci-dessus, nous avons recalculé cette valeur. En faisant la moyenne pour les 6 échantillons de chaque type, nous obtenons 30 et 33% respectivement pour le substrat extensif et intensif. Mais, vu la conductivité hydraulique du substrat considéré, le Vulkatech®, c'est la teneur en eau à la capacité au champ qui est considérée comme déterminante au niveau du stockage.

D. L'émissivité

Sa valeur dépend de la surface considérée. L'émissivité de l'eau varie de 0,99 à 1, tandis que l'émissivité des végétaux varie de 0,95 à 0,99, la valeur de 0,98 étant retenue en général [Kotchi, 2004].

3.1.8. Les paramètres géométriques

Les paramètres communs à tous les modèles sont :

A. La longueur de pente

Il s'agit de la longueur de la toiture selon sa pente.

B. La longueur transverse

Il s'agit de la longueur de la toiture dans le sens perpendiculaire à la pente.

Il convient de distinguer ces deux longueurs qui auront une influence sur le volume de la toiture bac, et sur la longueur du parcours de l'eau dans le substrat pour les toitures vertes.

C. La pente

La pente doit respecter certaines limites propres à chaque type de toiture. Ces limites et les adaptations qui leur sont liées varient d'un constructeur à l'autre.

- Toiture verte extensive

La pente n'a pas d'influence sur le volume de stockage, mais plutôt sur le temps de stockage. En effet, plus un toit sera pentu, plus vite s'évacuera l'eau en excès. Dans la pratique, pour une pente supérieure à 10%, on ne placera pas de couche de drainage sous le substrat, ceci afin de ralentir le parcours de l'eau [Tecmat, 2005]. Le modèle prendra donc la pente en compte en ce sens lors des simulations.

- Toitures vertes semi-intensives et intensives

Dans le cas de toitures vertes semi-intensives et intensives, la pente est un facteur limitant plus important à l'installation que dans le cas des toitures vertes extensives. Malgré le fait que les toitures semi-intensives peuvent théoriquement être installées sur des toits en pente supérieure à 10%, on considère qu'une couche de drainage sera toujours présente, celle-ci devant servir alors de couche de stockage [Tecmat, 2005].

- Toiture bac

La pente peut varier de 0,1 à 5% au maximum en ce qui concerne les toitures bacs.

- La hauteur

Il s'agit du niveau d'implantation des trop-pleins, qui déterminera la capacité de stockage temporaire pour la toiture bac, et de l'épaisseur de substrat pour les toitures vertes.

3.2. Développement des modèles hydrologiques

3.2.1. Choix de l'interface de modélisation

Les modèles développés dans ModelMaker 4.0 ont été comparés à des calculs manuels réalisés dans Excel. Plusieurs défauts ont été constatés dans les simulations réalisées avec ModelMaker. D'une part, dès que le modèle se complexifie, des écarts croissants sont constatés entre les valeurs journalières obtenues dans Excel et dans ModelMaker. Les résultats cumulés sont semblables (écarts de quelques mm pour un an), mais certains jours les valeurs peuvent différer jusqu'à une quinzaine de mm (cf. figure 23). Ces différences résultent du fait que ModelMaker intègre les relations mathématiques liées aux compartiments. D'autre part, ModelMaker n'attribue jamais comme résultat d'une soustraction la valeur zéro. Ceci probablement dans le but d'éviter ultérieurement une division par zéro dans la simulation. Ces défauts posent deux problèmes importants pour les résultats que nous souhaitons obtenir :

- les courbes de sortie sont lissées, on ne voit donc pas les variations escomptées qui sont fortement atténuées ;
- si l'on décide de simuler sur un pas de temps différent ou pour des années successives, les valeurs pour un jour identique (par exemple le 10 janvier) ne seront pas les mêmes dans les deux cas.

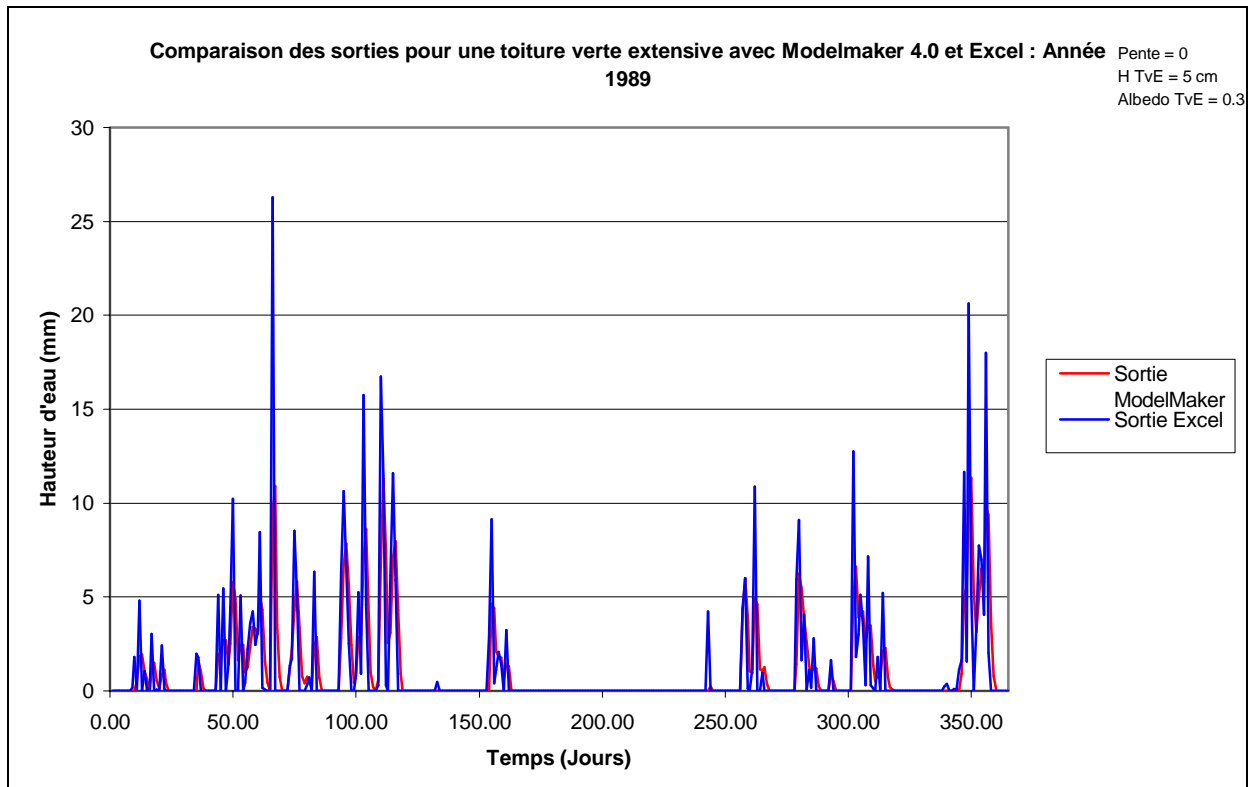


Figure 23 : Comparaison des sorties d'une toiture verte extensive pour Excel et ModelMaker, exemple de l'année 1989.

A la vue de ces constatations, ModelMaker n'apparaît pas comme un outil de programmation performant pour l'application dont il est question ici ; les modèles ont donc été développés dans Visual Studio 2005.

3.2.2. Présentation des modèles hydrologiques

La page de lancement de l'interface utilisateur (cf. figure 24) permet de choisir le type de toiture via des boutons d'options (un choix en exclut un autre) :

- Toiture bac
- Toiture verte extensive
- Toiture verte semi-intensive
- Toiture verte intensive
- Blanco
- Comparaison des différents systèmes

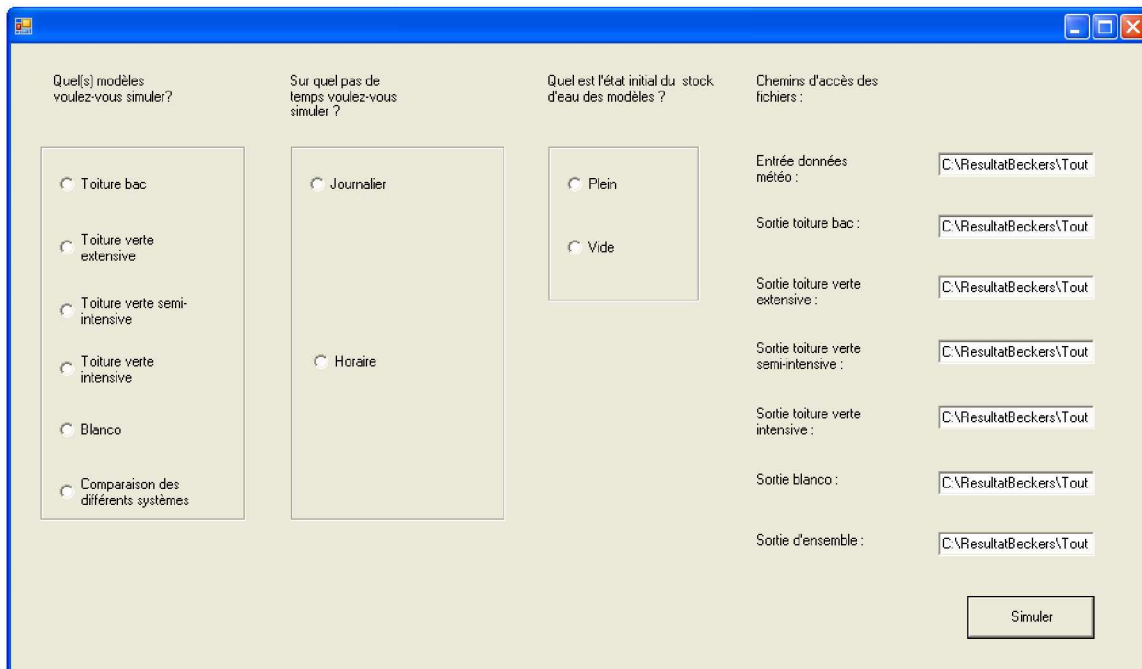


Figure 24 : Interface de démarrage du programme de simulation.

L'option « Blanco » va fournir la sortie d'une toiture classique, dite de référence. Les différents modèles testés peuvent ainsi être comparés à une toiture classique afin d'avoir une échelle de référence. Il consiste simplement à faire ruisseler la pluie à raison de 95% de sa quantité totale.

Le dernier choix, « Comparaison des différents systèmes », fournit les résultats de tous les modèles possibles afin de pouvoir les comparer aisément.

La page de démarrage permet de préciser si les données d'entrée sont au pas de temps horaire ou journalier, ce choix définira automatiquement le même pas de temps pour les données de sortie. Il convient de préciser ici que l'utilisation d'un pas de temps journalier fournit des résultats peu pertinents de manière générale, mais encore plus particulièrement pour la toiture bac. En effet, si l'on prend en compte le débit de fuite sur une journée, cela veut dire qu'on considère que la quantité de pluie tombée, en par exemple une heure, aura toute la journée pour s'évacuer par la sortie calibrée, alors que le trop-plein devra peut-être remplir son rôle si une pluie d'une forte intensité et de faible durée s'abat. Ceci biaise la simulation journalière de manière importante. La réalisation de simulations au pas de temps journalier n'est donc pas réaliste pour le problème des averses intenses.

Les chemins d'accès aux différents fichiers de données d'entrée (cf. paragraphe 3.1.) et de sortie produits lors des simulations sont encodés dans des boîtes de texte.

On peut également choisir, via cette première interface, si les stocks d'eau des différents modèles sont initialement pleins ou vides. Le stock est égal à zéro pour le choix « vide », le choix « plein » correspondant à la capacité au champ ou à la capacité maximale de stockage selon que l'on considère respectivement une toiture verte ou une toiture bac.

Selon le modèle choisi, la page d'encodage des paramètres y afférant apparaîtra lors du clic sur le bouton « simuler ».

Les paramètres n'apparaissant pas sur ces pages sont considérés comme identiques pour les différents modèles et sont définis comme des constantes dans le programme. Il s'agit de la constante psychrométrique et de la chaleur latente de vaporisation.

La pente et l'épaisseur de substrat sont limitées dans leurs valeurs en fonction du modèle que l'on simule (cf. paragraphe 3.1.8.). Les valeurs limites sont celles issues du tableau 1, et le dépassement d'une de celles-ci provoque l'apparition d'un message d'erreur fournissant l'intervalle correct et déclenchant la fin de la procédure. L'utilisateur devra donc encoder une valeur acceptée par le modèle pour pouvoir continuer la simulation.

A. Toitures vertes

- **Toiture verte extensive**

Les paramètres à encoder dans le modèle sont illustrés à la figure 25 :

Paramètres liés à la toiture considérée :		Paramètres physiques (par défaut) :	
Longueur de pente (m)	10	A (Penman)	0.175
Longueur transverse (m)	10	B (Penman)	0.184
Epaisseur (m)	0.05	Emissivité	0.98
Pente (%)	2	Albédo du sol nu	0.15
Conductivité hydraulique (cm/s)	0.07	Albédo de la végétation	0.3
Teneur en eau à la capacité au champ (%)	9.5		
Teneur en eau au point de flétrissement (%)	5.8		
Teneur en eau à la saturation (%)	30.1		

Figure 25 : Interface utilisateur d'encodage des paramètres de la toiture verte extensive.

Le modèle, représenté sous forme d'organigramme à la figure 26, comprend les étapes suivantes :

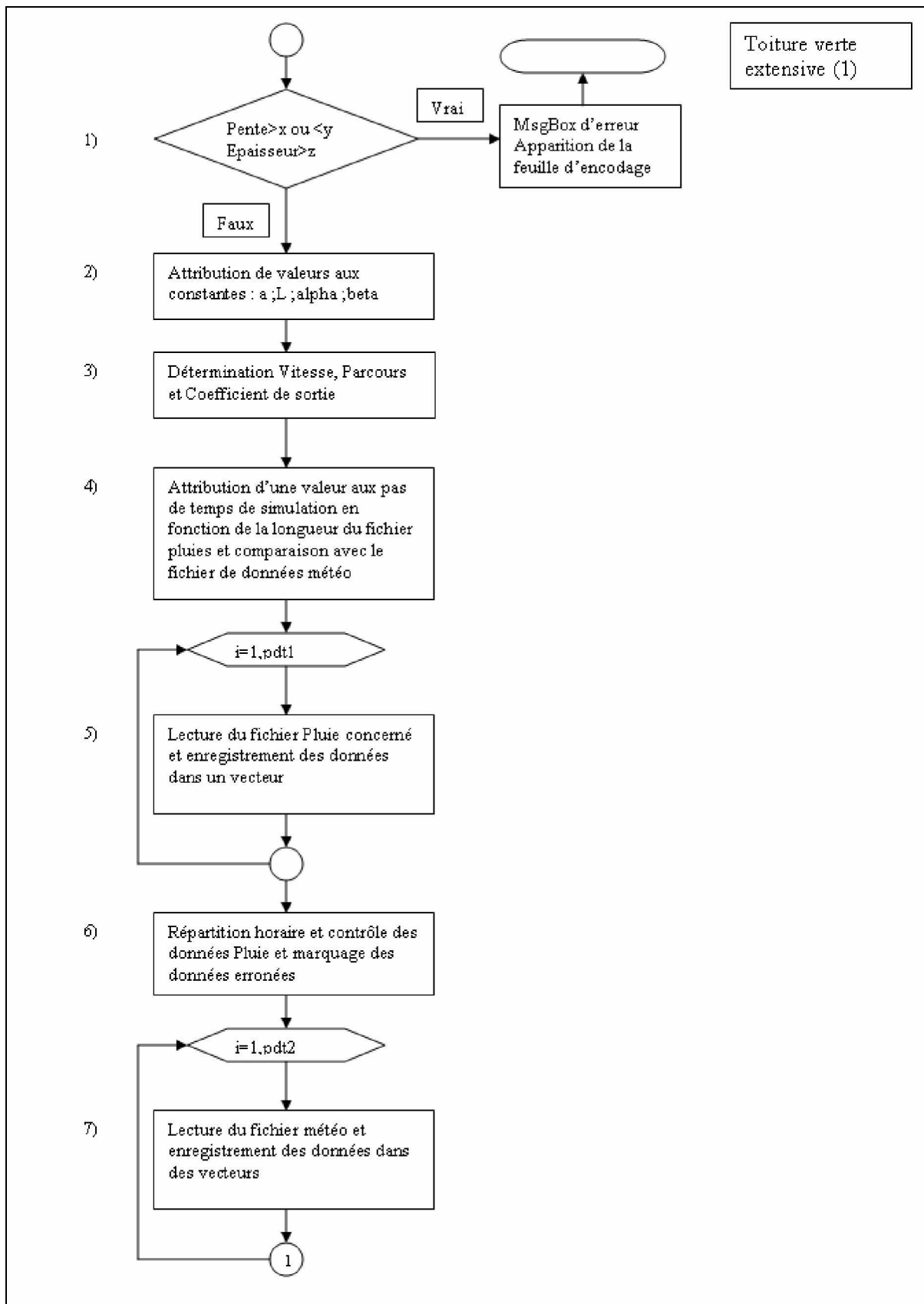


Figure 26 : Représentation schématique des étapes du modèle toiture verte extensive.

1. Test de validité des paramètres

Si, dans les paramètres à encoder, la pente est inférieure à 2% ou supérieure à 70%, ou si l'épaisseur est supérieure à 10 cm, un message d'erreur contenant les valeurs acceptables apparaît. La feuille d'encodage des paramètres est alors à nouveau disponible pour effectuer les changements. Tant que les valeurs ne sont pas correctes, la procédure n'est pas lancée.

2. Attribution d'une valeur aux constantes

On définit la valeur des constantes a , L , α et β . Ces valeurs ont été présentées au paragraphe 3.1.2.

3. Détermination de la vitesse de parcours et de la longueur de parcours permettant l'obtention d'un coefficient de sortie

La vitesse à laquelle l'eau en excès est évacuée et le chemin emprunté par l'eau dépendent de la valeur de la pente. Dans la pratique [Tecmat, 2005], pour une pente supérieure à 10%, la couche de drainage est retirée, afin d'obliger l'eau à se déplacer au sein même du substrat et donc d'augmenter son temps de séjour sur la toiture (afin de satisfaire le besoin en eau des plantes). La vitesse dans le substrat est considérée comme valant la projection de la vitesse verticale c'est-à-dire la conductivité hydraulique à saturation. C'est une approximation de la vitesse réelle, car l'eau va probablement se déplacer le long du géotextile, avec un frottement différent qu'au sein du substrat. Néanmoins, cette approximation se situe certainement dans les mêmes ordres de grandeur que la vitesse réelle. Le parcours sera la distance verticale de substrat pour des pentes inférieures à 10% (présence de la couche de drainage), et la longueur de pente pour des pentes supérieures.

La vitesse est considérée constante et égale à la conductivité hydraulique à saturation. Il s'agit d'une simplification, car la vitesse de l'eau au sein du substrat varie avec la teneur en eau de celui-ci (la vitesse augmente avec la teneur en eau).

Ces deux valeurs, vitesse et parcours, permettent d'introduire une variable appelée coefficient de sortie. Celle-ci, inférieure ou égale à 1, va multiplier la valeur du flux de sortie pour rendre compte d'un éventuel effet de retard. Il s'agit de répartir dans le temps l'évacuation de l'eau en excès et de l'eau gravitaire.

4. Détermination et comparaison de la longueur des fichiers

Le fichier des données pluviométriques est lu afin de déterminer la longueur de simulation. Sa longueur est ensuite comparée à celle du fichier de données météorologiques, afin de prévenir une éventuelle erreur lors de l'encodage des données (décalage, oubli d'une partie des données).

5. Lecture et enregistrement des données de pluie

Lecture et enregistrement dans un vecteur des données de pluie, horaires et journalières pour une simulation horaire, mais uniquement journalières pour une simulation journalière (cf. point 6).

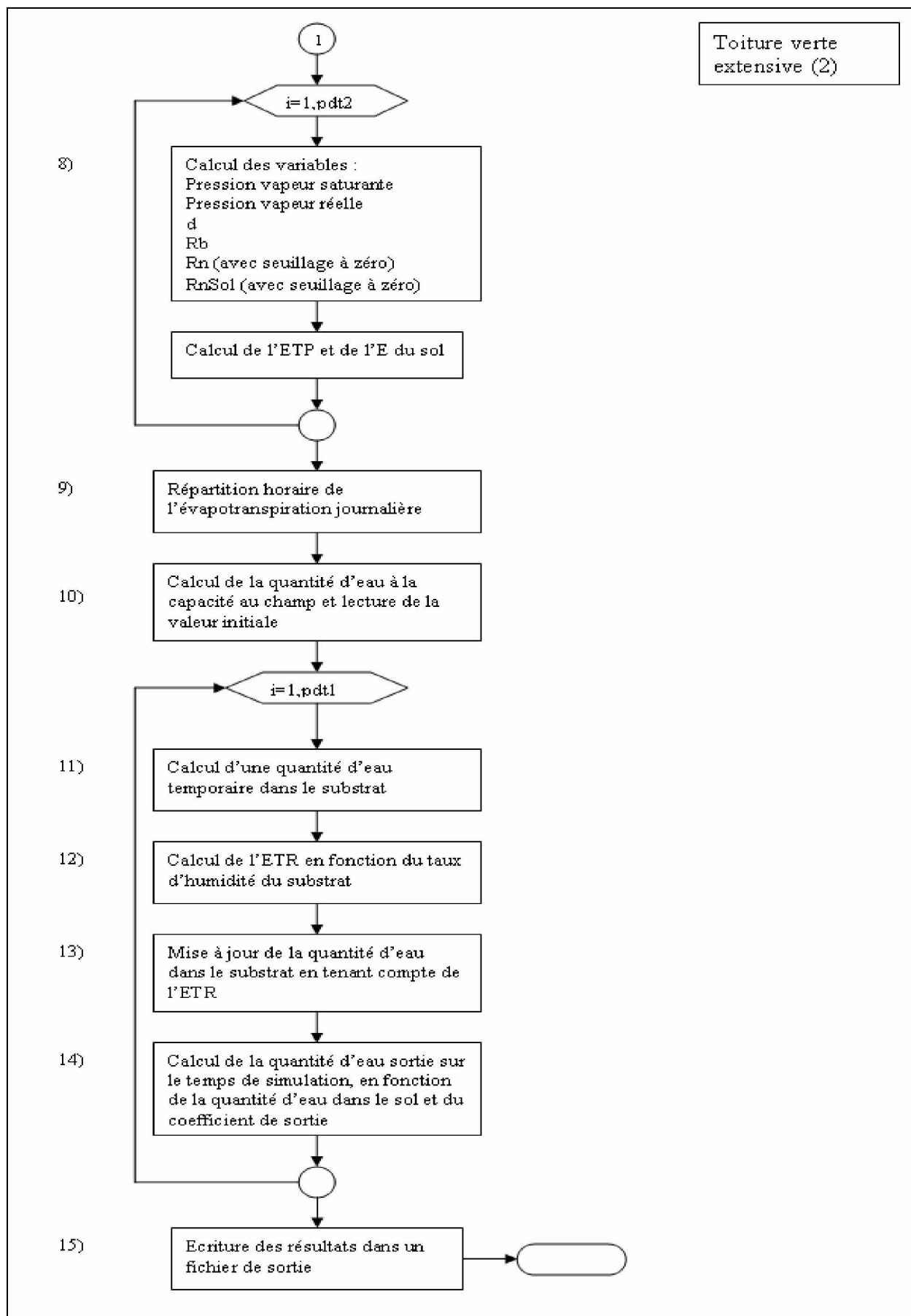


Figure 26 bis : Représentation schématique des étapes du modèle toiture verte extensive.

6. Contrôle des données et marquage des données horaires erronées

Certaines données de pluies ne sont pas valables (dysfonctionnement du matériel) ou n'ont tout simplement pas été mesurées pendant un certain laps de temps. Dans ce cas, dès que, sur une journée, une valeur n'est pas valable (elle doit être notée égale à 99,9), la mesure de la pluie journalière est répartie de manière égale sur les 24 heures. Il n'existe pas de modèle statistique concernant la répartition de la pluie par heure en fonction de la saison, mais cette manière de répartir la pluie constitue une bonne approximation pour les périodes hivernales. Par contre, elle risque de s'écarter fort de la réalité en ce qui concerne l'été (présentant de grosses averses plutôt qu'une pluie faible et relativement constante). Nous avons préféré prendre en compte la présence d'un apport à la toiture permettant la continuité de l'évaluation des termes du bilan hydrologique tels que l'évaporation, plutôt que de considérer une absence de pluie ou l'arrêt et la reprise de la simulation.

Ces données calculées à partir des données journalières sont alors marquées, une colonne étant prévue à cet effet dans les données de sortie. Lorsqu'une donnée a été transformée, le chiffre 1 est indiqué en parallèle de cette donnée. Ceci afin de mettre en évidence leur caractère falsifié et donc leur influence peut-être inexacte sur la sortie.

7. Lecture et enregistrement des données météorologiques

La liste exhaustive de ces données a été fournie au paragraphe 3.1.

8. Calcul des variables intermédiaires et de l'ETP

La différence entre le rayonnement net pour la végétation (R_n) et le rayonnement net du sol (R_{nSol}) est la valeur de leur albédo. On calcule donc deux valeurs d'évapotranspiration potentielle, celle du sol et celle des végétaux qui ne diffèrent que par la valeur du rayonnement net. Dans les deux cas, si le rayonnement est négatif, il est mis à zéro (cf. paragraphe 3.1.2.).

9. Répartition horaire de l'ETP

Si la simulation est horaire, on répartit la valeur journalière de l'évapotranspiration en fonction des heures de la journée, selon le schéma du paragraphe 3.1.2.

10. Calcul de la quantité d'eau à la capacité au champ et lecture de la valeur initiale du stock

La capacité au champ est à encoder en pourcentage du volume de substrat. En effet, l'épaisseur de substrat est un paramètre d'entrée de la toiture, alors que le poids volumique ne l'est pas. Cette valeur va déterminer la part de la pluie qui est retenue. Une fois le substrat à la capacité au champ, toute l'eau supplémentaire va s'écouler dans le substrat ou atteindre la couche de drainage à une vitesse égale au coefficient de perméabilité du substrat (cf. paragraphe 3.1.4.).

Afin de se situer du côté de la sécurité au niveau des simulations, on peut simuler en considérant que le substrat est, au temps zéro, à sa capacité au champ. On calcule donc la quantité d'eau présente dans le substrat initialement.

11. Calcul d'un taux d'humidité temporaire dans le substrat

L'ETR ainsi que l'évaporation effective du sol dépendent du taux d'humidité du substrat. Afin de déterminer ces deux valeurs, qui ont également un effet sur le stock d'eau, nous calculons une valeur temporaire du taux d'humidité qui est la somme de la pluie et de l'eau présente dans le substrat au temps précédent.

12. Calcul de l'ETR et détermination de l'évapotranspiration effective

L'ETR est calculée selon l'équation du paragraphe 3.1.2.A. Le choix entre l'évaporation du sol et l'ETR se fait en fonction du niveau de la réserve utile. Selon l'étude de Rezaei et Jarret [2005], le taux d'évapotranspiration sera égal à l'évapotranspiration réelle tant que la réserve utile est d'au moins 40% et égal à l'évaporation du sol dans le cas contraire.

13. Mise à jour de la teneur en eau du substrat

On actualise la quantité d'eau contenue dans le substrat en tenant compte de l'évapotranspiration. Si la quantité d'eau obtenue est négative, le stock est mis à zéro.

14. La sortie

La sortie est égale à la quantité d'eau supplémentaire par rapport à la quantité maximum retenue par le substrat, tout en tenant compte de la répartition dans le temps de l'évacuation de l'eau excédentaire (via le coefficient de sortie, cf. point 3).

15. Ecriture des résultats

Cette étape comprend l'écriture des résultats dans un fichier de sortie et l'avertissement de la fin de la procédure. Nous incluons dans les valeurs de sortie la sortie cumulée de l'eau de toiture.

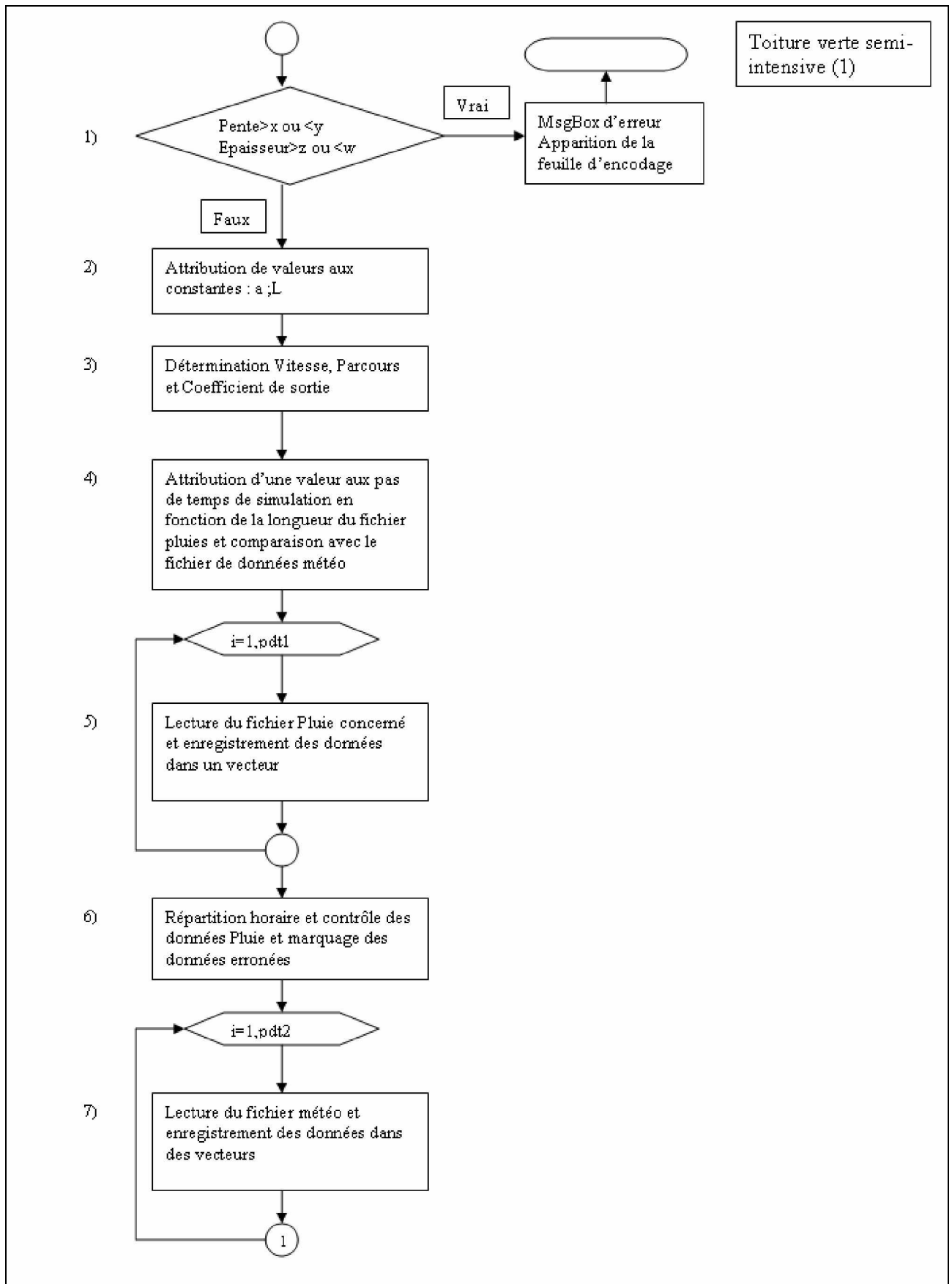


Figure 27 : Représentation schématique des étapes du modèle toiture verte semi-intensive.

- **Toiture verte semi-intensive**

Le modèle est organisé selon la structure de la figure 27. Les paramètres à encoder dans le modèle sont résumés à la figure 28.

Figure 28 : Interface utilisateur d'encodage des paramètres de la toiture verte semi-intensive.

La succession des étapes est la suivante :

- 1. Test de validité des paramètres**

Si dans les paramètres à encoder la pente est inférieure à 2% ou supérieure à 50%, ou si l'épaisseur est inférieure à 10 cm ou supérieure à 25 cm, un message d'erreur contenant les valeurs acceptables apparaît.

- 2. Attribution d'une valeur aux constantes**

On définit la valeur des constantes a et L. Ces valeurs ont été présentées au paragraphe 3.1.2.

- 3. Détermination de la vitesse de parcours et de la longueur de parcours permettant l'obtention d'un coefficient de sortie**

La vitesse à laquelle l'eau en excès est évacuée et le chemin emprunté par l'eau dépendent ici encore de la valeur de la pente. Le parcours sera égal à la distance verticale de substrat et la vitesse, projetée selon la pente, est adaptée au pas de temps. Le coefficient de sortie dépend, comme précédemment, de la vitesse et du parcours de l'eau.

Les étapes 4 à 7 et sont identiques à celles du modèle toiture verte extensive.

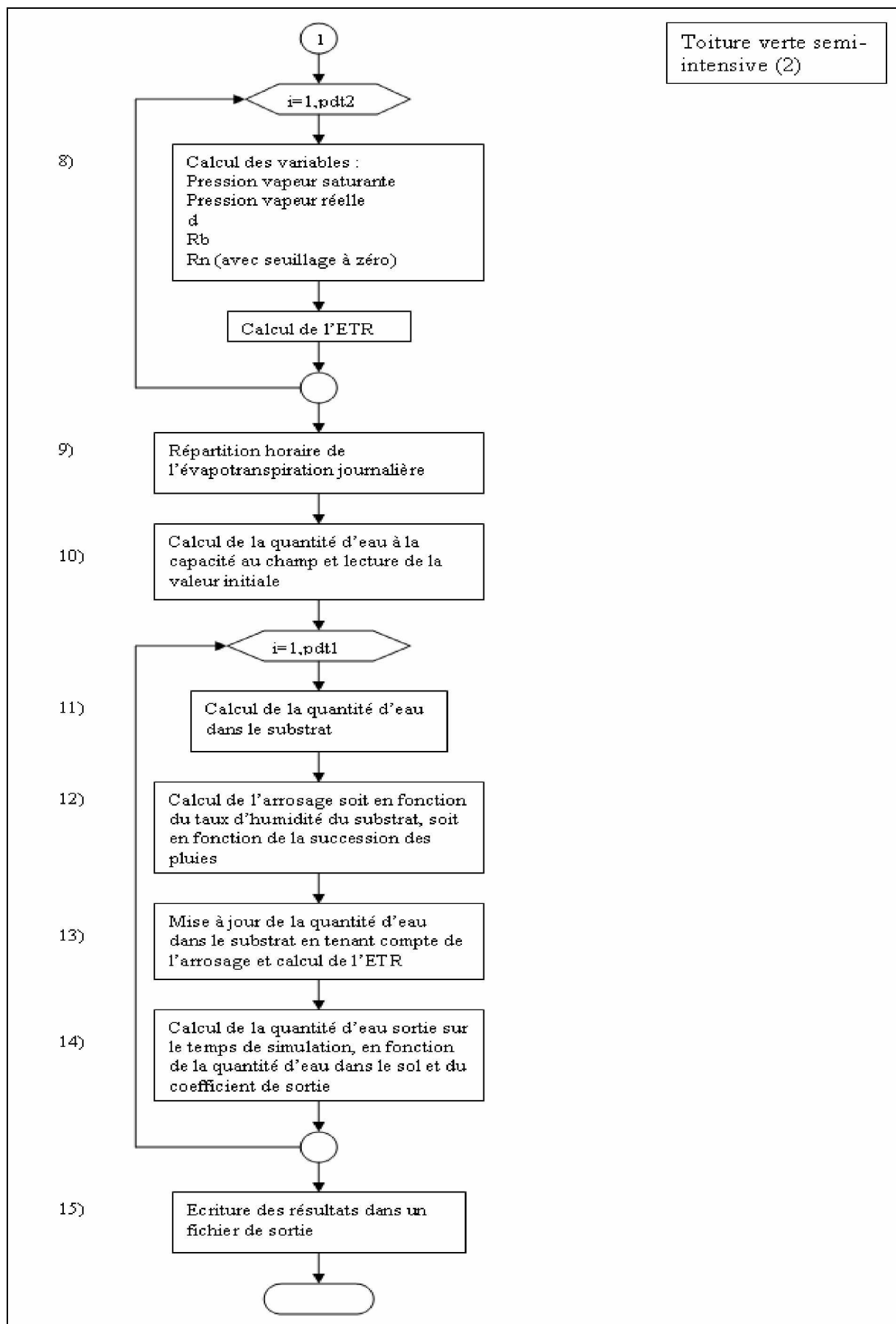


Figure 27 bis : Représentation schématique des étapes du modèle toiture verte semi-intensive.

8. Calcul des variables intermédiaires et de l'ETP

Dans ce cas, la variable $RnSol$ n'est pas calculée, le modèle de calcul de l'ETR n'étant pas semblable (cf. paragraphe 3.1.2.B.).

9. Répartition horaire de l'ETP.

10. Calcul de la quantité d'eau à la capacité au champ et lecture de la valeur initiale.

11. Calcul d'un taux d'humidité temporaire dans le substrat

On calcule temporairement la quantité d'eau dans le substrat comme le bilan entre le stock et la pluie. Dans ce cas, c'est l'arrosage qui peut être fonction de la teneur en eau du substrat.

12. L'arrosage

Comme expliqué au paragraphe 3.1.1., l'arrosage peut dépendre de la quantité d'eau dans le substrat (dans le cas d'un arrosage en fonction de la réserve utile), c'est pourquoi cette étape se situe après un premier bilan du stock d'eau. Afin de ne pas se trouver en conditions de stress hydrique, nous arrosons jusqu'à la capacité au champ lorsque la réserve en eau est inférieure à 50% de la réserve utile (cf. paragraphe 3.1.2.B.).

L'arrosage dépendant des conditions météorologiques, quant à lui, se fait en un jour lorsqu'il n'a pas plu les 6 jours précédents. La quantité appliquée, par contre, sera différente des recommandations habituelles d'entretien des parcs et jardins [Econeau, 2006]. En effet, les 25 mm d'usage ne correspondent pas forcément à la capacité de rétention du substrat considéré. Nous avons donc décidé d'une quantité qui sera fonction de l'épaisseur de substrat, et qui correspondra à la réserve utile en eau.

L'arrosage a lieu uniquement d'avril à septembre compris.

13. Mise à jour de la teneur en eau du substrat

Mise à jour de la quantité d'eau dans le substrat en fonction de l'arrosage et détermination de l'évapotranspiration réelle selon la méthode du paragraphe 3.1.2.B.

14. La sortie

La sortie est égale à la quantité d'eau supplémentaire par rapport à la quantité maximum retenue par le substrat. On tient compte également dans ce cas-ci de la répartition dans le temps de la sortie via le coefficient calculé à l'étape 3.

15. Ecriture des résultats

Cette étape comprend l'écriture des résultats dans un fichier de sortie et l'avertissement de la fin de la procédure. Nous incluons dans les valeurs de sortie la sortie cumulée de l'eau de toiture.

- **Toiture verte intensive**

Les paramètres à encoder dans le modèle sont illustrés à la figure 29.

Figure 29 : Interface utilisateur d’encodage des paramètres de la toiture intensive.

Il ne semble pas utile de développer les étapes du modèle, celles-ci étant identiques à celles du modèle toiture verte semi-intensive. La seule étape à ajouter est le calcul de l’ETR en fonction de l’occupation du sol.

B. Toiture bac

La figure 30 présente la page d’encodage des paramètres de la toiture bac.

Figure 30 : Interface utilisateur d’encodage des paramètres de la toiture bac.

Le modèle de la toiture bac est représenté à la figure 31 de manière schématique.

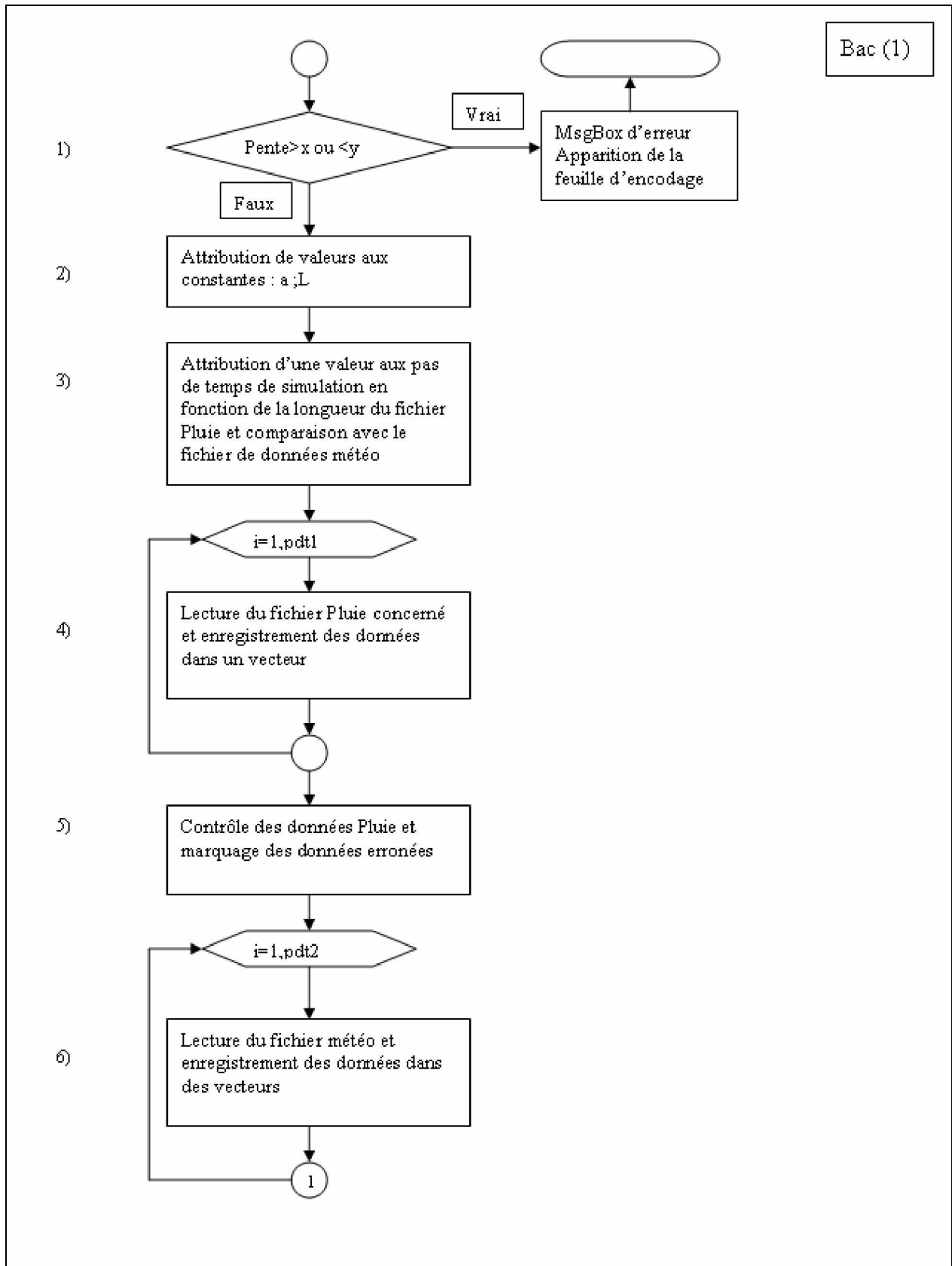


Figure 31 : Représentation schématique des étapes du modèle toiture bac.

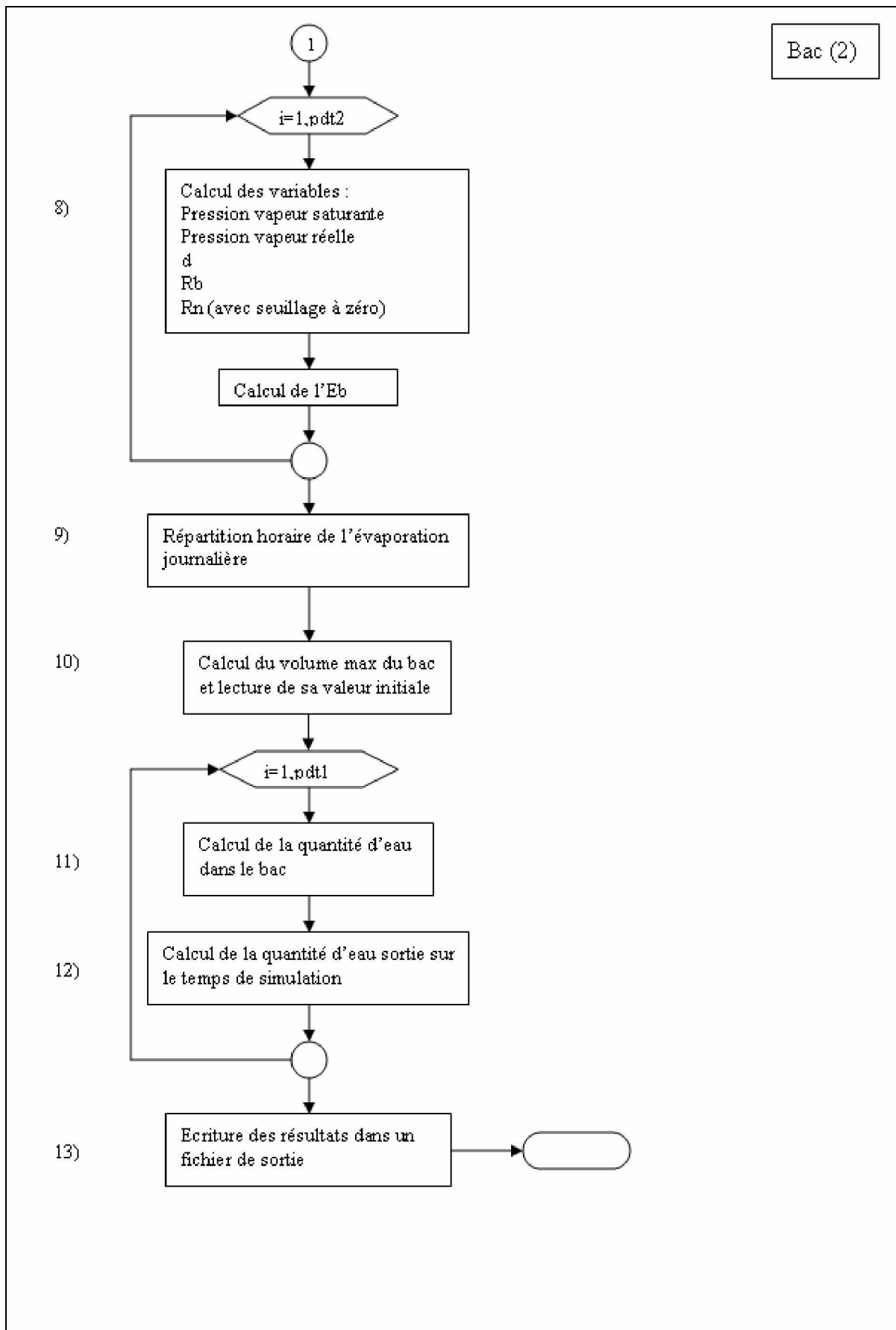


Figure 31 bis : Représentation schématique des étapes du modèle toiture bac.

Les étapes 1 à 9 sont identiques à celles des modèles précédents.

10. Calcul du volume de stockage maximum du bac et lecture de sa valeur initiale

Le volume de stockage du bac dépend des dimensions de la toiture, c'est-à-dire la longueur, la largeur et la pente. En effet, dans ce cas-ci, une augmentation de la pente va de pair avec une diminution du volume.

Le bac peut être initialement plein ou vide. On se laisse une marge de sécurité en le choisissant plein au départ. Dans tous les cas, le bac se vide assez rapidement, et le biais induit vaut au maximum l'épaisseur du bac.

11. Calcul de la quantité d'eau dans le bac

Le stock du bac variera de la quantité des précipitations à laquelle on soustrait l'évaporation de l'eau et le débit de fuite, dans le cas où la valeur des exports est inférieure à celle des apports. Dans le cas contraire, le stock est ramené à zéro.

12. Calcul de la quantité d'eau sortie

Nous distinguons ici les deux sorties du bac (sortie calibrée et sortie par le trop-plein) afin de mettre en évidence leur apport respectif à la sortie totale du bac. La sortie calibrée vaut la quantité de pluie tombée en une heure si son intensité lui est inférieure, sinon elle sera égale à sa valeur maximale qui a été encodée via l'interface.

13. Ecriture des résultats

Cette étape comprend l'écriture des résultats dans un fichier de sortie et l'avertissement de la fin de la procédure. Nous incluons dans les valeurs de sortie la sortie cumulée de l'eau de toiture.

4. Simulations hydrologiques et discussion

Grâce à ces modélisations, nous avons simulé 7 années consécutives de pluie (de 1989 à 1995) au pas de temps horaire, sur les différents types de toiture. Nous présentons les résultats dans les paragraphes qui suivent et concluons quant au comportement de chaque modèle eu égard aux simulations. Les résultats d'un modèle sont exprimés par rapport à la toiture de référence (Blanco).

4.1. Simulations

Les valeurs des paramètres physiques pour chaque type de toiture ont été fixées au paragraphe 3.1.7. Les paramètres géométriques de la toiture ont, quant à eux, été égalés lorsque cela était possible. Il s'agit notamment de la surface de la toiture, ainsi que de la pente dont la valeur a été fixée au minimum recommandé (cf. tableau 1). Ceci afin de rendre les toitures les plus comparables possible.

Les valeurs des paramètres encodées lors des simulations sont reprises dans les tableaux 4 à 7.

- Toiture verte extensive

Tableau 4 : Valeurs des paramètres de la toiture verte extensive.

Epaisseur (m)	0,05
Pente (%)	2
Longueur de pente (m)	10
Longueur transverse (m)	10
Conductivité hydraulique (cm/s)	0,07
Capacité de rétention à saturation (%)	30
Capacité au champ (%)	9,5
Point de flétrissement (%)	6,8

- Toiture verte semi-intensive

Tableau 5 : Valeurs des paramètres de la toiture verte semi-intensive.

Epaisseur (m)	0,1
Pente (%)	2
Longueur de pente (m)	10
Longueur transverse (m)	10
Conductivité hydraulique (cm/s)	0,07
Capacité de rétention à saturation (%)	33
Capacité au champ (%)	10,8
Point de flétrissement (%)	6,3

- Toiture verte intensive

Tableau 6 : Valeurs des paramètres de la toiture verte intensive.

Epaisseur (m)	0,5
Pente (%)	2
Longueur de pente (m)	10
Longueur transverse (m)	10
Conductivité hydraulique (cm/s)	0,07
Capacité de rétention à saturation (%)	33
Capacité au champ (%)	10,8
Point de flétrissement (%)	6,3

- Toiture bac

Tableau 7 : Valeurs des paramètres de la toiture bac.

Hauteur (m)	0,06
Pente (%)	0
Longueur de pente (m)	10
Longueur transverse (m)	10
Débit de fuite (m ³ /h)	0,12

4.2. Résultats

Les résultats ont été transposés en graphique année par année (cf. annexe 9.1. pour les années 1989 et 1995). Plusieurs informations peuvent être dégagées des résultats complets.

4.2.1. Le bilan hydrologique

Le bilan de chaque toiture a été fait sur les 7 ans. Il permet d'évaluer la proportion de chaque terme du bilan par rapport au total. Le bilan pour chaque toiture est résumé au tableau 8.

Tableau 8 : Bilan hydrologique annuel moyen sur 7 ans (1989-95) pour chaque toiture.

	Toiture verte extensive	Toiture verte semi-intensive	Toiture verte intensive	Toiture bac
Pluie (%)	100	65	70	100
Arrosage (%)	/	35	30	/
Sortie ¹³ (%)	67	70	54	88
Evapotranspiration ¹⁴ (%)	33	55	62	12
Réduction ¹⁵ de l'écoulement annuel (%)	32	29	45	10

Nous avons choisi de présenter les résultats des toitures à végétation intensive avec un arrosage qui est fonction de l'état de la réserve utile. En effet, l'arrosage en fonction des conditions météorologiques ne semble pas approprié aux toitures vertes. Nous avons constaté

¹³ La sortie est donnée en pourcentage de pluie uniquement.

¹⁴ L'évapotranspiration est donnée en pourcentage de pluie et d'arrosage

¹⁵ La réduction est calculée par rapport à la sortie du Blanco

que, dans certains cas, la quantité d'eau appliquée est trop importante et engendre des écoulements d'eau supplémentaires. Si l'on regarde la figure 32, on voit en bleu des sorties correspondant à un arrosage excessif de la toiture, son substrat ne se trouvant pas au point de flétrissement mais à un niveau supérieur de son stock.

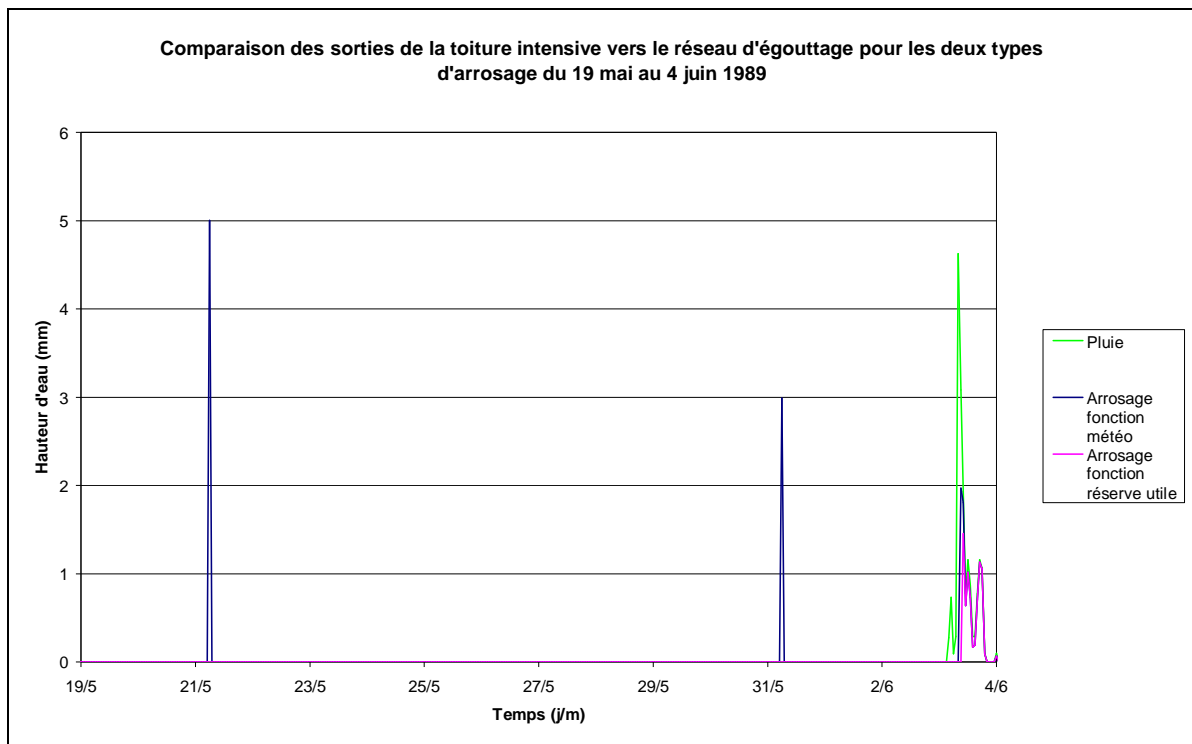


Figure 32 : Ecoulements dus à l'arrosage excessif des toitures à végétation intensive.

Avec ce type d'arrosage, on constate que les toitures se retrouvent souvent en conditions de stress hydrique, pendant environ 900 jours sur les 7 années pour la toiture semi-intensive et de l'ordre de 600 jours pour la toiture intensive, alors que, de par sa définition, l'arrosage en fonction du niveau de la réserve utile n'engendrera aucune sortie supplémentaire, ni ne permettra aux plantes de se retrouver en conditions de stress hydrique.

Le total de chacun des termes du bilan hydrologique fait sur 7 ans a été ramené à une moyenne annuelle pour les deux types d'arrosage et les deux types de toitures (cf. tableau 9).

Tableau 9 : Moyennes annuelles des termes du bilan hydrologique des toitures à végétation intensive en fonction de l'arrosage.

Type d'arrosage	Toiture verte semi-intensive		Toiture verte intensive	
	"Agronomique"	"Météorologique"	"Agronomique"	"Météorologique"
Pluie (mm)	770,5	770,5	770,5	770,5
Arrosage (mm)	412,9	22,5	326,7	112,5
Sortie (mm)	536,5	468,9	413,1	354,8
Evapotranspiration (mm)	646,8	324,0	684,0	528,2

On constate que la quantité d'eau apportée aux toitures avec l'arrosage en fonction des conditions météorologiques est très faible, les sorties (évacuation et évapotranspiration) diminuent, mais c'est la part évapotranspirée qui diminue le plus fortement. Cela confirme donc que ce type d'arrosage entraîne un stress hydrique.

L'arrosage en fonction de la réserve utile a lieu en moyenne tous les deux à trois jours pour une toiture intensive, mais une à deux fois par jour pour les toitures semi-intensives. Ceci représente un travail conséquent et régulier et nécessite une installation automatique d'arrosage. La fréquence de l'arrosage dépend directement de la capacité de stockage des toitures. Une étude approfondie du comportement de l'eau dans le substrat à l'équilibre fournira le profil hydrique du substrat et permettra d'ajuster ces résultats si cela s'avère nécessaire (cf. paragraphe 6.3.).

4.2.2. La réduction des pics

Pour visualiser le comportement des toitures par rapport à un pic de pluie, nous reprenons les 10 pluies d'intensité les plus importantes sur les 7 années, et nous les comparons avec les sorties correspondantes des toitures. Les résultats sont présentés aux tableaux 10 à 13. Nous avons également tracé les droites de Gumbel [1958] (cité par Dautrebande [2005]) pour chaque toiture en prenant le débit maximum de chaque année. Ces droites sont représentées à la figure 33.

- Toiture verte extensive

Tableau 10 : Réduction des pics pour la toiture verte extensive.

Débits maximaux (mm/h)	Sortie (mm/h)	Réduction du pic (%)
22,9	22,9	0,0
22,6	22,0	2,8
16,9	16,8	0,4
13,1	8,2	37,2
12,7	12,4	2,5
12,6	12,0	4,5
12,6	7,7	39,1
11,2	11,2	0,1
11,1	6,3	42,9
10,9	10,9	0,0
Moyenne (%)	/	13,0

- Toiture verte semi-intensive

Tableau 11 : Réduction des pics pour la toiture verte semi-intensive.

Débits maximaux (mm/h)	Sortie (mm/h)	Réduction du pic (%)
22,9	22,9	0,1
22,6	22,6	0,1
16,9	16,8	0,8
13,1	10,8	17,8
12,7	11,9	6,2
12,6	12,6	0,1
12,6	11,6	7,6
11,2	10,4	7,3
11,1	9,5	14,1
10,9	10,9	0,1
Moyenne (%)	/	5,4

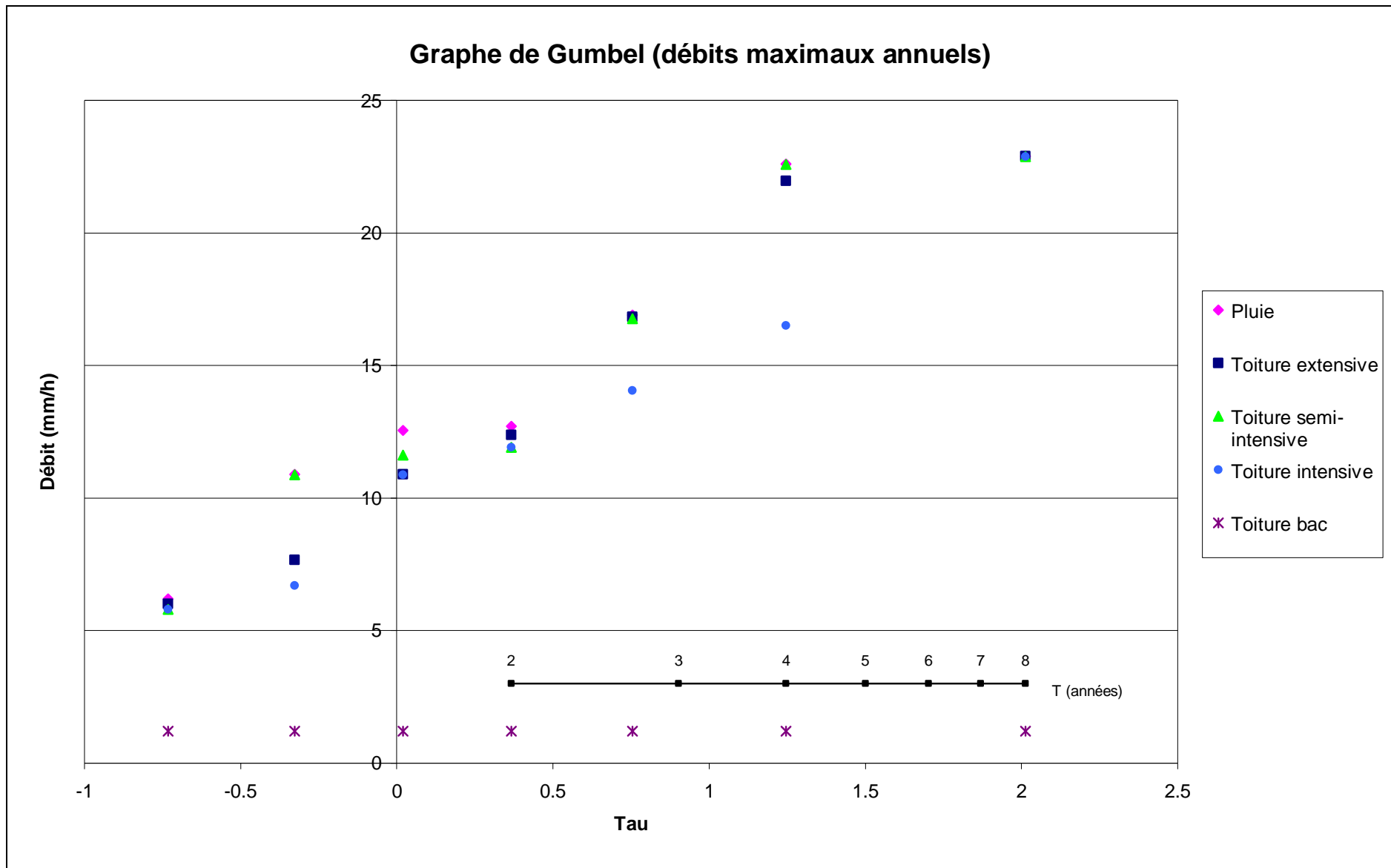


Figure 33 : Représentation des débits maximaux dans un graphe Gumbel pour chaque toiture.

- Toiture verte intensive

Tableau 12 : Réduction des pics pour la toiture verte intensive.

Débits maximaux (mm/h)	Sortie (mm/h)	Réduction du pic (%)
22,9	22,9	0,1
22,6	16,5	27,0
16,9	14,0	16,9
13,1	4,8	63,6
12,7	11,9	6,2
12,6	11,7	7,0
12,6	2,1	83,1
11,2	10,4	7,3
11,1	5,2	53,4
10,9	10,9	0,1
Moyenne (%)	/	26,5

- Toiture bac

Tableau 13 : Réduction des pics pour la toiture bac.

Débits maximaux (mm/h)	Sortie (mm/h)	Réduction du pic (%)
22,9	1,2	94,8
22,6	1,2	94,7
16,9	1,2	92,9
13,1	1,2	90,8
12,7	1,2	90,6
12,6	1,2	90,5
12,6	1,2	90,5
11,2	1,2	89,3
11,1	1,2	89,2
10,9	1,2	89,0
Moyenne (%)	/	91,2

Au niveau des toitures vertes, on remarque que la réduction du pic n'est pas liée à la quantité de pluie tombée.

La figure 33 nous montre l'évolution du comportement des toitures en fonction de la période de retour de la pluie. On constate que le coefficient d'écoulement des toitures vertes extensives et semi-intensives augmente pour des pluies de période de retour plus importante. L'évolution des sorties de la toiture intensive est parallèle à celle de la pluie, son comportement ne varie donc pas en fonction de la période de retour de la pluie considérée. Pour la toiture bac, par contre, on observe une divergence due à la constance de la sortie de cette toiture.

4.2.3. Indicateurs divers

Il est intéressant de noter la proportion de certains événements sur les 7 années. Ces chiffres sont résumés au tableau 14.

Tableau 14 : Indicateurs divers relatifs aux modèles testés.

	Blanco	Extensive	Semi-intensive	Intensive	Bac
Temps de sortie par rapport au temps de pluie (%)	100	54,8	52,4	40,6	89,3
Temps pendant lequel le stock est à son minimum (%)	/	34	0	0	96,7
Temps pendant lequel le stock est à son maximum (%)	/	9,9	9,5	7,3	0
Temps d'arrosage (%)	/	/	1,9	0,3	/

On constate que les toitures vertes réduisent plus le nombre des sorties que la toiture bac. Par contre, celle-ci dispose de possibilités de stockage plus fréquemment. On constate également que les toitures semi-intensives sont arrosées environ six fois plus souvent que les toitures intensives.

4.2.4. Analyse graphique

A partir des graphiques annuels, nous avons dégagé des périodes caractéristiques, pendant lesquelles il est intéressant d'observer le comportement des toitures. Il s'agit de deux périodes estivales, l'une caractérisée par un pic de pluie important sur une faible durée (mai 1995), l'autre caractérisée par des pics de pluie moins importants mais successifs (juin 1989) succédant à une longue période de sécheresse. Nous avons également mis en graphique une période hivernale, constituée d'une pluie continue mais de faible intensité (octobre 1993). Les caractéristiques précises de ces pluies sont résumées au tableau 15.

Tableau 15 : Caractéristiques des événements pluvieux analysés.

	Mai 1995	Juin 1989	Octobre 1993
Quantité totale (mm)	35,8	38,9	47,3
Durée totale (h)	9	45	31
Intensité maximale (mm/h)	22,6	4,6	4,7
Temps depuis la dernière pluie (j)	2	20	0
Temps depuis le dernier arrosage I (j)	4	3	/
Temps depuis le dernier arrosage S-I (j)	0	0	/

1. Mai 1995

Les figures 34 à 37 illustrent le comportement des toitures en été pour une pluie d'intensité égale à 22,6 mm/h pendant une heure.

A la figure 34, on voit que la toiture extensive retient les quelques premiers millimètres de pluie, mais ne réduit pas le pic. La pluie du lendemain n'est quasiment pas réduite, le substrat n'ayant pas eu le temps de sécher entre les deux pluies.

La toiture semi-intensive (cf. figure 35) retient les quelques premiers dixièmes de millimètres de pluie et ne réduit absolument pas le pic. Le pic du lendemain est quelque peu diminué.

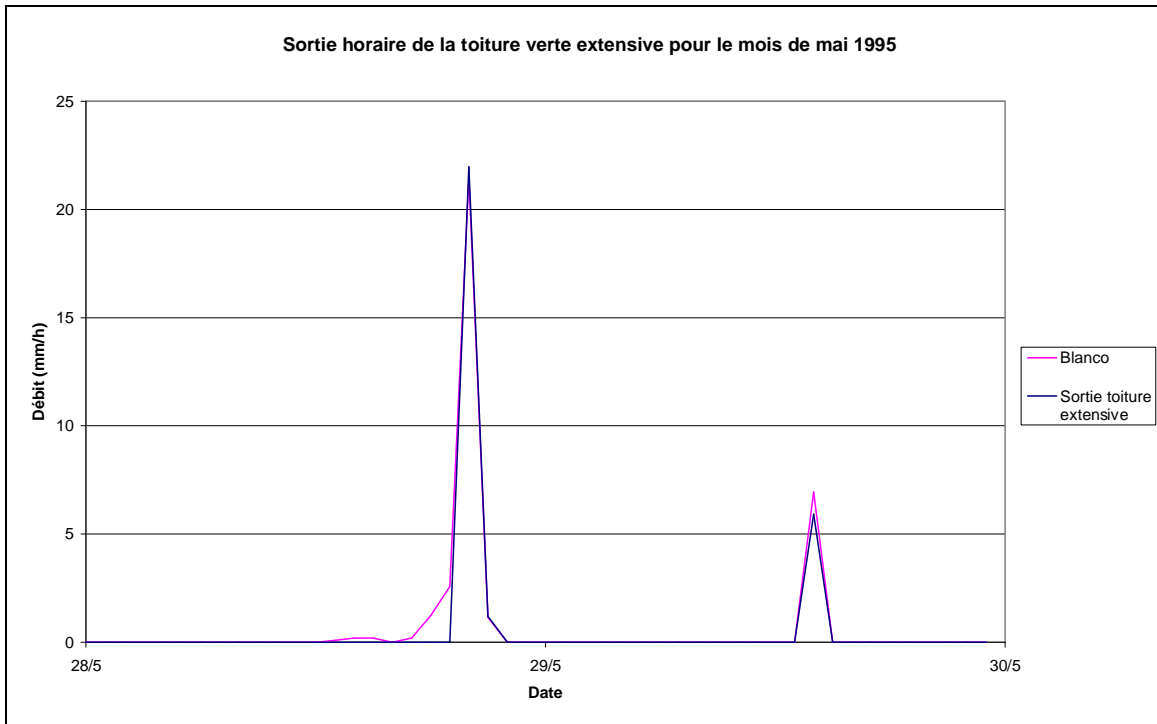


Figure 34 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte extensive (mai 1995).

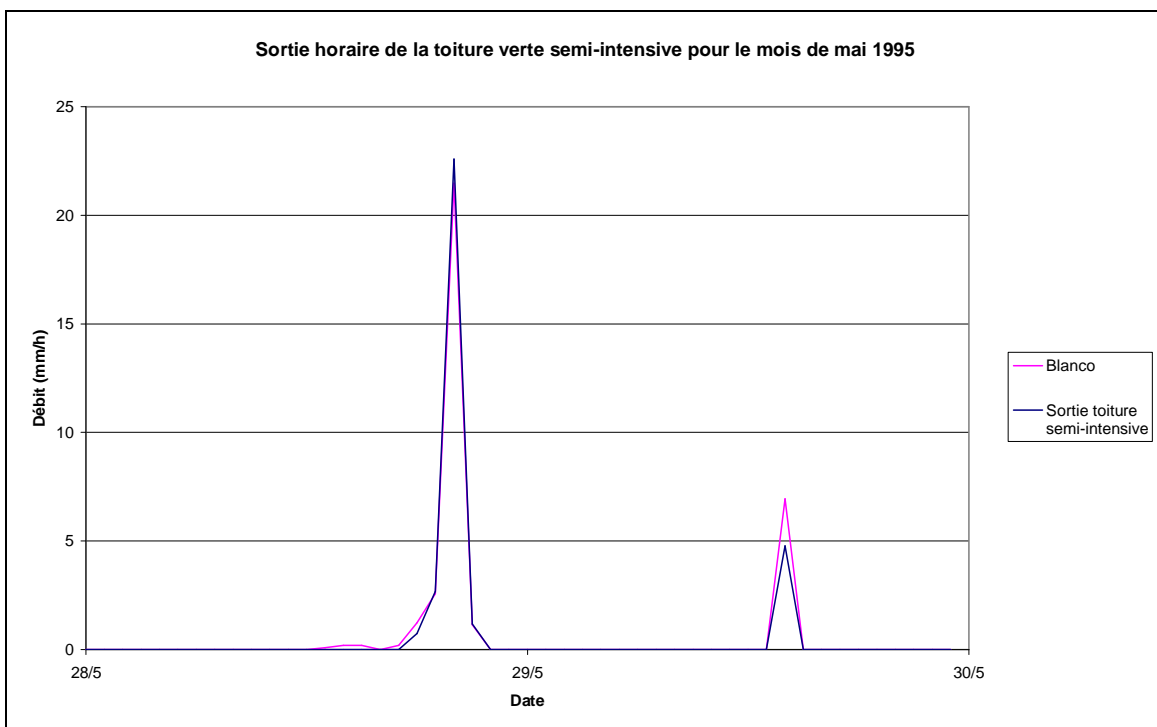


Figure 35 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte semi-intensive (mai 1995).

A la figure 36, on voit que la toiture intensive induit un retard de l'écoulement et absorbe une partie de la pluie, le pic est donc réduit. La pluie du lendemain est seulement en partie retenue.

A la figure 37, on constate que la toiture bac étale les deux pics sur plusieurs heures, en limitant la sortie à 1,2 mm/h.

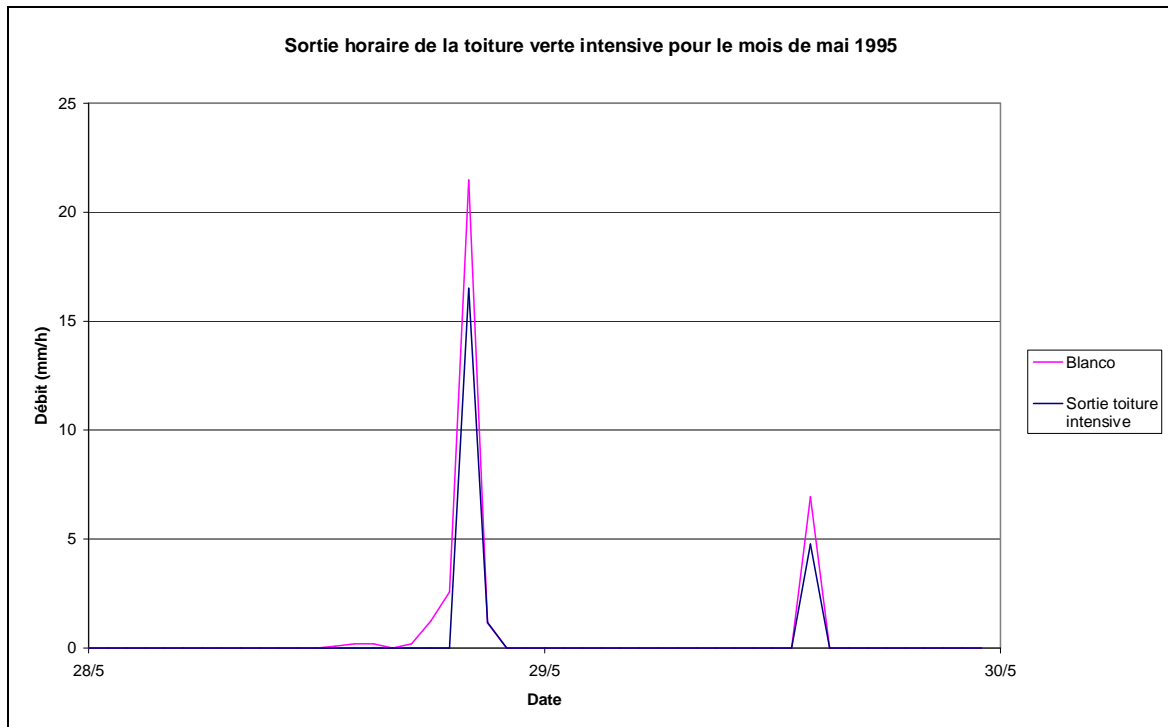


Figure 36 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte intensive (mai 1995).

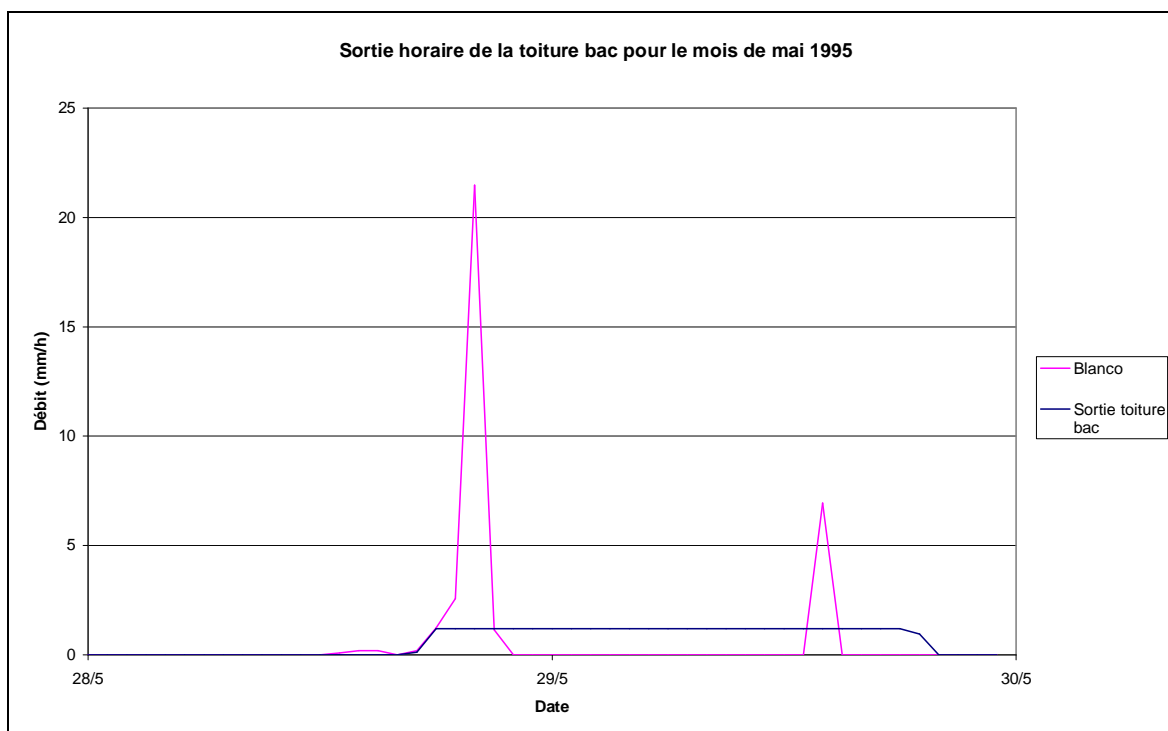


Figure 37 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture bac (mai 1995).

2. Juin 1989

On constate pour la toiture extensive (cf. figure 38) que l'écoulement est parfois retardé, que certains pics sont atténués, et que d'autres sont éliminés. Cela dépend du temps dont dispose la toiture pour sécher entre deux pluies successives.

On observe pour la toiture semi-intensive (cf. figure 39) une faible atténuation de certains pics de pluie, ainsi que quelques retards, mais on mesure une sortie à chaque événement pluvieux.

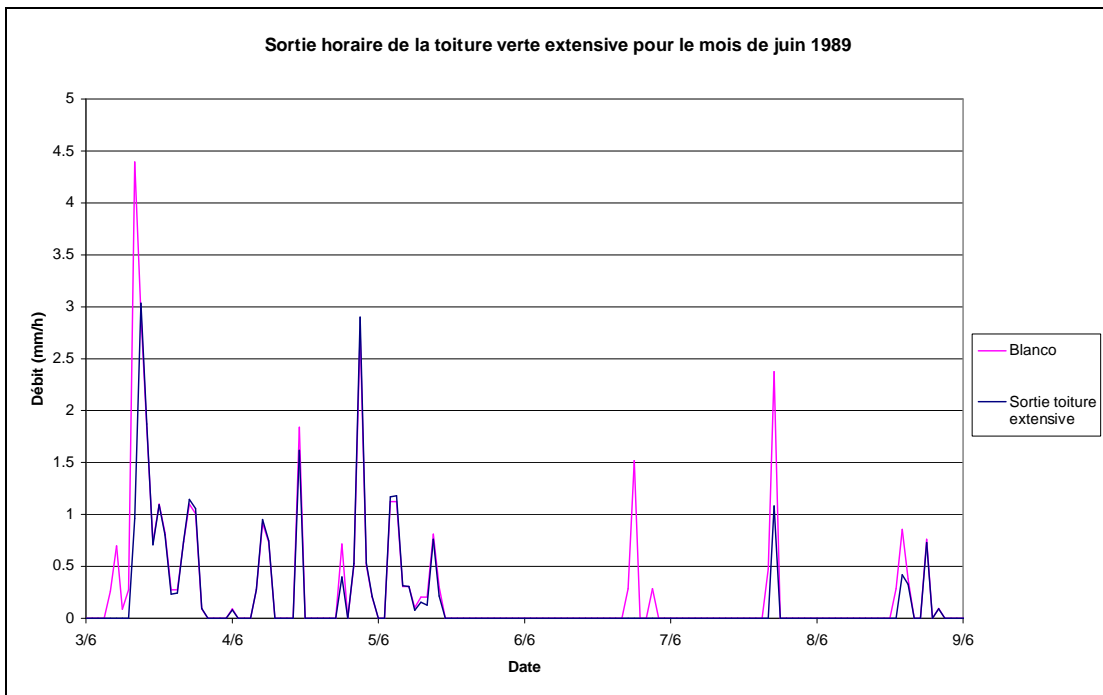


Figure 38 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte extensive (juin 1989).

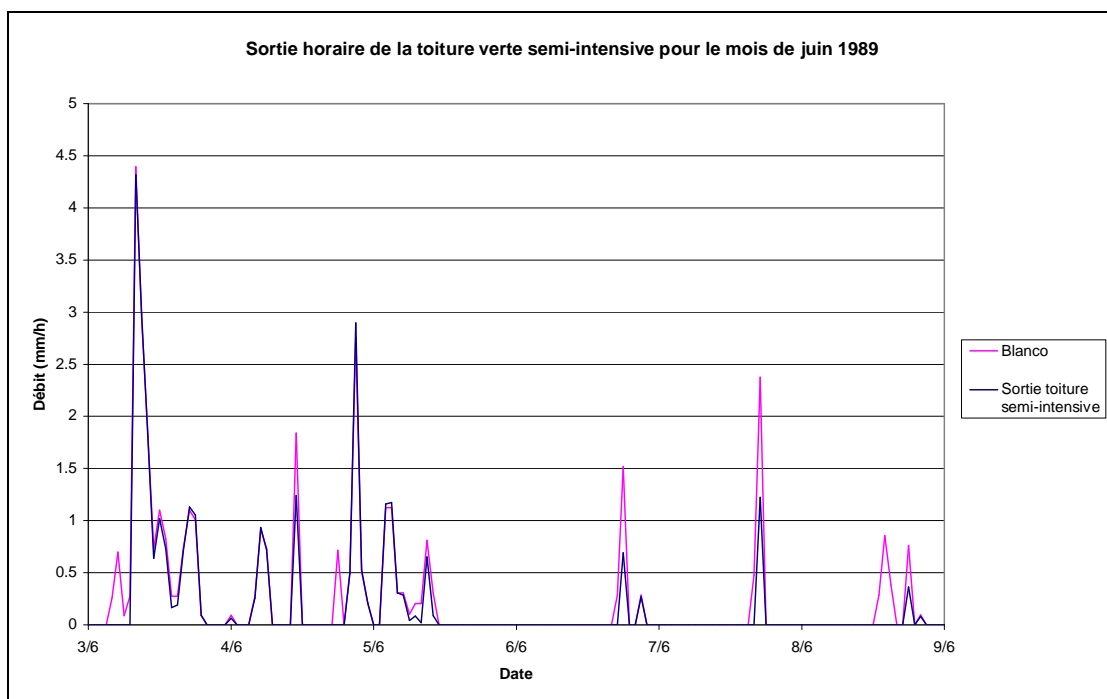


Figure 39 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte semi-intensive (juin 1989).

A la figure 40, on observe pour la toiture intensive une atténuation de certains pics de pluie, de fréquents retards du début de l'écoulement, ainsi que l'absorption quasiment complète de plusieurs pics de pluies.

A la figure 41, on remarque que la toiture bac augmente la durée de l'écoulement pour toutes les pluies dont l'intensité est supérieure au débit de sortie calibrée, et suit la courbe des pluies lorsque leurs intensités lui sont inférieures.

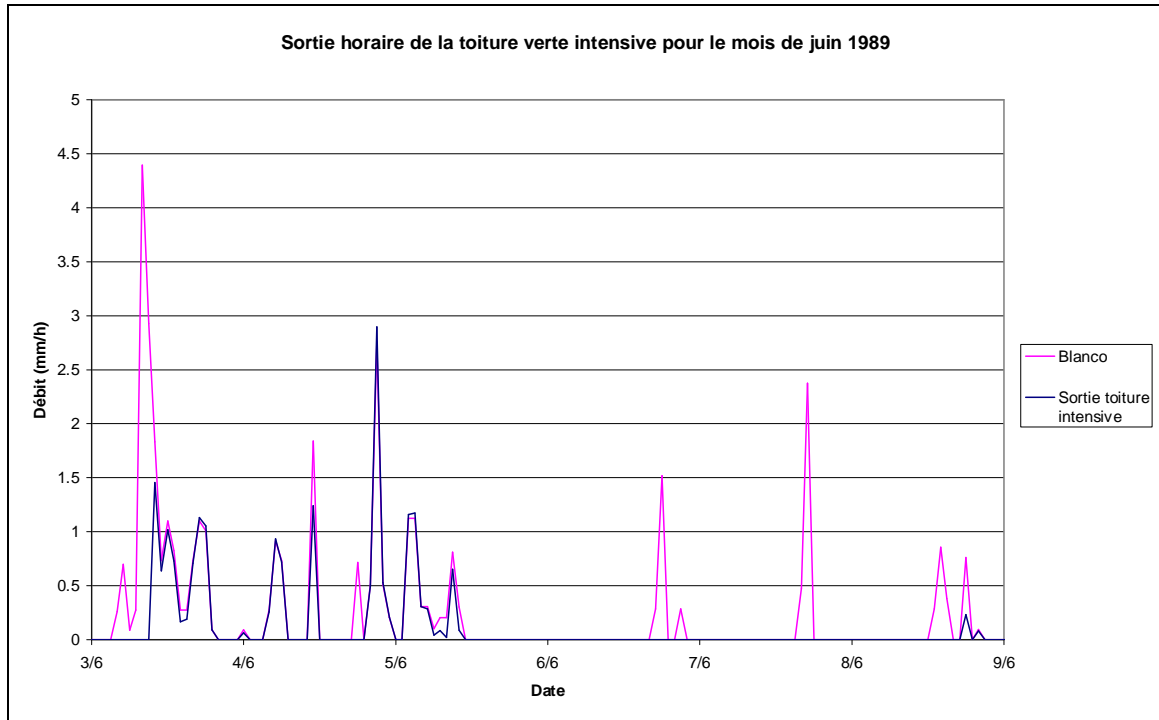


Figure 40 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte intensive (juin 1989).

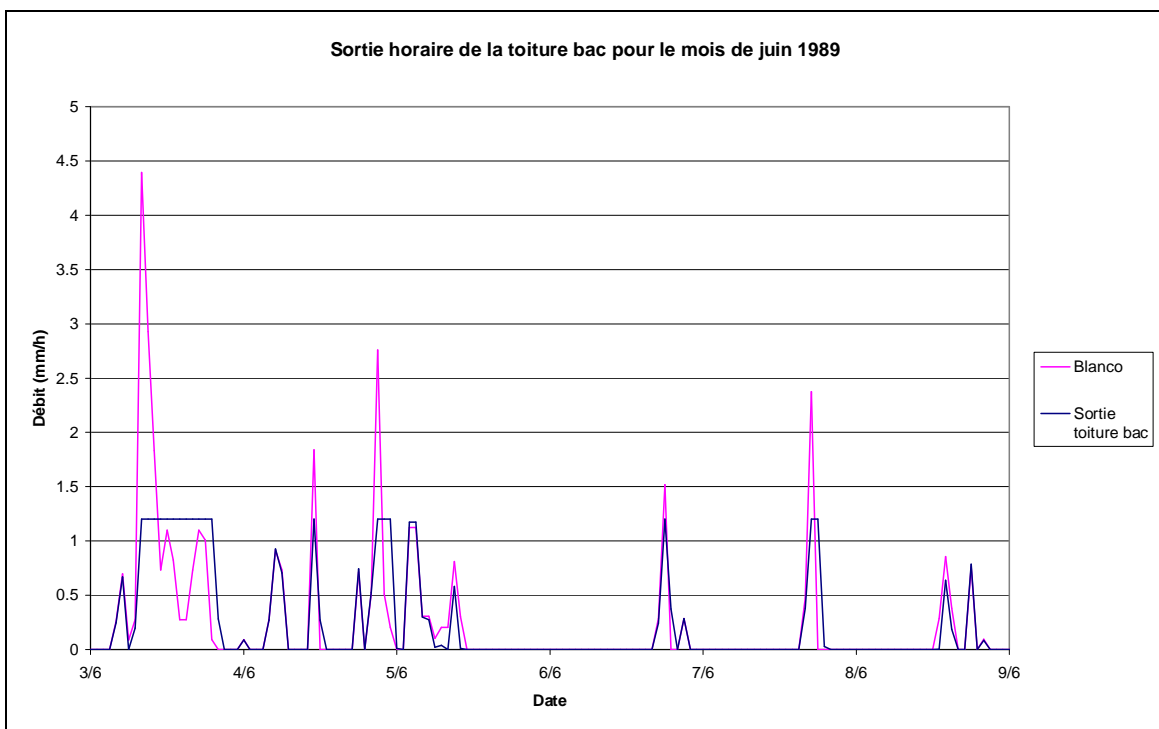


Figure 41 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture bac (juin 1989).

3. Octobre 1993

On observe, pour les toitures vertes (cf. figures 42 à 44), un léger retard du début de l'écoulement, correspondant à la quantité nécessaire pour atteindre la capacité au champ du substrat. Ensuite, la sortie suit exactement la courbe des pluies, la toiture n'a plus d'effet.

La figure 45 illustre le comportement de la toiture bac. On voit que celle-ci étale tous les pics supérieurs en valeur à sa sortie calibrée, via une sortie constante mais de longue durée.

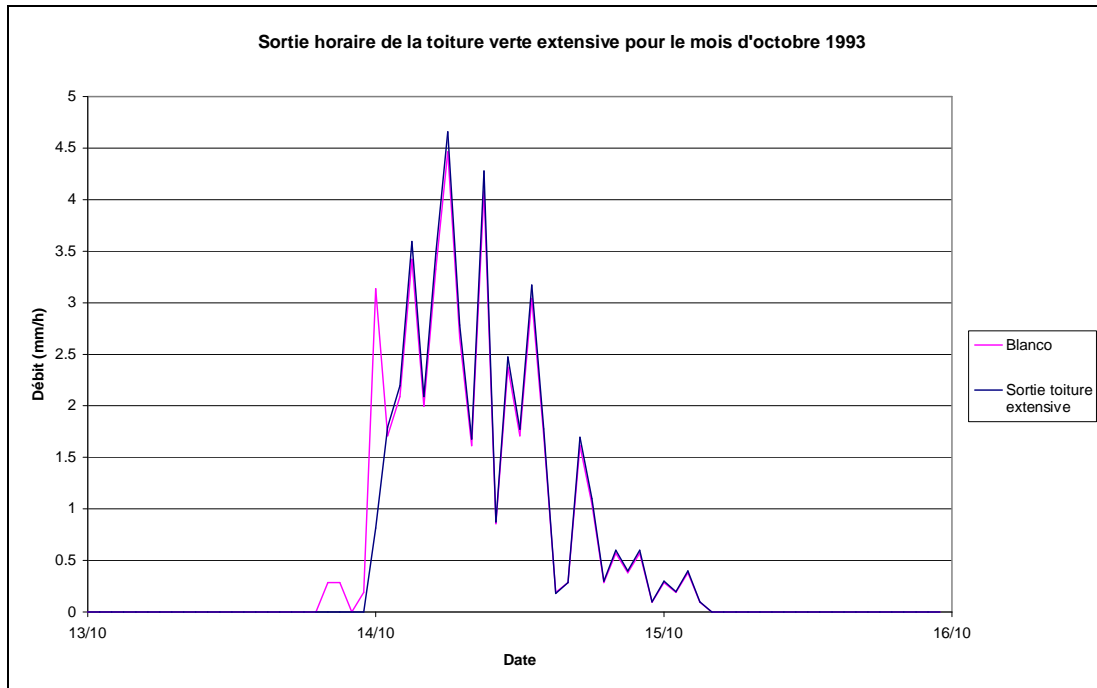


Figure 42 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte extensive (octobre 1993).

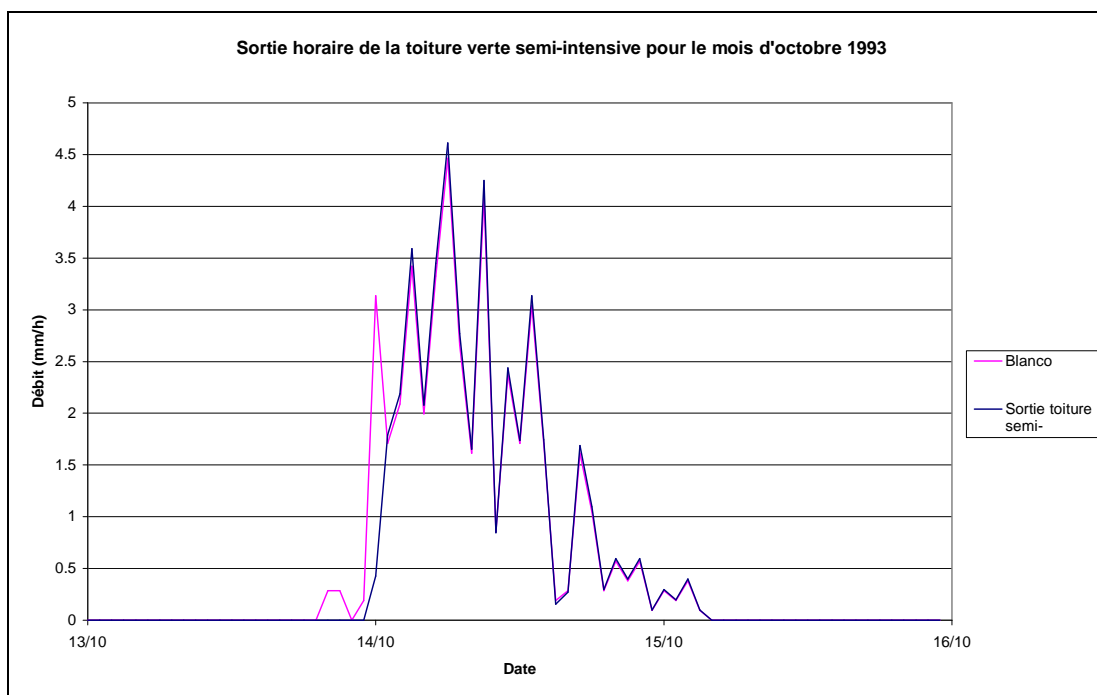


Figure 43 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte semi-intensive (octobre 1993).



Figure 44 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture verte intensive (octobre 1993).

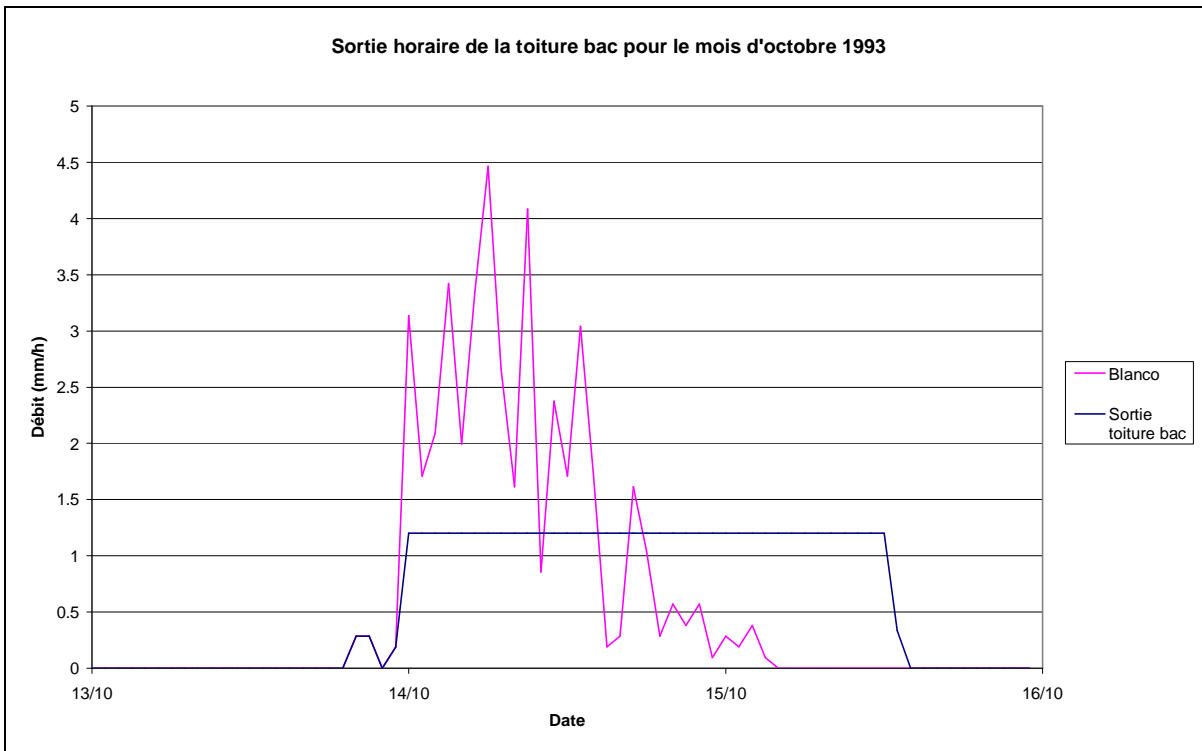


Figure 45 : Comparaison entre les sorties du Blanco et de la toiture bac (octobre 1993).

4.3. Comparaison

On peut comparer les toitures étudiées ici à différents points de vue. Il est intéressant de mettre en correspondance leur comportement vis-à-vis :

- de la quantité d'eau ruisselée ;
- du retard du début de l'écoulement ;
- de la réduction et de l'étalement du débit évacué vers le réseau.

Au tableau 16 sont fournies les moyennes annuelles de ces indicateurs, pour chaque type de toiture.

Tableau 16 : Moyenne sur 7 ans pour l'écoulement annuel et sur 10 débits pour la réduction des pics.

Toitures :	Extensive	Semi-intensive	Intensive	Bac
Coefficient d'écoulement (%)	67	70	54	88
Retard du début de l'écoulement	Parfois	Parfois	Parfois	Jamais
Réduction du pic (%)	13	5	26	91

On constate que le coefficient d'écoulement annuel est plus faible pour les toitures vertes que pour les toitures bacs. Par contre, pour la réduction des pointes de ruissellement, c'est la toiture bac qui a le coefficient de réduction le plus élevé.

Nous comparons aux figures 46 et 47 les sorties cumulées de chaque toiture pour deux périodes estivales. Ces deux graphiques illustrent la différence de comportement des différents types de toiture, et surtout le comportement face à des pluies d'intensité et de durée différentes. Sur la figure 46, l'événement pluvieux correspondant à une pluie de forte intensité et de faible durée (1h, cf. tableau 15), la toiture bac a un comportement différent. Elle prend quasiment une journée pour relâcher les flux vers le réseau d'évacuation du fait de la contrainte appliquée à la valeur de sa sortie calibrée, alors que les autres en restituent immédiatement une grande partie. Par contre, au niveau de la quantité totale sortie, on constate que la toiture bac et la toiture semi-intensive ne limitent presque pas le ruissellement, contrairement aux deux autres types de toiture. On constate d'ailleurs que la quantité retenue par ces dernières l'est principalement lors de la première averse. Sur la figure 47, on montre l'effet de plusieurs petites averses successives. Les courbes d'écoulement présentent une évolution parallèle. La différence de comportement quant à l'étalement de la pluie est donc beaucoup moins marquée que lors de l'averse importante de mai 95 (cf. figure 46), voire inexistante. Par contre, on confirme le classement en ce qui concerne la quantité totale de pluie retenue. A nouveau, les toitures vertes retiennent l'eau principalement pendant les premières pluies (succédant, dans ce cas-ci, à 20 jours de sécheresse).

Le retard de l'écoulement est difficile à quantifier au pas de temps utilisé dans nos simulations. Sur les graphiques illustrant le comportement des toitures vertes (cf. figures 34 à 44), on observe des retards lors d'événements pluvieux supérieurs à une heure, et correspondant à l'absorption des premiers millimètres de pluie. Si on a une pluie de grande intensité durant une heure, réduite par son passage dans les toitures vertes, on peut imaginer que l'écoulement aura un certain retard, mais d'un ordre de grandeur inférieur à l'heure, ce qui n'apparaîtra pas sur les graphiques. Afin de mettre ce phénomène en évidence, il conviendrait de simuler à un pas de temps inférieur, par exemple de l'ordre de la minute. L'écoulement différé d'un pic de pluie peut être intéressant pour alléger le réseau d'évacuation.

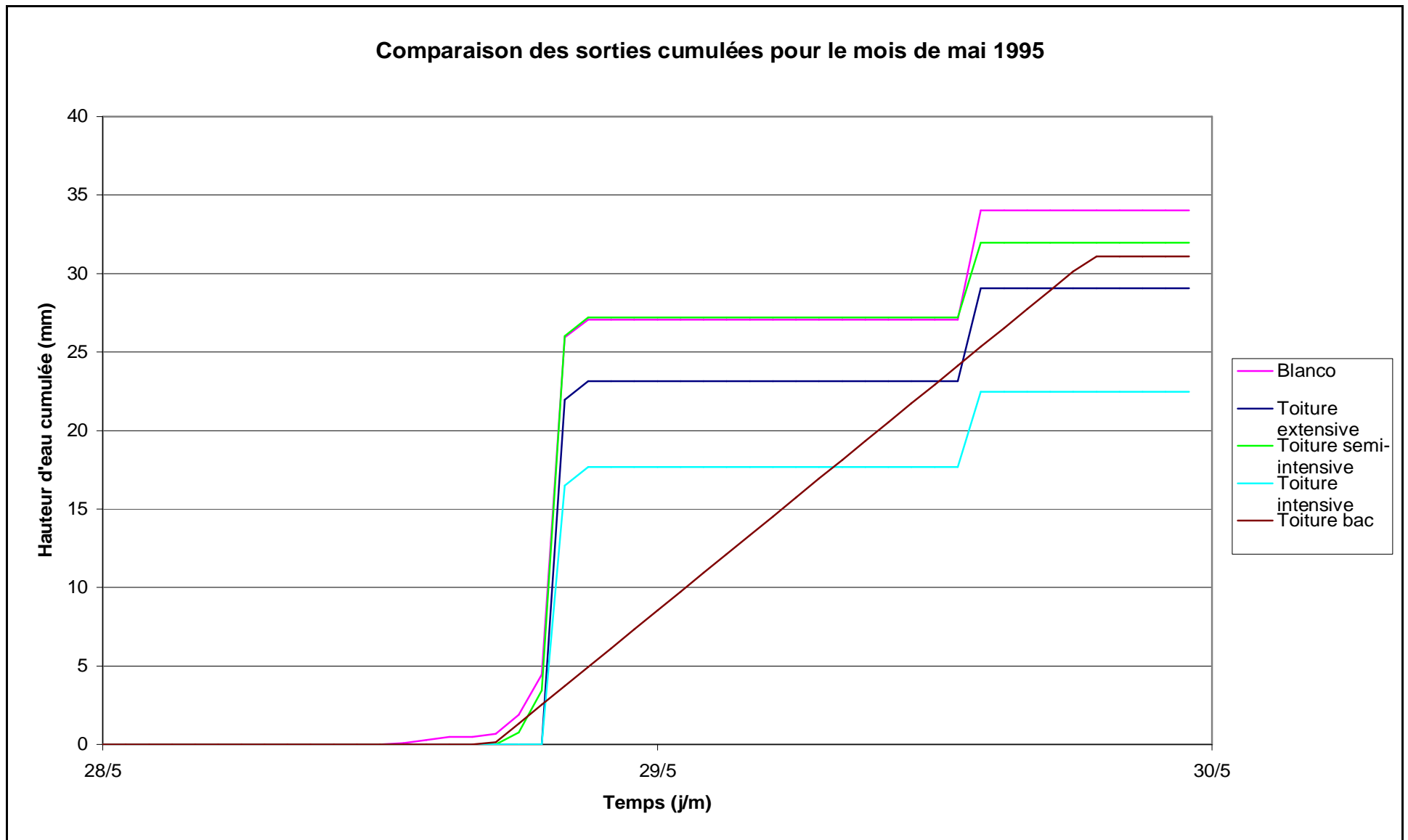


Figure 46 : Comparaison des sorties cumulées pour tous les modèles (mai 1995).

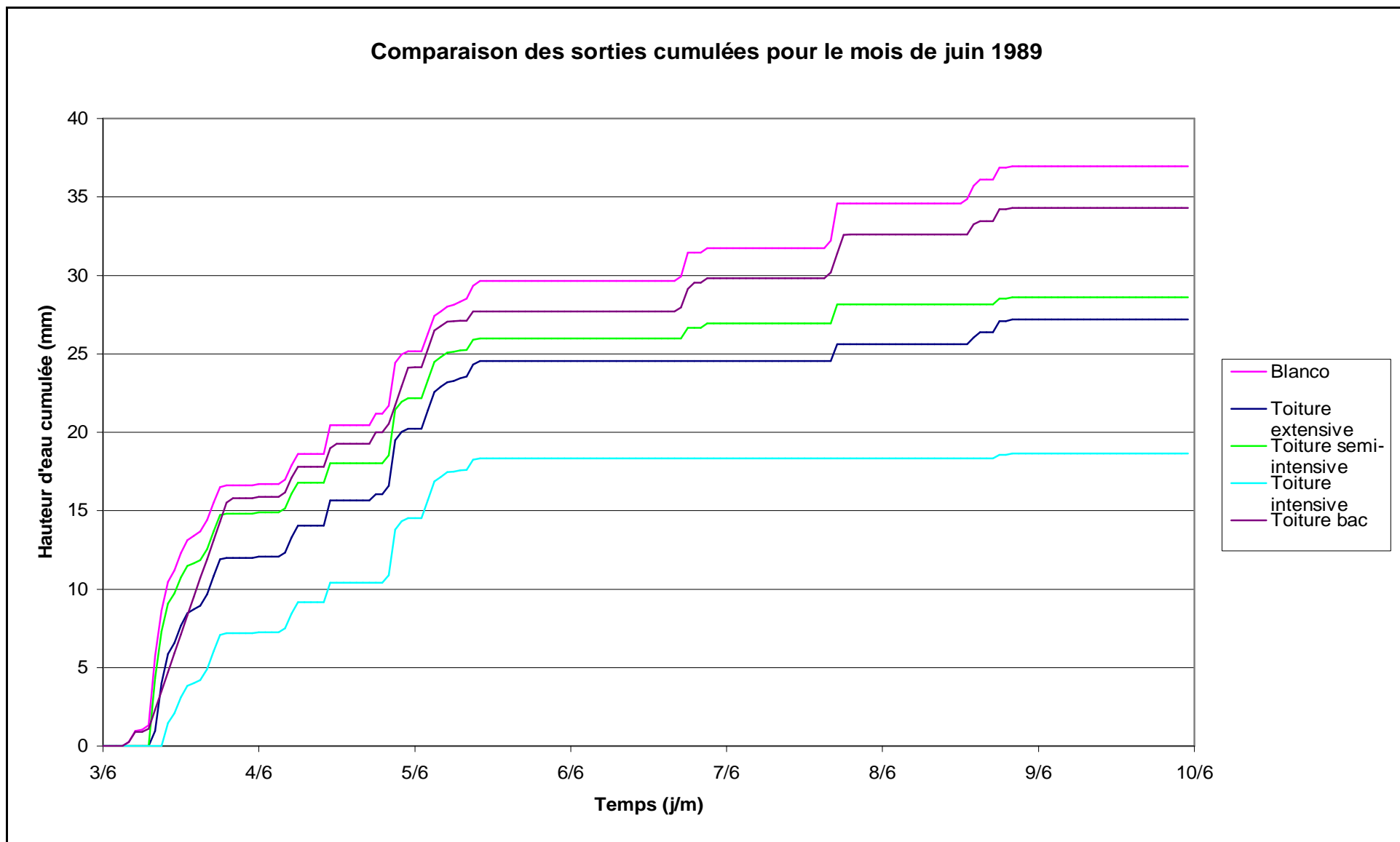


Figure 47 : Comparaison des sorties cumulées pour tous les modèles (juin 1989).

4.4. Conclusion

Les comportements des toitures mènent à des conclusions différentes quant à leur utilité. En effet, si ce sont les inondations que l'on souhaite éviter, c'est la réduction et l'étalement du pic de pluie qui sera le facteur décisif. Dans ce cas, c'est la toiture bac qui a le comportement le plus adapté, en permettant d'étaler les flux sur une longue période moyennant une régulation hydraulique adaptée de l'orifice de sortie. En revanche, la toiture bac limite peu le volume d'eau ruisselé et ne présente pas de retard du début de l'écoulement, contrairement aux toitures vertes.

- Toiture bac

Cette toiture, telle que modélisée, réduit de 90% en moyenne les pics observés en étalant la sortie sur une longue période. Par contre, la toiture bac ne présente aucun retard initial de l'écoulement, et son coefficient de ruissellement global est élevé. Une faible quantité d'eau reste donc réintroduite dans son cycle naturel.

L'importance relative des termes du bilan hydrologique (principalement pour le transfert) dépend principalement de la valeur attribuée au débit de fuite. Plus elle sera faible, plus le stockage sera long, l'évaporation pouvant intervenir alors en plus grande proportion dans le bilan. Mais dans ce cas, la quantité d'eau contenue dans le bac sera plus importante une plus grande partie de l'année, le rendant plus sensible à des pluies successives.

- Toitures vertes

Les toitures vertes, quant à elles, présentent un léger retard initial de l'écoulement (une simulation à un pas de temps plus faible pourrait mieux mettre en évidence cet éventuel effet) et une faible réduction des pics de pluie, cette réduction n'apparaît que si le substrat est relativement sec. Ces deux effets sont dépendants d'une part de la capacité de stockage du substrat (une précision dans une étude ultérieure de la valeur utilisée ici pour ce paramètre permettra de nuancer ces résultats, cf. paragraphe 6.3.), fonction du type considéré et de son épaisseur, et d'autre part de la succession des pluies, une période de sécheresse précédant une pluie permet une meilleure rétention de l'eau. Par contre, ces toitures induisent une réduction du coefficient de ruissellement plus importante.

Pendant l'hiver, leur comportement est sensiblement identique, avec une efficacité décroissante pour les types intensif / semi-intensif / extensif. Pendant l'été, la toiture la plus intéressante au niveau des trois critères de comparaison (quantité d'eau ruisselée, réduction et étalement du débit évacué et retard de l'écoulement) est la toiture intensive. C'est elle qui induit la plus grande réduction des pics, elle présente de plus fréquents retards de l'écoulement et son coefficient de ruissellement est le plus faible. La toiture extensive occupe la « deuxième » place du classement. Ceci peut sembler anormal, la toiture extensive présentant une épaisseur de substrat plus faible que la toiture semi-intensive. Cependant, le fait que la toiture semi-intensive soit recouverte d'une végétation plus exigeante au niveau de ses besoins en eau, tout en présentant une faible réserve utile en eau, implique que cette toiture soit régulièrement arrosée, ce qui laisse peu de place pour l'eau de pluie. Les toitures extensives, elles, ne peuvent pas être arrosées, le substrat est donc souvent complètement sec, les premiers millimètres de pluie sont alors retenus. Il est vrai aussi que l'épaisseur choisie lors de cette simulation pour la toiture semi-intensive est sa limite inférieure, ce qui peut lui être défavorable en termes de comparaison.

Une simulation avec une épaisseur de 25 cm de la toiture semi-intensive a donc été réalisée, son bilan est comparé avec celui d'une toiture extensive de 5 cm d'épaisseur au tableau 17.

Tableau 17 : Comparaison des moyennes annuelles des termes du bilan hydrologique entre une toiture verte semi-intensive de 25 cm d'épaisseur et une toiture verte extensive de 5 cm d'épaisseur.

	Toiture semi-intensive (25 cm)	Toiture extensive (5 cm)
Pluie (mm)	770	770
Arrosage (mm)	362	/
Sortie (mm)	462	516
Evapotranspiration (mm)	670	254

On peut en conclure que la toiture semi-intensive devient un peu plus intéressante au niveau hydrologique que l'extensive pour cette épaisseur, mais il faut tenir compte du fait que la mise en place sera moins facile en cas de rénovation et plus coûteuse. D'autre part, une toiture verte extensive de 10 cm permet, comme le montre son bilan, de réduire tout autant l'écoulement qu'une toiture semi-intensive de 25 cm d'épaisseur (cf. tableau 18).

Tableau 18 : Comparaison des moyennes annuelles des termes du bilan hydrologique entre une toiture verte semi-intensive de 25 cm d'épaisseur et une toiture verte extensive de 10 cm d'épaisseur.

	Toiture semi-intensive (25 cm)	Toiture extensive (10 cm)
Pluie (mm)	770	770
Arrosage (mm)	362	/
Sortie (mm)	462	463
Evapotranspiration (mm)	670	307

On sait qu'au sein d'un type de toiture l'augmentation de l'épaisseur de substrat sera favorable à la rétention d'eau. Cependant, augmenter l'épaisseur en passant du type extensif au type intensif ne devient intéressant qu'à partir de la limite de 25 cm, qui correspond déjà à la limite inférieure d'une toiture intensive.

Sous réserve de vérifications complémentaires (cf. paragraphe 6.3.), les présentes simulations tendraient à montrer que, en fonction des possibilités du projet, il convient d'opter pour l'installation d'une toiture verte intensive ou d'une extensive. La toiture semi-intensive regrouperait, en effet, les désavantages des deux autres types : contraintes techniques liées à une végétation intensive et faible efficacité relative des toitures extensives.

En définitive, pour des pluies successives de faible intensité, ce sont les toitures vertes qui auraient le comportement le plus intéressant, en réintroduisant l'eau de pluie dans son cycle naturel via son évapotranspiration, tandis que pour des pluies d'intensité importante et de faible durée, ce sont les toitures bacs qui présenteraient le comportement recherché, sous réserve des possibilités de régulation hydraulique ad hoc.

5. Premier test de validation des modèles

Afin de tester le modèle conçu, nous l'avons confronté avec des mesures effectuées par Stovin et Dunett [2007] sur une toiture verte extensive à Sheffield, UK. Les mesures sont prises toutes les 5 minutes, le modèle a donc été adapté à ce pas de temps. La toiture verte concernée par ces mesures a les caractéristiques résumées au tableau 19.

Tableau 19 : Caractéristiques de la toiture verte extensive à Sheffield, UK.

Epaisseur (m)	0,08
Pente (%)	2,6
Longueur de pente (m)	1
Longueur transverse (m)	3
Conductivité hydraulique (cm/s)	inconnue
Capacité de rétention à saturation (%)	inconnue
Teneur en eau à la capacité au champ (%)	9,25
Teneur en eau au point de flétrissement (%)	6,8

Comme indiqué dans ce tableau, le substrat utilisé n'est pas du même type que celui considéré dans nos modèles. Il manque comme donnée de départ la conductivité hydraulique du substrat. Dès lors, nous avons calibré cette valeur, que nous considérons fixe en raison de la présence d'une couche de drainage (cf. paragraphe 3.1.8.). Nous obtenons la courbe représentée à la figure 48.

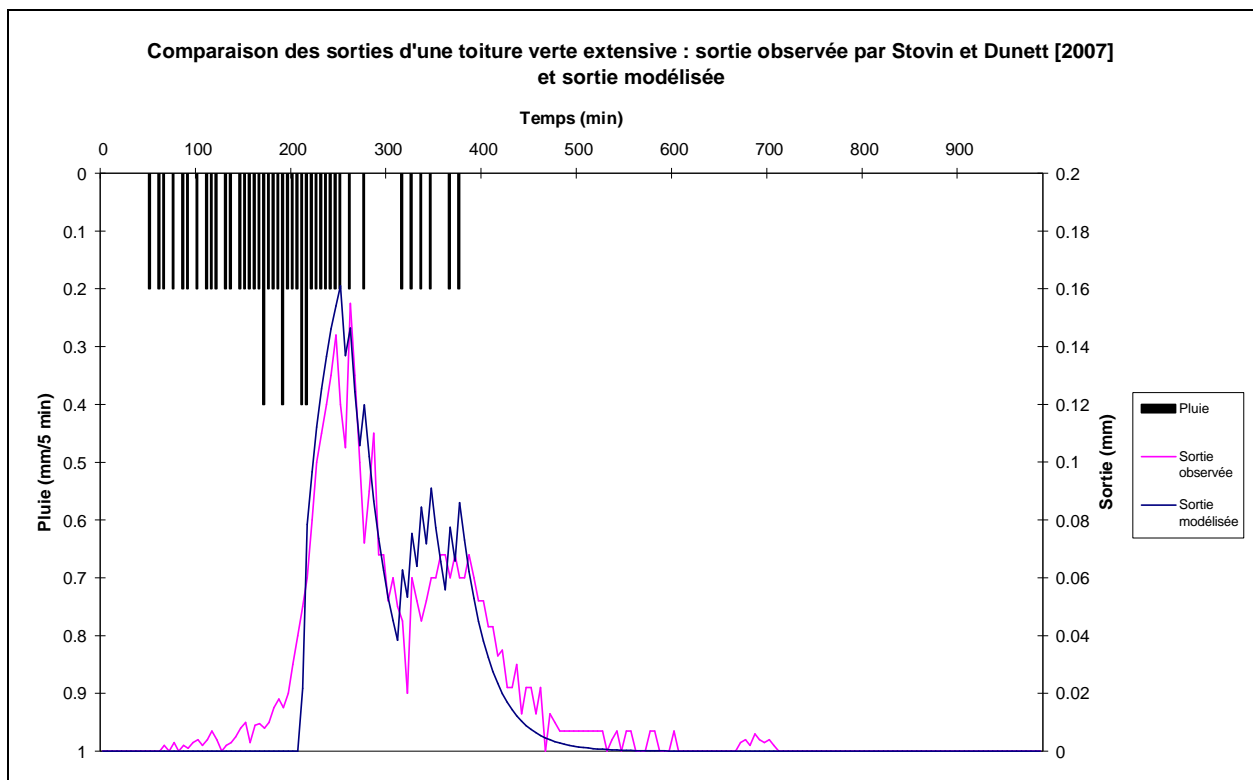


Figure 48 : Ruissellement observé sur une toiture verte extensive à Sheffield, UK [Stovin et Dunett, 2007] et ruissellement obtenu par modélisation de la même toiture.

On voit que les courbes sont globalement semblables, l'évolution de la sortie modélisée suit relativement bien la sortie mesurée. La pluie considérée est relativement faible en intensité, mais sa durée non négligeable (environ 100 pas de temps de simulation) permet une première validation du modèle conçu dans le présent mémoire.

6. Perspectives

6.1. Perfectionnements du modèle

Le modèle développé ici consiste en une première approche de la détermination du comportement hydrologique de toitures stockantes. Des améliorations sont à envisager afin de compléter ou de préciser ses résultats.

- Le pas de temps de simulation

Il serait intéressant de pouvoir simuler des pluies à un pas de temps inférieur à l'heure, afin d'affiner les résultats. En effet, comme expliqué plus haut, la réduction d'un pic de pluie par les toitures vertes implique un retard initial de l'écoulement lors d'une averse, cette quantité réduite étant stockée dans le substrat. Ce retard étant inférieur à l'heure, il n'a pu être mis en évidence ici ; pour ce faire, il faut disposer de données météorologiques mesurées à un intervalle de temps plus court.

- La vitesse d'écoulement

Dans nos modèles, nous avons considéré une vitesse constante d'écoulement de l'eau au sein du substrat, sa valeur ayant été fixée comme égale à la conductivité hydraulique à saturation. Or, la vitesse va varier en fonction de la teneur en eau du sol, elle sera plus faible pour une teneur en eau inférieure à la saturation. Il convient donc d'adapter le modèle en fonction de ces considérations. Néanmoins, les résultats que nous avons présentés concernent des toitures vertes munies d'une couche de drainage (pente minimale) et sont au pas de temps horaire. Dans ce cas, le parcours de l'eau est très court, et la vitesse n'a pas d'influence sur la quantité qu'il est possible d'évacuer en une heure.

- La couche de stockage

Dans certains cas, les toitures vertes sont installées avec une couche de stockage différenciée. Les entreprises belges proposent ce système pour l'installation de toitures vertes en pente, ou pour des toitures dont la végétation a des besoins en eau particulièrement élevés. Le modèle ne permet pas, actuellement, la prise en compte de cette couche.

- L'évacuation des toitures bacs et toitures vertes

Au niveau des toitures bacs, il conviendrait de préciser la variation de la sortie calibrée en fonction de la hauteur de charge. La normalisation de la valeur à attribuer à cette sortie calibrée, esquivée jusqu'à présent par les constructeurs, est à envisager. Pour les toitures vertes, et malgré les notifications du CSTC [2006], une recherche plus approfondie quand à la possibilité de calibrer le débit d'évacuation de ces toitures semble intéressante.

6.2. Améliorations physiques des toitures vertes

Dans nos simulations, nous avons considéré que le substrat était du Vulkatech®, substrat léger et très poreux (environ 60% de porosité totale), présentant une réserve en eau utile de l'ordre de quelques pourcents (3 à 4%) en volume de substrat. Or, les résultats l'ont montré,

c'est cette propriété physique du substrat qui détermine l'efficacité des toitures vertes quant à la réduction du ruissellement. Un substrat regroupant des caractéristiques telles que poids faible, résistance à la compaction et bonne capacité de rétention, tout en conservant une porosité de drainage suffisante, peut améliorer l'efficacité des toitures vertes sans augmenter les contraintes techniques. Dans certains cas, les toitures vertes sont installées avec une couche de stockage différenciée, celle-ci peut pallier la faible capacité de rétention du substrat.

6.3. Perspective de validation sur site

Afin de confirmer les résultats obtenus avec les modèles développés ici, il serait nécessaire d'effectuer des mesures sur des toitures en place. Un contact a été pris avec la firme de magasins Delhaize. Cette chaîne dispose de deux magasins équipés de toitures vertes extensives, situées à Bruxelles. De plus, Delhaize, intéressé par ce genre d'étude, est prêt à accueillir l'équipement de mesure nécessaire.

Les deux toitures ont été visitées. La première vient d'être mise en place (été 2006) sur le nouveau Delhaize de la chaussée de Wavre au niveau de la station de métro Hankar. Une partie seulement a été végétalisée. Elle a été établie selon les techniques actuelles concernant les toitures vertes, c'est-à-dire que le substrat est du type Vulkatech®, l'épaisseur est d'environ 5 cm et la végétation est constituée exclusivement de sédums, mais n'est pas encore totalement développée. Les canalisations servant à l'évacuation des eaux de toiture ne sont accessibles qu'au niveau du toit ou au niveau des sous-sols, où elles ont déjà rejoint celles contenant les eaux venant de toitures non végétalisées. L'évacuation sur le toit se fait via des bouches d'évacuation Pluvia (Geberit®). Ces bouches d'évacuation fonctionnent par dépression : si une certaine quantité d'eau est tombée, l'eau est évacuée en pleine section. De plus, les parties végétalisées et non végétalisées sont situées sur des parties différentes du toit (différentes hauteurs, différentes pentes). Ce cas de figure présente des difficultés quant à l'installation d'appareils de mesure adaptés. En effet, l'installation au sous-sol ne permet pas de mesures fiables quant au retardement de l'écoulement, cette mesure étant parasitée par la présence de l'eau venant de la toiture de référence et par l'évacuation séquencée de l'eau ruisselée. Une mesure de la vitesse dans les canalisations par le toit n'est pas envisageable non plus, le taux de remplissage de la canalisation en fonction de la quantité d'eau n'étant pas connu.

L'autre magasin équipé d'une toiture verte est situé chaussée de Boondael. Dans ce cas, la toiture verte est en place depuis une dizaine d'années. Le substrat est de type organique, ses caractéristiques exactes ne sont pas connues. Une mesure de la courbe de rétention (cf. paragraphe 3.1.7.B) et de la conductivité hydraulique à saturation (cf. paragraphe 3.1.7.C) est dès lors nécessaire. La toiture présente différentes zones délimitées, comme on peut le voir à la figure 49.

Il y a une zone de référence (roofing), deux zones de gravier, une zone à végétation développée de type sédums mais colonisée par quelques plantes de type herbacé (cf. figure 50) et une zone à végétation du type mousse.



Figure 49 : Aperçu des différentes zones de végétalisation [Auteur : Beckers E., 2006].



Figure 50 : Aperçu des différentes zones de végétalisation [Auteur : Beckers E., 2006].

Chaque zone a ses propres bouches d'évacuation (possibilité de régulation hydraulique de sortie), comme illustré à la figure 51, qui sont accessibles au niveau du parking, juste en-dessous de la toiture. Cette disposition est idéale pour des mesures. En effet, plusieurs types de toitures pourraient être comparés, les différents types étant côte à côte et présentant donc la

même pente et la même orientation. Les canalisations sont individualisées, et facilement accessibles.



Figure 51 : Evacuation d'une zone de toiture [Auteur : Beckers E., 2006].

Nous proposons ici un système de mesure permettant une précision de mesure suffisante pour permettre la validation du modèle en toutes circonstances.

Le schéma proposé consiste à installer une cuve dans laquelle se trouve un capteur de niveau. Le capteur de niveau choisi est la sonde mini-Diver de chez Eijkelkamp® (cf. annexe 9.2.). Elle a une résolution de 2 mm et mesure jusqu'à 10 mètres de colonne d'eau. Sa capacité d'enregistrement est de 24.000 mesures dont la fréquence peut varier entre 0,5 secondes et 99 heures. Pour un enregistrement toutes les minutes, elle ne doit donc être relevée que tous les 16 jours. Le problème de ce système peut être l'influence des remous sur les mesures lorsque l'eau arrive dans la cuve. On peut diminuer cet impact en plaçant la sonde dans une crépine, qui va se remplir au fur et à mesure que le niveau monte dans la cuve. Il est également possible d'augmenter le nombre de mesures puis de lisser les courbes de sortie. Un test en laboratoire pourra démontrer le comportement de l'installation. Une graduation de la cuve permettra de vérifier la quantité d'eau accumulée pendant la période de mesure.

L'encombrement est relativement important, une cuve d'environ 6 à 8 m³ étant nécessaire, afin de pouvoir réceptionner sans débordement une pluie de 60 mm (une bouche d'évacuation reprend 100 m² de toiture). La plus petite intensité de sortie enregistrée dépend des dimensions de la cuve dans laquelle se trouve la sonde. Si la cuve fait 2 x 2 m de base, la plus petite hauteur d'eau enregistrée est de 2 mm et correspond à une sortie de 0,08 mm/h. L'ensemble sera protégé par des panneaux défendant l'accès pour prévenir les vols ou le vandalisme (présence de déchets dans la cuve...) et un cadenas fermera le tout.

Pour l'installation d'un premier site de mesure, il nous faut :

- des panneaux OSB et un cadenas pour la protection du système ;
- une latte graduée pour le contrôle des mesures ;

- une cuve de 6 à 8 m³ ;
- une crépine contenant la sonde ;
- un système de vidange pour la cuve ;
- des câbles et fixations pour la sonde dans le tube ;
- un logiciel permettant le déchargement des données sur PC ;
- une sonde mini-Diver ;
- une sonde Baro-Diver pour la mesure de la pression atmosphérique et la correction des mesures de la sonde mini-Diver.

Dans le tableau 20 suivant, nous reprenons les coûts les plus importants associés aux éléments du système.

Tableau 20 : Coûts succincts de l'appareillage nécessaire à des mesures sur le terrain de la sortie d'une toiture verte.

	Quantité	Prix (EUR)	Total (EUR)
Panneaux OSB de 244x122 cm	10	32,29	322,90
Câbles et fixations	1	66,50	66,50
Logiciel de déchargement	1	175,00	175,00
Sonde mini-Diver	1	495,00	495,00
Sonde Baro-Diver	1	350,00	350,00
Total			1409,40

Si un deuxième système de mesure est implanté au même endroit, ce prix n'est pas doublé. En effet, le logiciel de déchargement et la sonde Baro-Diver ne doivent pas être acquis une seconde fois.

Une étude en laboratoire ou sur site du comportement de l'eau dans le substrat à proximité de la couche de drainage semble s'imposer pour compléter le modèle développé ici. Des mesures avec des sondes TDR permettraient de connaître le profil hydrique exact du substrat.

6.4. Répartition spatiale à l'échelle du bassin versant

Le modèle développé ici prend uniquement en compte le comportement d'une toiture isolée. Le bilan ne concerne en effet que la surface de toiture considérée. Pour conclure quant à l'intérêt de ce genre de structures sur la réduction et le ralentissement du ruissellement, il est intéressant de les considérer à l'échelle du petit bassin versant. La répartition géographique des toitures au sein de celui-ci a un effet sur la répartition dans le temps de la sortie à l'exutoire et sur la variation du temps de réponse ; non maîtrisé, cet effet pourrait aller dans le sens inverse de celui recherché (superposition de réponses différées à d'autres non différées, par exemple).

En outre, le nombre de toitures à mettre en place pour prévenir les inondations d'un micro bassin versant représente un investissement économique à quantifier et à contrebalancer avec d'autres types d'interventions : interventions d'urgence, bassins d'orage... structures solutionnant le problème à posteriori.

Ceci est sans compter sur le fait que l'efficacité des systèmes reste à valider pour des averses exceptionnelles inondantes (non simulées dans le cadre de ce mémoire).

7. Conclusion

Dans ce travail, nous avons tenté une approche de modélisation pour évaluer le comportement de divers types de toitures stockantes (toitures bacs et toitures vertes de type extensif, semi-intensif et intensif) et nous avons testé leur réponse sur 7 années de données météorologiques ; ceci afin de comparer leur effet sur la production du ruissellement, et ainsi déterminer l'intérêt de telles structures pour la mitigation des flux d'origine pluviale en milieu urbain.

La modélisation des toitures a nécessité la détermination de tous les termes du bilan hydrologique. Chaque toiture a été modélisée en fonction des contraintes techniques qui lui sont afférentes et la détermination des paramètres a été appuyée par des études scientifiques.

Chaque modèle a ensuite été programmé. Deux interfaces de modélisation ont été testées, ModelMaker 4.0 édité par Cherwell Scientific Ltd® et Visual Studio 2005 édité par Microsoft®. Une validation de la programmation a permis de constater des écarts importants pour les résultats issus de ModelMaker ; la programmation a donc été poursuivie dans Visual Studio 2005. Une comparaison avec des mesures effectuées sur une toiture à Sheffield, UK [Stovin et Dunett, 2007] a permis un premier test des modèles développés.

Les résultats des simulations sur 7 années de données climatiques (1989-1995) ont permis de cerner en première approche le comportement hydrologique de ces toitures.

Trois critères de comparaison ont été analysés et les résultats ont été interprétés. Il s'agit de :

- la diminution et l'étalement des pointes de ruissellement

On a vu que la réduction des pointes de ruissellement dépendait, au niveau d'une toiture, de la quantité d'eau stockable et du débit de fuite imposé à la toiture. La toiture bac réunit les conditions inhérentes à ces paramètres permettant une réduction moyenne de 90% des pointes de ruissellement ainsi que leur étalement. Les toitures vertes présentent un intérêt moindre à ce niveau avec des coefficients de réduction de 13% pour le type extensif, 5% pour le semi-intensif et 26% pour l'intensif.

- la réduction du volume de ruissellement

Les toitures vertes réduisent en plus grande proportion le volume total de ruissellement que les toitures bacs. Leurs coefficients d'écoulement varient de 54 à 70%, celui de la toiture bac valant 88%.

- le retard initial de l'écoulement

Les toitures vertes induisent, dans certains cas, un retard du début de l'écoulement, contrairement aux toitures bacs. Ce retard n'a pu être quantifié, étant inférieur au pas de temps de simulation utilisé ici.

Les modèles développés en première approche restent à améliorer, en tenant mieux compte des propriétés physiques des substrats, de leur épaisseur (profil hydrique) et des conditions de régulation hydraulique imposées sur le plan pratique. A ce niveau, des normes sont à prescrire.

Il apparaît dès à présent cependant possible, comme développé au paragraphe 6.2., de recommander d'améliorer le comportement des toitures vertes, en augmentant leur capacité à favoriser l'évaporation de l'eau (diminution du volume), tout en veillant à maintenir la drainance via la porosité efficace (porosité de drainage) soit via un substrat présentant une réserve utile plus importante, soit via une couche de stockage indépendante. Ces deux solutions pourraient donc non seulement permettre une réduction plus importante des pointes de ruissellement, mais aussi une économie supplémentaire d'eau d'arrosage nécessaire aux besoins des plantes.

A d'autres niveaux, les toitures vertes peuvent présenter des avantages que n'ont pas les toitures bacs (présence d'espaces verts, restauration du cycle naturel de l'eau, isolation thermique et acoustique).

Sous réserve d'analyse de la régulation hydraulique praticable et de simulations, dès lors, lors d'averses intenses, la toiture bac présenterait un intérêt majeur dans la prévention des inondations. Les toitures vertes sont moins performantes, mais il existe un réel intérêt à développer leurs propriétés de rétention (effet sur l'évaporation), ces toitures conciliant alors des intérêts au niveau de la gestion des pluies, de l'énergie et de la nature.

8. Références bibliographiques

- Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M. [1998]. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *F.A.O. Irrigation and drainage*, paper 56.
- Bellefontaine L., Obsomer P. [2006]. Etude sur l'imperméabilisation en Région bruxelloise et les mesures envisageables en matière d'urbanisme pour améliorer la situation. *ULB, IGEAT*, 1-73.
- Brenneisen S. [2003]. La nature sur le toit. *Hotspot : biodiversité en milieu urbain* : **8**, 8-9.
- Communauté européenne [2000]. Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil. Journal officiel des Communautés européennes, 72 p.
- CSTC [2006]. Les toitures vertes. Bruxelles, *Centre scientifique et technique de la construction, Note d'information technique*, n° 229, septembre 2006, 1-73.
- Dautrebande S. [2001]. L'urbanisation et le cycle de l'eau. Journée d'étude du 24/11/01, Institut Supérieur d'Architecture St-Luc de Bruxelles, CERAA, 16 p.
- Dautrebande S. [2004]. Cours de Bases physiques de l'Hydrologie. Fusagx, 113 p.
- Dautrebande S. [2005]. Cours d'Hydrologie générale tome2. Fusagx, 78 p.
- Demarée G. [1985]. Intensity-Duration-Frequency Relationship of Point Precipitation at Uccle. Reference period 1934-1983. Institut royal météorologique de Belgique, 52 p.
- Ducharne A. [2002]. Projet GICC-Seine : Questions relatives à l'ETP. *Gicc-Seine*, 1-11.
- Fortin J.-P. [2001]. Hydrotel : Bases théoriques. Institut national de la recherche scientifique au Canada, 80 p.
- Gumbel E.J., [1958]. Statistics of extremes. Columbia University Press, New York.
- Guyon G. [1958]. La méthode de Penman pour le calcul de l'évapo-transpiration. Ministère de l'Agriculture français, Direction Générale du Génie Rural et de l'Hydraulique Agricole, Section Technique de l'Hydraulique, 6 p.
- Kotchi S. [2004]. Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge : Application à la culture de la pomme de terre. Université de Laval, Faculté de Foresterie et géomatique. 130 p.
- Laroche D., Mitchell A.-M., Péloquin S. [2004]. Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain. *Ville de Montréal*, 1-21.
- Lazzarin R., Castellotti F., Busato F. [2005]. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings* : **37** (2005), 1260–1267.
- Liu, K. [2004]. Sustainable building envelope – garden roof system performance. *RCI Building Envelope Symposium, New Orleans, L.A.*, Nov. 4-5, 2004, 1-14.

Liu K., Baskaran A. [2005]. Using garden roof systems to achieve sustainable building envelopes. *Construction Technology Update* : **65**, 1-6.

MacMilan, G. [2004]. York University Rooftop Garden Stormwater Quantity and Quality Performance Monitoring Report. Proceedings of the “Green Rooftops for Sustainable Communities”, 2nd annual conference, June 2-4, 2004, Portland, Oregon.

Maidment, D. [1993]. Handbook of Hydrology. MacGraw-Hill, New York, 1400 p.

Martin O. [2005]. Apprentissage de ModelMaker. INRA-ACTA-ICTA, 3-4.

Mentens J. [2003]. Groendaken in Vlaanderen en Brussel. *Studie en onderzoek*, 24-26.

Mentens J., Raes D., Hermy M. [2005]. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* : **77** (3), 217-226.

Moran A. [2004]. A North Carolina Field Study to Evaluate Greenroof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth. North Carolina State University, Department of Biological and Agricultural Engineering, 1-300.

Revitt M., Ellis B., Scholes L. [2003]. Review of the Use of stormwater BMPs in Europe. Middlesex University, 1-98.

Rezaei F., Jarret A. [2005]. Measure and predict evapotranspiration rate from green roof. Transaction of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, 1-6.

Richards L.A. [1928]. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigations. *Journal of Agricultural Research* : **37** (12), 719-742.

Rosenzweig, C., Gaffi S., Parshall L. [2006]. Green Roofs in the New York Metropolitan Region : Research Report. *Columbia University Center for Climate Systems Research and NASA Goddard Institute for Space Studies*, 1-59.

Schofield R.K. [1935]. *Trans. Third Int. Congr. Soil Sci.* **2**, 37.

Stovin V., Dunett N., Hallam A. [2007]. Green roofs – getting sustainable drainage off the ground. Techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie **1**, 6ème conférence internationale, 11-18.

Valla E., Brelot E., Chocat B. [2005]. Eau pluviales à la ville et à la campagne. *Groupe de recherche Rhône-Alpes sur les infrastructures et l'eau, Gestion de l'eau à l'échelle des bassins versants : Que fait-on des eaux pluviales ?* 15-43.

Wonga N., Chena Y., Ongb C., Siab A. [2003]. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment* : **38** (2003), 261 – 270.

Sites internet :

Econeau [2006]. L'eau ne doit pas servir au ménage de la rue, ménagez l'eau. Ville d'Ottawa.
http://www.ottawa.ca/city_services/water/efficiency/watering_fr.shtml, 10/04/07.

IBGE [?]. Guide conseil. *Région de Bruxelles-Capitale*.
http://www.ibgebim.be/FRANCAIS/pdf/Entreprise/Energie/28_guideConseilMO.pdf,
10/07/06.

Lambot F., Dewil P. [2003]. Plan P.L.U.I.E.S. *Région Wallonne, DGRNE, DGVH*.
http://environnement.wallonie.be/de/dcenn/plan_pluies/objectifs.htm, Plan "P.L.U.I.E.S.",
17/07/06.

Musy A. [2005]. Cours d'Hydrologie générale. *Ecole polytechnique fédérale de Lausanne*.
<http://hydram.epfl.ch/e-drologie/>, Hydrologie générale, 16/03/07.

SMEGREG [2006]. Calcul d'arrosage. Syndicat mixte d'études pour la gestion de la ressource
en eau du département de la Gironde, ARRDHOR.
<http://www.jeconomiseleau.org/calcul01.html>, 10/04/07.

Tassin B.[2006]. Gestion des eaux du lotissement. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
daywater.enpc.fr/HyperNews/get.cgi/hydurb/43/7.html, 02/03/07.

Wikipédia [?]. Jardins suspendus de Sémiramis.
http://fr.wikipedia.org/wiki/Jardins_suspendus_de_Babylone, 16/07/07.

Fournisseurs :

IBIC bvba [?]. Uw dak...uw tuin. Fiche technique : Substrat extensif 2/12 mm. 1 p.

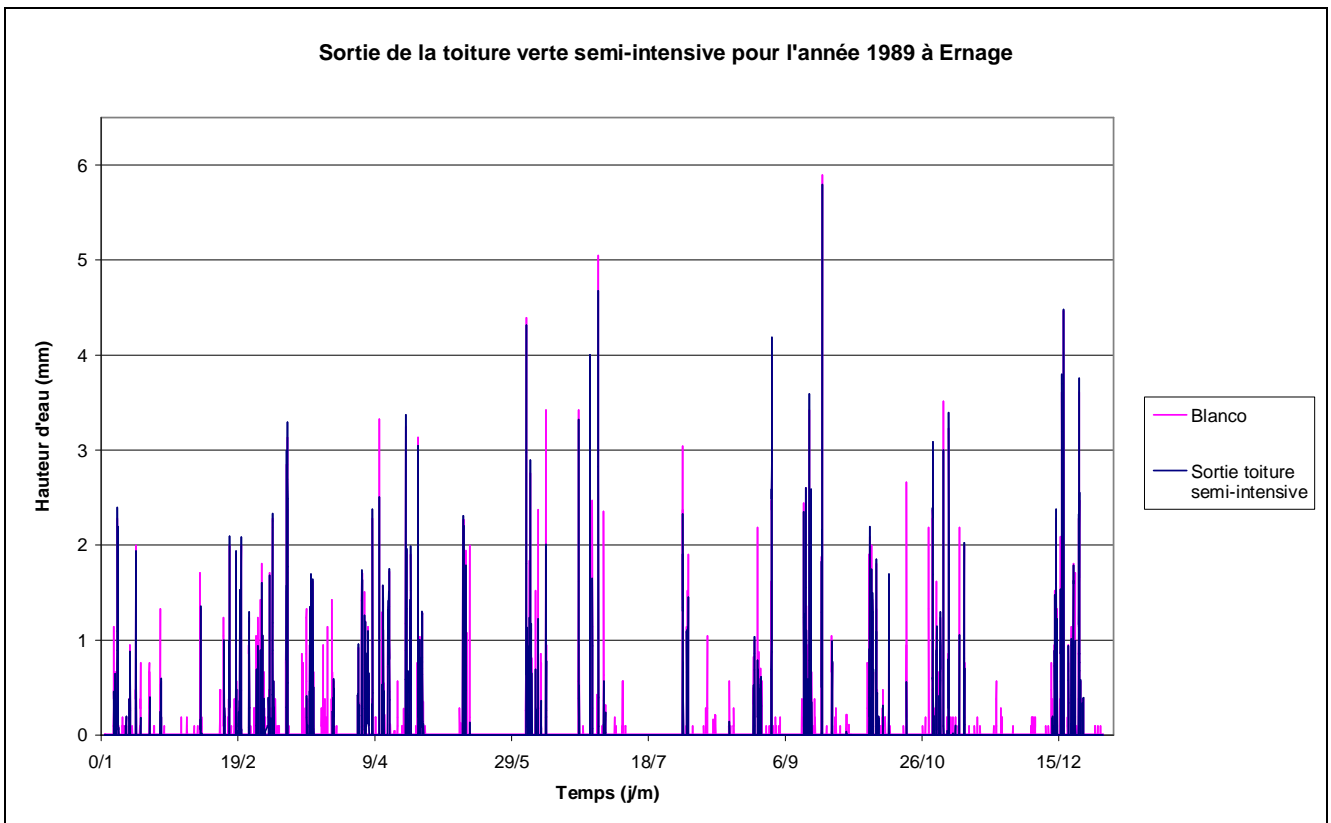
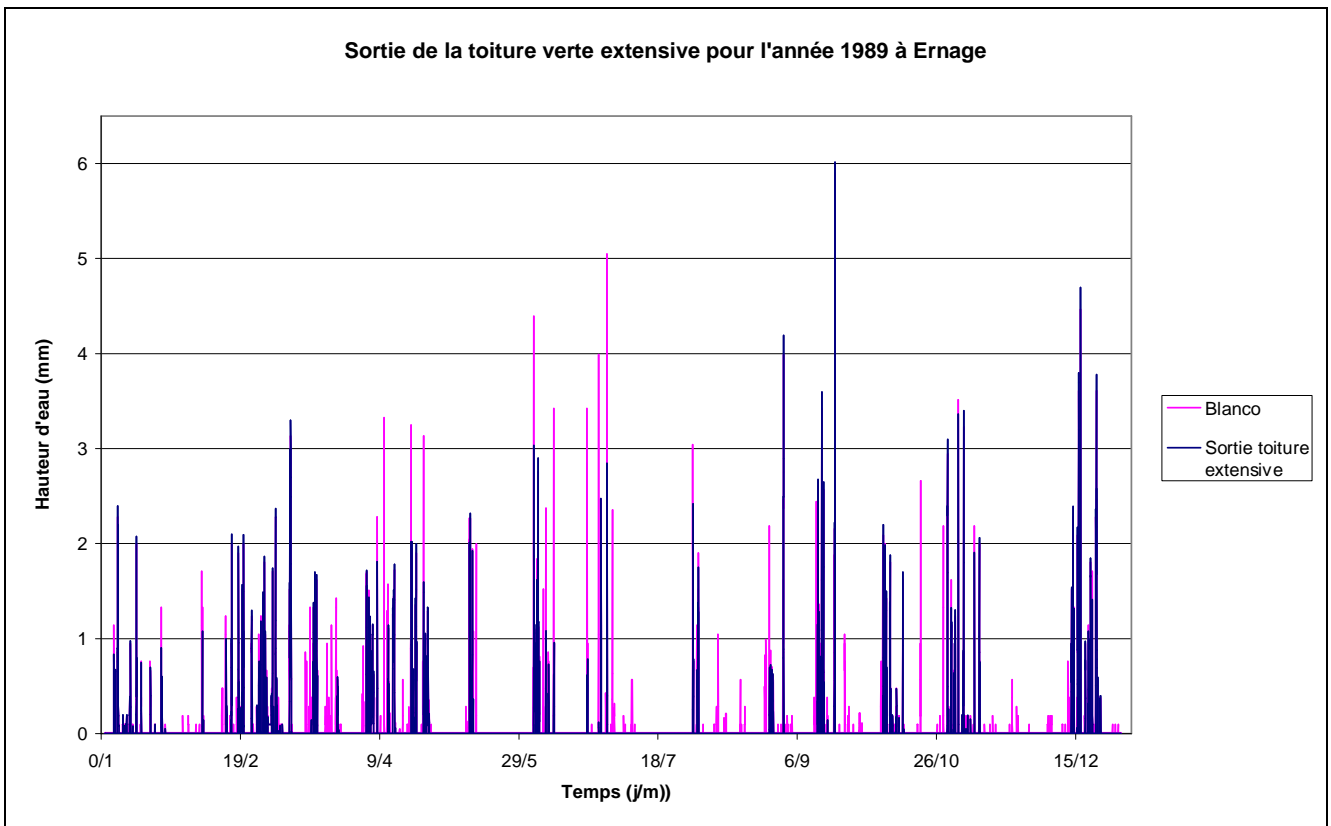
Tecmat [2005]. Les toitures vertes : Conception, mise en œuvre et entretien. *Tecmat*, 1-10.

Btech nv. sa [2006]. Daku : Toitures vertes. Catalogue.
<http://www.btech.be/04%20DAKU/DAKU%20toiture%20verte.pdf>, 10/07/06.

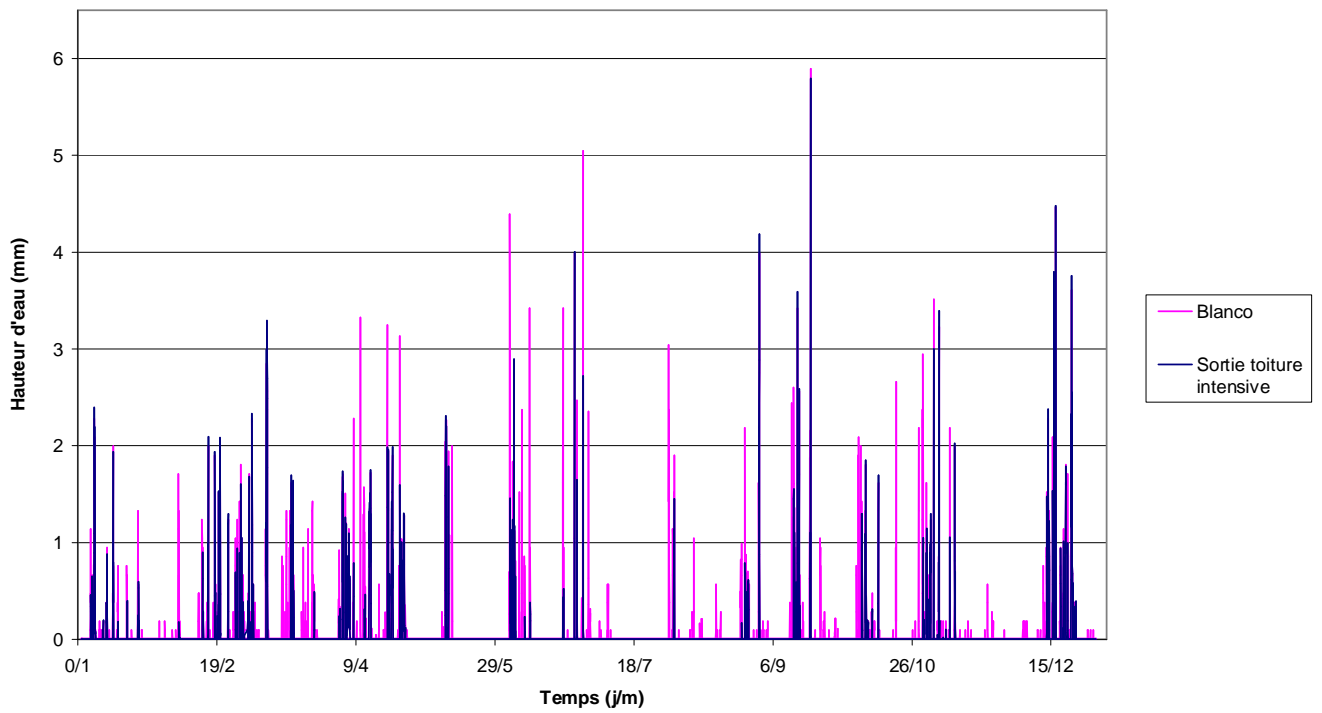
Hydrotech Inc. [?]. <http://www.hydrotechusa.com/START.HTM>, 20/07/06.

9. Annexes

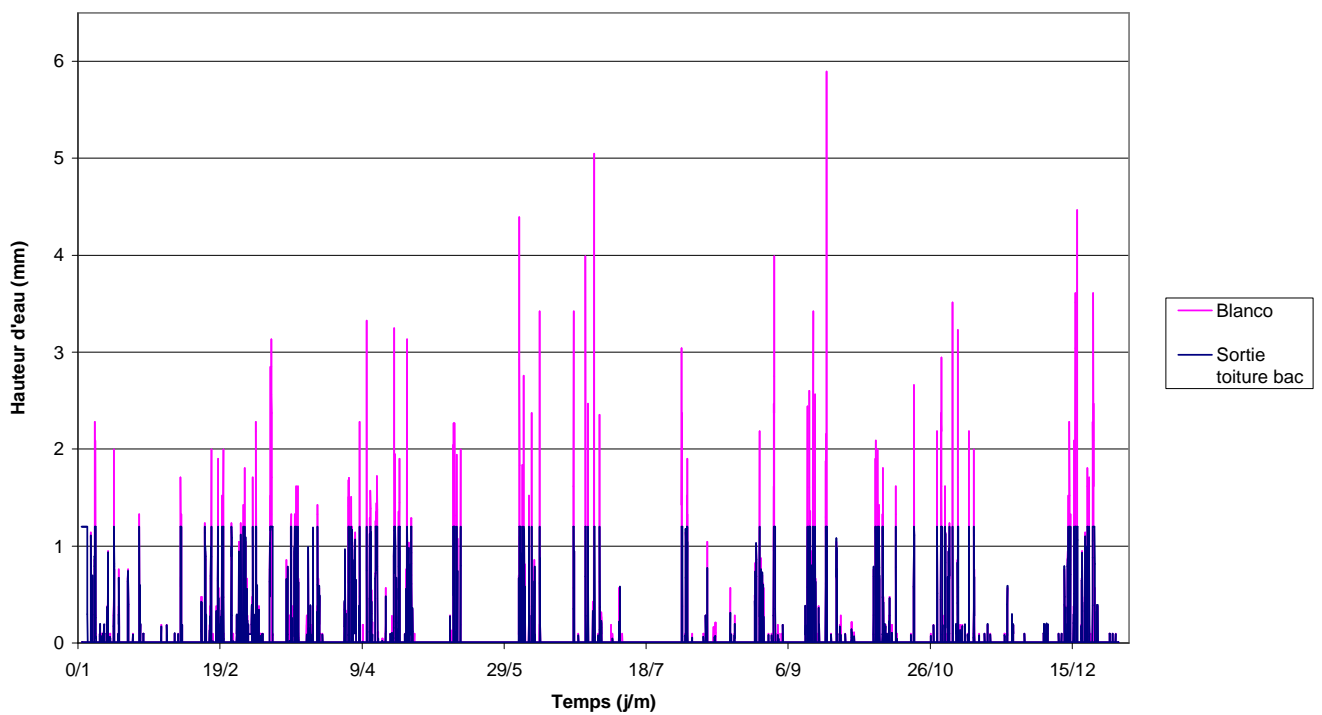
9.1. Graphiques annuels



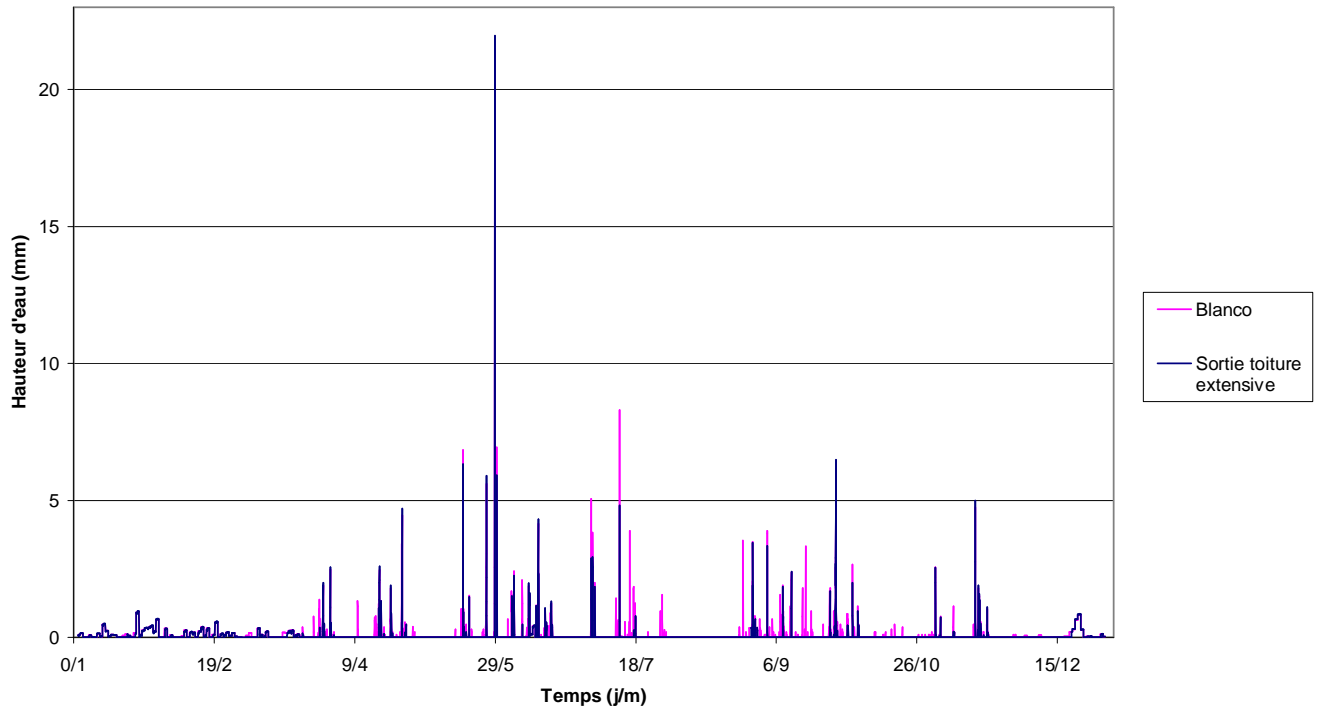
Sortie de la toiture verte intensive pour l'année 1989 à Ernage



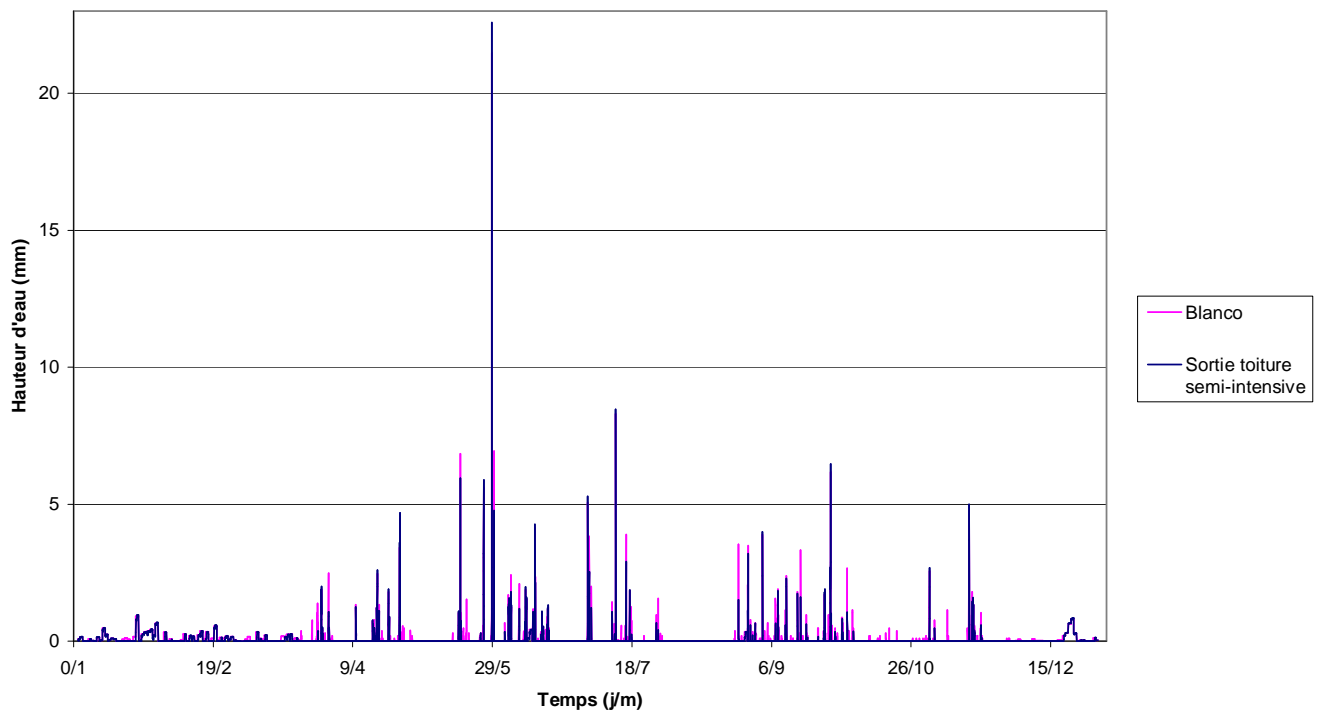
Sortie de la toiture bac pour l'année 1989 à Ernage



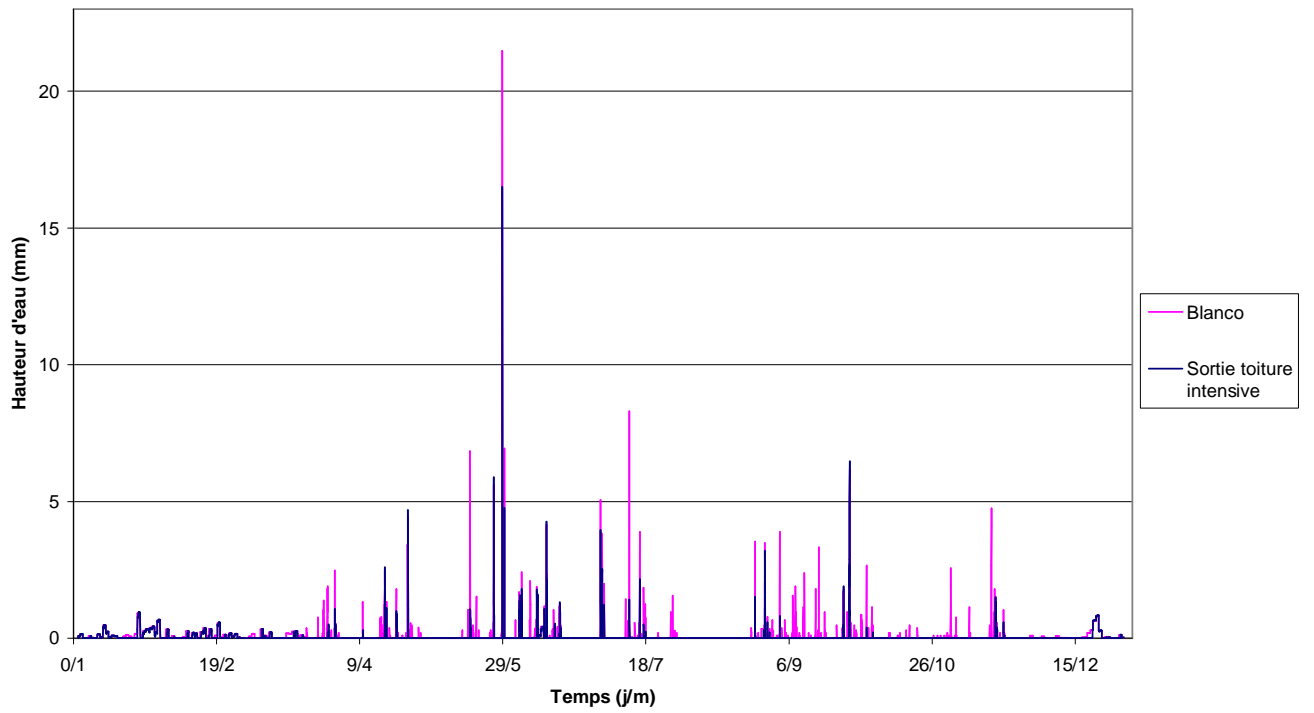
Sortie de la toiture verte extensive pour l'année 1995 à Ernage



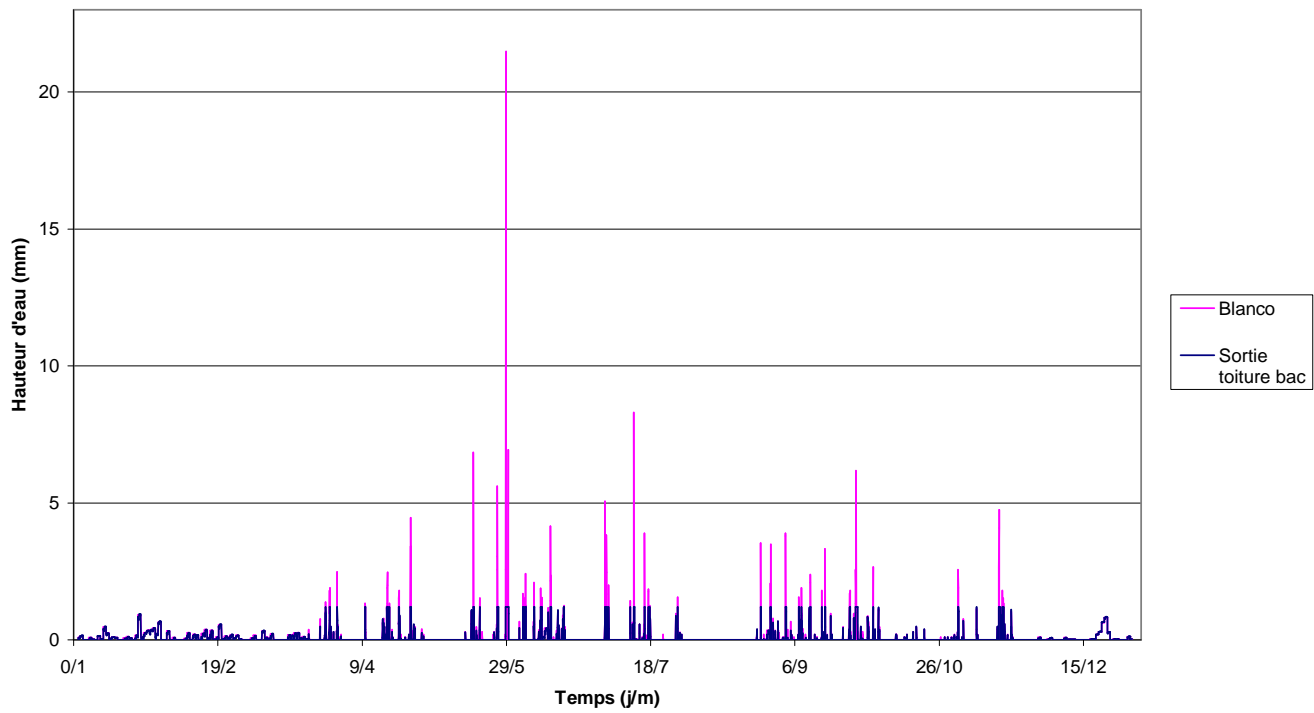
Sortie de la toiture verte semi-intensive pour l'année 1995 à Ernage



Sortie de la toiture verte intensive pour l'année 1995 à Ernage



Sortie de la toiture bac pour l'année 1995 à Ernage



9.2. Fiche technique de la sonde mini-Diver

Mini-Diver datalogger



Applications:

- Mesure et enregistrement autonome des niveaux d'eau et de température
- Réseau de surveillance des eaux souterraines

Mini-Diver – un concept qui a fait ses preuves

Le MiniDiver se base sur un concept ingénieux et qui a fait ses preuves ; il s'agit d'un instrument extrêmement fiable servant à mesurer et enregistrer de manière autonome le niveau et la température des nappes phréatiques. La mémoire interne de 24.000 mesures par paramètre offre une capacité suffisante pour effectuer des mesures toutes les dix minutes durant six mois. La date et l'heure, le niveau d'eau et la température sont déterminés à chaque mesure. La pile intégrée présente une durée de vie d'environ dix ans. Grâce à ses dimensions compactes (diamètre de 22 mm et longueur de 90 mm) et une intégration inégalée, le MiniDiver peut être utilisé dans pratiquement toutes les situations : puits, piézomètres.



Avantages:

- Garantie de 3 ans
- Mesures fiables et précises
- Mesures fréquentes sur de longues durées
- Mesures avec correction de température
- Mémoire non volatile
- Ne nécessite pas d'entretien
- Invisible de l'extérieur réduisant les risques de vandalisme
- Format compact
- Boîtier hermétiquement scellé en acier inoxydable

Généralités:

Dimensions	Ø22 mm x 90 mm
Capacité de la mémoire	24.000 mesures (mémoire non volatile)
Fréquence des mesures	de 0,5 seconde à 99 heures
Matériau du boîtier	Acier inoxydable 316L
Matériau du capteur de pression	Céramique (Al ₂ O ₃)
Plage d'utilisation en température	de -20 °C à 80 °C
- précision	± 0,1 °C
- résolution	0,01 °C
Plage de compensation en température	de 0 °C à 40 °C
Durée de vie des batteries	10 ans (en fonction de l'utilisation)
Poids	70 grammes



Spécifications techniques du Mini-Diver®

Type	DI 501	DI 502	DI 505	DI 510	DI 500 (Baro)
Etendue de mesure	10 m H ₂ O	20 m H ₂ O	50 m H ₂ O	100 m H ₂ O	1,5 m H ₂ O
- précision**	0,5 cm H ₂ O	1 cm H ₂ O	2,5 cm H ₂ O	5 cm H ₂ O	0,5 cm H ₂ O
- résolution	0,2 cm H ₂ O	0,4 cm H ₂ O	1 cm H ₂ O	2 cm H ₂ O	0,1 cm H ₂ O

** sur la plage compensée en température

9.3. Calcul de l'évapotranspiration potentielle

Un grand nombre de modèles existe pour le calcul de l'ETP. Comme nous l'avons expliqué au paragraphe 3.1., notre choix s'est porté sur le modèle original de Penman. Malgré les raisons de ce choix dans le contexte particulier de cette étude, nous souhaitons présenter les différentes possibilités.

La FAO préconise l'emploi de la formule de Penman-Monteith modifiée. L'équation de base de ce modèle est la suivante :

$$\lambda ET = \frac{d(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e'_a - e_a)}{r_a}}{d + a(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad [\text{Allen et al., 1998}]^{16}$$

Avec :

d	Pente de la courbe de saturation de la vapeur d'eau à la température de l'air [kPa.°C ⁻¹]
a	Coefficient psychrométrique [kPa.°C ⁻¹]
R _n	Rayonnement net [W.m ⁻²]
e' _a	Tension de vapeur saturante à la température de l'air [kPa]
e _a	Tension de vapeur à la température de l'air [kPa]
G	Densité de flux de chaleur du sol [MJ.m ⁻² .j ⁻¹]
ρ _a	Densité de l'air à pression constante [kg/m ³]
c _p	Capacité thermique de l'air humide [J/kg/°C]
r _s	Résistance de surface [s/m]
r _a	Résistance aérodynamique [s/m]
λ	Chaleur latente de vaporisation de l'eau [J/kg]

La résistance aérodynamique se calcule comme suit :

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right)^2}{k^2 u_z} \quad [\text{Allen et al., 1998}]$$

Avec :

z	Hauteur de la mesure du vent [m]
z _o	Hauteur de frottement [m]
d	Translation du plan origine [m]
k	Constante de von Karman (0,41)
u _z	Vitesse du vent à la hauteur z [m.s ⁻¹]

Et la résistance de surface :

¹⁶ Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M. [1998]. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *F.A.O. Irrigation and drainage*, paper 56

$$r_a = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad [\text{Allen et al., 1998}]$$

Avec :

r_l Résistance stomatique [$s.m^{-1}$]
 LAI_{active} Index de surface foliaire [m^2]

La combinaison de ces trois équations et l'intégration des valeurs des paramètres choisies par la FAO donnent l'équation modifiée de Penman-Monteith :

$$ET_0 = \frac{0.408.d(R_n - G) + a \frac{900}{T + 273} u_2 (e'_a - e_a)}{d + a(1 + 0.34u_2)} \quad [\text{Allen et al., 1998}]$$

Avec :

T Température [$^{\circ}C$]
 u_2 Vitesse du vent à 2m [m/s]

La résistance stomatique préconisée par la FAO est de 70 s/m.

Selon Choisnel et al. [1992]¹⁷, cité par Sau et al. [1998]¹⁸, dans une étude visant à uniformiser le calcul de l'évapotranspiration pour la communauté européenne, l'approche originale de Penman est considérée comme plus fiable que celle de Penman-Monteith.

Dans l'étude de Ducharne [2002]¹⁹, la formulation originale de Penman utilisée dans les conditions d'application posées au paragraphe 3.1. est comparée avec la formulation FAO de Penman-Monteith et avec une formulation FAO sans résistance stomatique. Les résultats montrent que les ETP sont bien toutes supérieures à l'évapotranspiration réelle simulée par un modèle interne au projet. L'évaporation potentielle (FAO sans résistance stomatique) est supérieure aux deux ETP (sauf en hiver pour Penman, ce qui s'explique par le fait des conditions d'application qui ne permettent pas aux deux termes de l'équation d'être négatifs, condition qui n'est pas imposée dans les formules FAO). Cependant, l'ETP calculée par Penman est plus élevée que celle de la FAO et aussi plus proche en valeur de l'évaporation potentielle. Ceci signifie soit que la résistance imposée par la FAO est trop élevée, soit que l'ETP de Penman correspond à une évaporation potentielle. La méthode choisie pour cette étude est finalement celle de Penman, considérant que l'ETP de Penman représente l'évapotranspiration maximale d'un gazon non limité par l'eau, donc dont la résistance stomatique est minimale.

¹⁷ Choisnel, E., de Villèle, O. & Lacroze, F. [1992]. Une approche uniformisée du calcul de l'évaporation potentielle pour l'ensemble des pays des communautés Européennes. Centre Commun de Recherche, Commission des Communautés Européennes, Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, 175 p.

¹⁸ Sau F., Lopez-Cedron F.-X., Minguez M.-I. [1998]. Reference evapotranspiration : choice of method. *Universidad de Santiago de Compostel y Universidad Politécnica de Madrid*, 1-5.

¹⁹ Ducharne A. [2002]. Projet GICC-Seine : Questions relatives à l'ETP. *Gicc-Seine*, 1-11