



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

THÈSE DE DOCTORAT

Pour obtenir le titre de

Docteur de l'université de Lorraine

Spécialité : Mécanique et Énergétique

Présentée par

Ryad BOUZOUIDJA

Fonctionnement hydrique d'un Technosol superficiel - application à une toiture végétalisée

Soutenue le 13 novembre 2014 devant un jury composé de :

<i>Rapporteurs :</i>	M. Patrice CANNAVO	Maître de conférence, Agrocampus Ouest, Angers
	M. Marnik VANCLOOSTER	Professeur, ELIE, Université de Louvain, Belgique
<i>Examineurs :</i>	M. Rafik BELARBI	Maître de conférence, Lasie, Université de La Rochelle
<i>Directeur de thèse :</i>	M. David LACROIX	Professeur, LEMTA, Nancy
<i>Encadrants de thèse :</i>	M. Rémy CLAVERIE	Chargé de recherche, CEREMA-DTerEst, Nancy
	M. Geoffroy SÉRÉ	Maître de conférence, LSE, Nancy
<i>Invités :</i>	M. Julien BOUYER	Chargé de recherche, CEREMA-DTerEst, Nancy
	M. Luc NUTTENS	Ingénieur, Nidaplast
	M. Fabrice RODRIGUEZ	IDTPE, IFSTTAR, Nantes

Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée - UMR 7563 Laboratoire
Sols et Environnement - UMR 1120

Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
- DTerEst

Remerciements

Il est parfois difficile de donner des adjectifs ou même de retranscrire des sentiments sur ces trois années de thèse. Je pense que cette thèse à travers l'étude des toitures végétalisées n'est pas l'achèvement d'un travail effectué mais plus une ouverture vers d'autres cieux et les toitures en sont la première étape. Pour reprendre un poème de Paul Verlaine : « *Le ciel est, par-dessus le toit, Si bleu, si calme ! Un arbre, par-dessus le toit, Berce sa palme.* Peu être que Paul Verlaine voyait déjà une végétation sur les toits ?

Une thèse est un aventure humaine sans commune mesure et est aussi à l'image d'un arbre, un développement progressif vers le haut à partir d'une base racinaire solide (connaissances), pour développer une végétation resplendissante (résultats) sous l'action de différents apports (réflexions scientifiques) et des processus de transferts et d'échanges en interaction avec son milieu naturel (monde de la recherche et de l'entreprise).

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) dirigé par Monsieur **Fabrice Lemoine**.

Je tiens à remercier d'abord **Damien Verwilghen** puis **Patrick Stievenard** respectivement ex. et actuel PDG de la société NIDAPLAST pour m'avoir permis d'entreprendre ce travail de thèse. Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à **Hubert Perrier**, ex directeur du CEREMA DTerEst -Laboratoire Régional de Nancy (Ex. CETE de l'Est) pour m'avoir accueilli en 2011 alors que je commençais ma thèse. Je tiens à exprimer ma vive reconnaissance à **Jean Louis Morel** puis **Christophe Schwartz**, directeurs du laboratoire Sols et Environnement à mon arrivée pour leurs accueils au sein du laboratoire pour m'avoir assuré les meilleurs conditions pour réaliser et terminer ma thèse et m'avoir offert la possibilité d'apprendre et d'échanger sur différents sujets scientifiques varier.

J'exprime toute ma sincère gratitude à mon directeur de thèse **David Lacroix** non seulement pour avoir guidé mes pas tout au long de mon apprentissage de la recherche mais surtout pour la confiance qu'il m'a accordé et témoigné durant cette fantastique aventure, tout en encourageant mes efforts pour aller toujours plus loin. Mes chaleureux remerciements vont ensuite vers mes deux encadrants **Geoffroy Séré** et **Rémy Claverie** pour l'ensemble des moments passés durant ces trois années et demi. A vous deux, je veux vous dire toute ma profonde reconnaissance pour votre savoir, votre savoir-faire, votre patience, votre écoute et le soutien nécessaire à la bonne réalisation de cette thèse. De plus, comment ne pas mentionner les nombreux moments de rires et de convivialités, que ce soit sur le terrain ou, en réunion ou en congrès.

Geoffroy, merci pour tous ces instants à m'expliquer la physique du sol et les différents protocoles d'essais de caractérisation, moi qui n'en a jamais fait. Merci d'avoir toujours répondu avec le sourire à l'ensemble de mes interrogations face à un sujet que je découvrais ou en m'aidant à gérer mon stress avant une présentation, je cite : « *Ryad, là, il faut que tu nous vendes du rêve...* ». Merci d'avoir accepter de slalomer entre des versions .pdf et .doc parfois avec quelques petits soucis. Ce n'est pas faute d'avoir essayé de t'initier à L^AT_EX. Merci de m'avoir supporter durant ces six derniers mois de rédaction (Marie aussi!!).

Rémy, Merci pour ces très bon moments, l'aventure a commencé un certain 22 janvier à 16h00 au LRPC (J'ai encore le mail!!) avec un entretien de stage sur les toitures végétalisées. Cette histoire s'est prolongée jusqu'en 2014 avec une soutenance de thèse comme cerise sur le gâteau. Au cours de cette période, il y a eu des moments de doutes, une remise en question, mais tu as toujours su trouvé les mots qu'il fallait en toutes occasions. Je te remercie aussi pour les coups de pression qui m'aidaient à toujours

aller de l'avant!! Tu apportais avec David et Geoffroy un regard scientifique mais aussi pragmatique sur le déroulement de la thèse lorsque je parlais sur des campagnes de caractérisation interminables.

Je tiens à remercier mon responsable au sein de l'entreprise NIDAPLAST, **Luc Nuttens**, pour m'avoir accompagné durant ce travail de thèse. Cette immersion en entreprise m'a permis de côtoyer d'un peu plus près un autre monde que celui du monde universitaire. Je me suis rendu fréquemment sur le site industriel soit pour contribuer à des tâches en lien avec mon travail de thèse, ou pour rendre compte de l'avancé du travail de thèse. J'ai vraiment apprécié le climat chaleureux de l'ensemble du personnel de NIDAPLAST.

J'exprime toute ma gratitude à **Partrice Cannavo** et **Marnik Vanclooster** pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. L'intérêt profond que vous avez porté à mon travail a permis d'initier de nombreuses pistes de réflexion sur les résultats acquis. J'adresse également mes sincères remerciements à **Rafik Belarbi**, pour avoir accepté de lire mon manuscrit de thèse, pour l'intérêt que vous avez porté à mes travaux et la façon dont vous avez contribué aux discussions.

Je remercie vivement **Julien Bouyer**, **Luc Nuttens** et **Fabrice Rodriguez** d'avoir accepté de lire mes travaux et de participer au jury de cette thèse. Votre présence montre l'intérêt que vous avez pu porter aux travaux que j'ai menés durant trois ans.

J'ai eu la chance de côtoyer différentes structures. D'abord, le **CEREMA-DTerEst (ex. CETE de l'Est) - Laboratoire Régional de Nancy** qui fût le cadre principal de cette aventure. Suivi par le **Laboratoire Sols et Environnement (LSE)**. J'ai eu la chance de séjourner sur le site de l'entreprise NIDAPLAST et enfin, le **Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA)**. Je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble des différents personnels (permanents et temporaires) pour m'avoir aidé à mener ce projet à terme et tous les moments de partage, d'apprentissage que j'y ai trouvé durant ces années.

Je tiens aussi à remercier l'équipe technique du LSE "*The dream team*", particulièrement **Adeline Bouchard** pour sa joie de vivre communicative, sa disponibilité et son aide pour le fractionnement granulométrique, **Stéphane Colin** pour son humour, sa répartie, son ingéniosité et son aide pour la mise en place de mon dispositif expérimental, la conception et la réalisation de solutions à différentes problématiques techniques. Je voudrais le féliciter pour sa prestation théâtrale renversante. Aussi, **Alain Rakoto** pour son aide informatique, son souci de la sécurité au quotidien (*On ne porte pas de gants dans les bureaux..!!*).

Je remercie l'équipe **technsol** du LSE, dirigée d'une main de maître par (**Sophie Leguédois** et **Françoise Watteau**). J'ai pu apprendre la notion de technsolisation, même s'il y a encore des divergences sur la sémantique employée. Merci **Sophie Leguédois** pour nos échanges sur des aspects modélisations, résolution d'équations différentielles, système d'exploitation Linux et quelques échanges de pieds en tribune!! Merci **Françoise Watteau** pour ta sagesse, ta rigueur au quotidien et ta patience lorsque je cherchais inlassablement Geoffroy dans le bureau. Merci **Élodie-Denise Chenot** pour ta bonne humeur, ta joie de vivre, ta créativité lors des réunions d'équipe et surtout pour tes très bonnes préparations culinaires. Merci **Apolline Auclerc** pour ces ... comment dire, pour ta passion à animer une discussion, à proposer des contrepéties souvent très originales et ces délires aux différentes soirées.

Je tiens aussi à remercier l'équipe **Phytoremédiation des sols contaminés** du LSE qui m'a initié : aux plantes hyper-accumulatrices, les sols contaminés aux métaux lourds et les Hydrocarbure aromatique polycyclique (HAP). Je tiens aussi à remercier **Noëlle Raoult** pour m'avoir permis d'assister aux plénières du GISFI et aussi nos échanges lors des pauses déjeunés et café.

Je tiens également à remercier les stagiaires du LSE qui ont contribué à la réalisation de ce projet : **Cynthia Meyer** pour aide très précieuse lors des essais d'évaporation sous serre avec des températures qui frisaient les 40 °C et les différentes caractérisations du substrat. Merci à **Marwa Tiffafi** avec qui j'ai eu la chance de collaborer sur des thématiques de physique du sol et partager des instants mémorables !

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel de NIDAPLAST. Je commencerai par **Cécile Minet** et **Catherine Levacher**, qui m'ont suivi tout au long de mon travail de thèse d'un point administratif. Merci **Marie-Claire...** responsable formation pour les très bons conseils lors de la réalisation d'un des posters que j'avais fait sur les toitures végétalisées. Merci à l'équipe de comptabilité, qui a du me supporter avec mes demandes sur comment remplir des fiches de remboursement parfois hors délai (encore désolé). Merci aux différentes équipes de la **maintenance**, aux **responsables opérationnels** et de façon général aux **opérateurs** pour leurs soutiens lors de mes séjours, de leurs aides parfois à transporter des EP 500 à l'extérieur, à l'équipe **expédition** pour leurs présences et leurs bonnes humeurs à chaque visite de ma part. Je voudrais remercier l'équipe **marketing** pour la bonne humeur même si nos échanges étaient brefs. Merci **José Sanchez** pour les moments de discussion intenses et surtout de garder son calme lorsque j'appelais deux jours avant voire le jour même pour réserver le véhicule de service, mais il trouvait toujours une solution. Merci **Catherine** pour les très bons moments à la pause déjeuner, tu apportais un rayon de soleil avec ton sourire mais surtout avec tes histoires. De façon général, merci pour ces instants magnifiques où j'ai pu connaître l'hospitalité des gens du Nord !!

Je voudrais remercier les membres de l'équipe **Transfert radiatif** à la fac des sciences de Vandœuvre (**Gérard, Sébastien, konstantinos, Pascal, Bernard, Gilles, Damien, Omar, Valentin, Isabella, Patricia et Chen**) pour leurs accueil lors de ma dernière phase de thèse (La rédaction) qui a été forte en émotion. Même si cette période fût courte, elle aura été très instructive.

je voudrais aussi remercier les membres du CEREMA-DTerEst (ex. CETE de l'Est) - Laboratoire Régional de Nancy, à travers les différents groupes. Je commencerai par le groupe **SOLEO**. Merci à tous mais en particulier **Julie Schwager** avec qui nous avons partagé durant trois ans une magnifique toiture végétalisée, j'espère qu'on aura l'occasion de travailler ensemble, merci à **Aurélien Gérolin** pour ces multiples échanges tous fructueux, merci à **Véronique Heili** et **Florian Berson** pour votre aide sur la caractérisation des géotextiles. Je voudrais remercier **Alexandre Lanher, Jérémy Thiriat** et **Amandine Irles** qui ont beaucoup travaillé parfois avec des conditions météorologiques pas possibles afin de récolter les données sur le toit ou de faire en sorte que les données soient disponibles. Merci à **Sébastien Thiery** pour son soutien informatique et logistique (réservation vidéo-projecteur). Je voudrais remercier les membres du groupe **CEMI** en particulier **Samyr El-Bedhoui, Guy Henryon, Emilie Berthier** pour leurs aides très précieuses lors des différentes phases de caractérisation du substrat, merci pour votre disponibilité. Merci au groupe **OA** pour votre bonne humeur et votre soutien pour la réalisation d'un coulage de béton. Merci aux membres du groupe **ICE**. Ce groupe avec qui j'ai commençais mon stage en 2010 et poursuivi ma thèse entre 2011 et 2014. je commencerai par les absents **Guillaume Derombise**, qui est maintenant sous d'autres cieux (Paris), tu m'as à mainte reprise conseillé sur le déroulement d'une thèse mais nous avons aussi beaucoup échangé, rigolé lors des pauses café, je retiendrai aussi "tes phrases du jour" qui avaient parfois un sens caché. Merci à **Charles Reveilleaux** stagiaire au groupe ICE. Tu apportais ce je ne sais quoi qui mettait instantanément une ambiance joviale dans le bureau. Un grand merci à **Philippe Combas** qui a **énormément** participé à une partie non négligeable de la thèse "l'évapotranspiration", merci d'avoir pris le temps de revoir le code avec moi, d'avoir pris sur ton temps pour m'aider à finaliser certains calculs. Merci à **Stéphanie Poissonnier, Éthel Jacquot**,

d'achats et enfin **Xavier France** pour la réalisation de certains essais.

Berthier, Fabrice Rodriguez et Claude Joannis. Je suis fier de faire partie de cette belle équipe.

de discuter avec toi.

Merci **Frederic Rees** alias **Childos** pour ces moments en WEED, pour le film du LSE, pour les jeux

et la multitude de séances ciné, je voudrais ici saluer ta culture cinématographique très riche et de façon général ta culture (Respect!!). Merci **Robin Dagois alias Robino** pour déjà être fan de rockn'roll, merci pour le festival Sonisphere 2013 où je me suis vraiment amusé, même avec un coup de soleil, sans voix après et la twingo comme tente, merci d'être un compagnon de chorale avec Marie, merci pour ces instants AC/DC - Thunderstruck chez Marie, merci d'être toujours disponible avec **la twitwi**, merci pour la tarte tatin qui est succulente. Merci **Dimitri Ubersfeld alias Dimichou**, je ne dirai pas l'autre!!!. Je tenais d'abord à saluer ton immense connaissance sur la vie aquatique (une connaissance océanique..). Merci de partager une passion de l'automobile, merci pour ta gentillesse, ton partage en toutes circonstances, merci d'être parmi les seuls à m'accompagner pour un groooooos sandwich. tu as été souvent présent lorsque j'en avais besoin, merci pour l'essai de la GTI, j'ai vraiment surkiffé ☺.

Je tiens aussi à remercier **Lucia Santorufo** pour m'avoir invité en Italie et m'avoir permis de visiter ce beau pays, merci pour tous ces petits moments à discuter. Petites dédicaces à **Gennaro, Raffaele, Adela, Sara, Franco, Maria Térésa et les autres**.

Je voulais aussi remercier **Cédric Gonneau** pour l'ambiance que tu mets à chaque instant et la façon si passionnée de raconter tout et n'importe quoi du moment que cela égaye tout le monde, merci d'avoir essayer de m'apprendre la danse réunionnaise, merci de m'avoir fait goûter une spécialité réunionnaise « le Carri de poulet ». Merci **Sophie Boulanger-Joimel** pour m'avoir tenue compagnie durant cette année. Je tiens à remercier **Rémi Suaire, abderahmen khalifa** et **François Leconte** de m'avoir soutenu lors de ces trois années d'efforts...

Je tiens à remercier chaleureusement **Joan Dupuy**, merci pour ta bonne humeur, pour ta joie de vivre, pour ton sourire, merci avoir été présente pour moi lors des moments difficiles, merci pour ta compassion, ta douceur, ton calme. Tu m'as fait découvrir ta région, tu m'as fait découvrir le foie gras et pleins d'autres spécialités culinaires, tes amis **Catherine, Moktar** et **Élise** que je remercie au passage. Je tiens à saluer ton talent culinaire, c'était et c'est toujours un plaisir d'y goûter. J'ai eu la chance d'assister à ton mariage, j'espère avoir la chance d'assister à **d'autres événements heureux** durant les prochaines années.

Je tiens à remercier particulièrement **Amina Ameur** pour nos échanges très instructifs sur la modélisation, sur l'étude de sensibilité et l'optimisation des paramètres hydriques, merci d'avoir pris le temps pour m'aider lors de la rédaction sous L^AT_EX. Merci de nos discussions qui duraient parfois longtemps, merci pour ton soutien lorsque j'en avais le plus besoin

Je tiens à remercier **Sarra Aissani** et **Wadoud Mehenni** pour l'ensemble des ces instants partagés, je me suis vraiment amusé en votre compagnie.

Je tiens à remercier chaleureusement **Amel Lamri** d'avoir été présente tout ce temps pour relire le manuscrit (merci le décalage horaire avec le canada!!), merci pour les conseils diverses et variés, tout simplement merci d'être là. Je tiens aussi à remercier **Kahina Lamri** pour son écoute, pour ses conseils avisés, pour sa joie de vivre, tout simplement pour sa présence. Merci à **Sandra**, nous arriverons un jour à nous voir (je garde espoir!!), merci pour ton esprit pragmatique, pour ton esprit positif, ne change pas, garde ton caractère!! Merci à **Seif eddine Kramdi** pour m'avoir souvent aidé à régler des petits soucis d'algorithmique et de programmation.

Je tiens enfin à remercier mes parents qui m'ont permis d'en arriver là aujourd'hui. Il n'y pas de mots pour exprimer ce que je ressens. « *Un père et une mère sont nos premiers amis, ils sont les mortels à qui nous devons le plus* » **Silvio Pellico, Des devoirs des hommes, 1834**.

« La peur n'est pas un mal, elle te dit quelle est ta faiblesse. Et lorsque tu en prends conscience, tu deviens plus fort, meilleur. »

Hiro MASHIMA

« À mes deux grands mères »

Table des matières

Nomenclature	1
Introduction	5
1 Contexte général	7
1.1 Problématiques liées au cycle de l'eau urbaine	8
1.1.1 Environnement urbain : imperméabilisation, faible densité de végétation, micro-climatologie urbaine	8
1.1.2 Conséquences : saturation des réseaux, inondations, mauvaise qualité des eaux de ruissellement	9
1.2 Solutions de gestion	9
1.2.1 Stratégie actuelle de gestion des eaux pluviales	9
1.2.2 Techniques alternatives innovantes	10
1.3 Végétalisation des toitures	11
1.3.1 Historique	11
1.3.2 Description du concept actuel de toiture végétalisée	11
1.3.3 Constituants	12
1.3.4 Fonctions attendues	14
1.4 Conclusion partielle	16
1.5 Questionnement	17
2 État de l'art	19
2.1 Introduction	20
2.2 L'eau dans les milieux poreux	20
2.2.1 Caractéristiques physiques et hydrauliques des milieux poreux	20
2.2.2 Les différentes échelles d'observation	22
2.3 Spécificité des toitures végétalisées	24
2.4 Dynamique de l'eau au sein d'une toiture végétalisée	24
2.4.1 Capacité de rétention en eau	24
2.4.2 Quantification de l'effet retard	26
2.4.3 Importance du phénomène d'évapotranspiration	26
2.5 Évolution des constituants des toitures végétalisées	27
2.5.1 Modèles fonctionnels ou conceptuels	29
2.5.2 Modèles physiques	31
2.5.3 Influence du phénomène d'hystérèse	37
2.6 Comparaison des modèles	39
2.7 Objectifs, questionnement et hypothèses	39

3	Caractérisation physique et hydrique des constituants d'une TV	41
3.1	Introduction	42
3.2	Matériels et méthodes	42
3.2.1	Présentation des constituants	42
3.2.2	Préparation des échantillons	43
3.2.3	Prélèvement du substrat	44
3.2.4	Mesures physiques	44
3.2.5	Mesures hydriques	45
3.3	Résultats et discussion	51
3.3.1	Le substrat	51
3.3.2	Les billes d'argile	55
3.3.3	Le géotextile	57
3.3.4	Première évaluation des performances hydriques	58
3.4	Conclusion partielle	58
4	Étude expérimentale de l'hydrodynamique d'une TV	61
4.1	Introduction	62
4.2	Matériels et méthodes	62
4.2.1	Présentation des différents « profils » de TV	63
4.2.2	Description du dispositif expérimental de laboratoire	64
4.2.3	Description de la plateforme expérimentale du LRN à Tomblaine	67
4.3	Résultats et discussion	74
4.3.1	Évolution de la géométrie des TV à l'échelle du bâtiment	74
4.3.2	Étude hydrodynamique à l'échelle du laboratoire	76
4.3.3	Étude hydrodynamique à l'échelle du bâtiment	79
4.4	Conclusion partielle	93
4.4.1	Caractéristiques hydriques	93
4.4.2	Performances	94
4.4.3	Évolution des TV	95
5	Simulation de l'hydrodynamique d'une TV	97
5.1	Introduction	98
5.2	Simulation numérique	98
5.2.1	Description du modèle	98
5.2.2	Étude de sensibilité	102
5.2.3	Optimisation des paramètres	103
5.2.4	Fiabilité des résultats	104
5.3	Résultats et discussion	105
5.3.1	Influence des paramètres hydriques sur la modélisation à l'échelle du laboratoire	105
5.3.2	Simulation des constituants de la toiture végétalisée à l'échelle du laboratoire	108
5.3.3	Simulation des constituants de la toiture végétalisée à l'échelle du bâtiment	113
5.4	Conclusion partielle	122
6	Conclusion et perspectives	125

Bibliographie	129
A Mesures physiques	145
A.1 Analyse granulométrique	145
A.1.1 Principe	145
A.1.2 Matériel utilisé	145
A.2 Détermination de la densité apparente	145
A.2.1 Appareil	145
B Mesures hydriques	147
B.1 Détermination de la courbe de rétention	147
B.1.1 Méthode des presses à membrane	147
B.1.2 Principe	147
B.1.3 Protocole	147
B.1.4 Matériel	147
B.1.5 Modes opératoires	148
B.2 Méthode d'évaporation (méthode de Wind)	150
B.3 Méthode de la charge constante	150
B.3.1 Appareil	150
B.3.2 Mode opératoire	151
B.4 Expérience de saturation/drainage : méthode opératoire	152
B.4.1 Détail de la méthode	152
C Système d'acquisition	153
C.1 Système d'acquisition thermique	153
C.1.1 Description du système d'acquisition thermique	153
C.1.2 vérification des sondes de température	155
C.1.3 Installation des sondes de température	155
C.2 Système d'acquisition hydrique	155
C.2.1 Calibration des sondes hydriques	157
D Méthode de calcul de l'évapotranspiration	159
D.1 Méthode de Penman	159
D.2 Méthode de Penman-Monteith	160
D.3 Méthode de Penman-Monteith-FAO56	160
D.4 Méthode d'évaluation du flux d'évapotranspiration de Météo-France	162
D.4.1 Méthodes utilisées	162
D.4.2 Méthode de Penman-Monteith	162
D.4.3 Limites de la méthode	163
E Discrétisation des équations différentielles partielles	165
E.1 Discrétisation des équations	165
E.1.1 Traitement des conditions aux limites	165
E.2 Discrétisations spatiale et temporelle de l'équation de Richards	165
E.3 Formulation du système discrétisé	166

E.4 Traitement des conditions aux limites	167
---	-----

Table des figures

1.1	Relation entre la nature des surfaces et le ruissellement	8
1.2	Les solutions d'infiltration en milieu urbain et suburbain	11
1.3	Stratigraphie standard d'une toiture végétalisée extensive	12
1.4	Effet de l'îlot de chaleur urbain	15
1.5	Les différents comportements énergétiques vis-à-vis de la saison	16
2.1	Visualisation de l'état hydraulique dans un sol	22
2.2	Potentiel de pression h en fonction de la teneur en eau θ , selon la texture du sol	22
2.3	Représentation de la capacité de rétention lors d'un événement pluvieux	25
2.4	Représentation de l'effet retard lors d'un événement pluvieux	26
2.5	Schéma descriptif des différents types de réservoirs	30
2.6	Synoptique du bilan hydrique conceptuel	31
2.7	Modèle conceptuel et rôle des différentes strates de la TV	31
2.8	Exemple d'application de la loi de Darcy à un écoulement latéral	32
2.9	Schéma d'une courbe de rétention d'un sol type	35
2.10	Représentation du modèle de Brooks et Corey (1964)	35
2.11	Représentation du modèle de van Genuchten (1980)	36
2.12	Représentation de l'effet d'hystérèse d'après Musy et Soutter (1991)	38
3.1	Photographie du substrat	42
3.2	Photographie du système de drainage	43
3.3	Opération de quartage sur le substrat	44
3.4	Exemple d'essai granulométrique réalisé au LRN	45
3.5	Dispositif de mesure de la densité réelle par la méthode du pycnomètre à He	46
3.6	Essai de détermination de la teneur en eau à capacité au champ	47
3.7	Détermination de la teneur en eau à capacité au champ	48
3.8	Schéma du dispositif de mesure de la conductivité hydraulique à saturation	50
3.9	Courbe granulométrique des deux substrats « initial » S_0 et « évolué » S_{30}	52
3.10	Courbe de rétention du substrat par méthode d'évaporation et presses extractives	53
3.11	Courbe de rétention du substrat par méthode d'évaporation	54
3.12	Courbe de rétention expérimentale des billes d'argile	56
3.13	Courbe de rétention expérimentale et modélisée des billes d'argile	56
4.1	Implantation des parcelles expérimentales sur les toits des bâtiments du CEREMA	62
4.2	Représentation en coupe de la parcelle Argile Expansé	63
4.3	Représentation en coupe de la parcelle Stock60	63
4.4	Représentation en coupe de la parcelle Stock40	64
4.5	Représentation en coupe de la parcelle GR	64
4.6	Dispositif de saturation/drainage	66
4.7	Photographie de la station météorologique basse	68

4.8	Photographie de la station météorologique haute	68
4.9	Photographie du pluviomètre installé sur la toiture végétalisée.	69
4.10	Photographie du radiomètre CNR4 installé sur le toit du LRN	69
4.11	Photographie du capteur de mesure de la vitesse WS200-UMB	69
4.12	Disposition des différents capteurs sur les différentes parcelles étudiées	70
4.13	Photographie du débitmètre à auget	71
4.14	Régulation de la hauteur d'eau par système de bouchons	72
4.15	Implantation des zones de prélèvement du substrat sur la parcelle Stock60	72
4.16	Coupe du substrat de la parcelle Stock60 pour essai du profil de teneur en eau	73
4.17	Photographie du profil racinaire de la parcelle Stock40	74
4.18	Représentation du développement de la végétation au cours de la période d'étude	75
4.19	Distribution du profil racinaire pour le substrat S_{30}	75
4.20	Comportement hydrodynamique pour l'expérience saturation/drainage pour le substrat S_0	77
4.21	Comportement hydrodynamique pour l'expérience saturation/drainage pour le substrat S_{30}	78
4.22	Évolution dans le temps des conditions climatiques sur les parcelles végétalisées	82
4.23	Hyétoqramme et quantités d'eau drainées pour la parcelle AE	83
4.24	Hyétoqramme et quantités d'eau drainées pour la parcelle Stock60	83
4.25	Hyétoqramme et quantités d'eau drainées pour la parcelle AE - été	84
4.26	Hyétoqramme et quantités d'eau drainées pour la parcelle AE - hiver	84
4.27	Évolution dans le temps des quantités d'eau évacuées pour les parcelles TV	86
4.28	Schéma du positionnement des sondes TDR	87
4.29	Comparaison de l'évolution dans le temps du potentiel de pression mesurée - 2011/2013	88
4.30	Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée - été et hiver	88
4.31	Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée - hiver	90
4.32	Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée - été	90
4.33	Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée - été - hiver	91
4.34	Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée - été - hiver 2014	91
4.35	Évolution dans le temps de la teneur en eau pour les parcelles TV	92
5.1	Schéma descriptif de la discrétisation en différences finies en géométrie 1D	99
5.2	Schéma du maillage d'une couche de substrat sous HYDRUS-1D.	99
5.3	Hypothèses de l'effet d'hystérèse	102
5.4	Représentation de la sensibilité des paramètres hydriques	106
5.5	Représentation de la courbe de conductivité hydraulique	107
5.6	Simulation du comportement hydrodynamique - expérience saturation/drainage	110
5.7	Simulation du comportement hydrodynamique pour l'expérience saturation/drainage avec le substrat vieilli S_{30}	111
5.8	Distribution des tailles de pore	112
5.9	Représentation de la fonction objectif	113
5.10	Simulation de la teneur en eau pour la "phase une" – été-hiver 2011	115
5.11	Simulation de la teneur en eau pour la phase quatre – hiver-été 2014	118
5.12	Simulation de la teneur en eau pour la "phase une" – été-hiver 2011	119
5.13	Simulation de la teneur en eau pour la phase quatre – hiver-été 2014	121

A.1	Dispositif de mesure de la densité apparente	146
B.1	Représentation des deux types de presses extractives	148
B.2	Les cylindres contenant le substrat à l'intérieur des presses extractives	149
B.3	Les cylindres contenant le substrat des TV	150
B.4	Schéma du dispositif expérimental « la conductivité hydraulique à saturation »	151
B.5	Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique	151
C.1	Schéma de fonctionnement de l'instrumentation	154
C.2	Photographie de l'ensemble du système d'acquisition pour la toiture du LRN	156
C.3	Mise en place des sondes de température pour le toit du LRN	156
C.4	Courbe caractéristique de calibration de l'une des sondes TDR	158

Liste des tableaux

2.1	Relation entre la taille des pores et le potentiel de pression	23
3.1	Récapitulatif des paramètres physiques et hydriques mesurés	50
3.2	Porosité et densité apparente et réelle du substrat de la TV	52
3.3	Paramètres hydriques modélisés estimés à partir de la méthode d'évaporation	54
3.4	Porosité et densité apparente et réelle des billes d'argile	55
3.5	Porosité et densité apparente et réelle du géotextile	57
3.6	Paramètres hydriques modélisés pour le substrat, géotextile et les billes d'argile	57
3.7	Humidités caractéristiques des différents constituants des TV étudiée	58
3.8	Récapitulatif de la capacité de stockage en eau des constituants de la TV	58
4.1	Caractéristiques des différentes couches des parcelles de la TV	65
4.2	Caractéristiques hydrologiques des événements pluvieux et quantité d'eau sortante du dispositif expérimental saturation/drainage	67
4.3	Récapitulatif des périodes de régulation de la hauteur d'eau à l'exutoire sur la toiture végétalisée	71
4.4	Bilan hydrique à l'échelle saisonnière	71
4.5	Récapitulatif du matériel installé sur la toiture végétalisée	72
4.6	Évolution des performances hydriques des toitures végétalisées	85
4.7	Bilan hydrique à l'échelle saisonnière	85
4.8	Capacité de rétention à l'échelle saisonnière	87
4.9	Performances maximales relevées sur chacune des trois modalités (AE, Stock60, Stock40)	94
4.10	Évolution de la teneur en eau maximale entre 2011 et 2014	95
5.1	Influence des paramètres hydriques sur les variables (θ et Q_{out})	106
5.2	Corrélation paramètres hydriques par rapport aux variables (θ et Q_{out})	107
5.3	Paramètres hydriques de van Genuchten pour le substrat S_0	109
5.4	Paramètres hydriques de van Genuchten pour le substrat S_{30} ; données optimisées.	109
5.5	Paramètres hydriques de van Genuchten pour le substrat S-disp et S-in-situ	117
5.6	Évolution des paramètres hydriques de van Genuchten pour le substrat S-disp et S-in-situ	120
C.1	Récapitulatif des mesures pour la calibration des sondes de température PT100	155
C.2	Récapitulatif des mesures pour la calibration des sondes TDR	157
D.1	Nomenclature des principaux symboles utilisés	164

Nomenclature

Symboles grecs

α	paramètre de pression d'entrée air dans sol	m^{-1}
ε	variation relative locale de la porosité	-
μ	potentiel de pression massique	$\text{m}^2.\text{s}^{-2}$
Φ	fonction objectif	-
Ψ	potentiel de pression volumique	$\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-2}$
ρ	masse volumique de l'eau	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$
θ	teneur en eau	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$

Symboles romains

ΔH	gradient hydraulique dans le modèle de Darcy	m
A	section de passage de l'eau dans le modèle de Darcy	m^2
C	capacité de rétention en eau	m^{-1}
CR	capacité de rétention en eau de la toiture végétalisée	%
Cst	constante de temps modèle réservoir	s^{-1}
g	potentiel gravitationnel	$\text{m}.\text{s}^{-2}$
H	charge hydraulique	m
h	potentiel de pression - pression matricielle	m
h^i	hauteur d'eau dans le modèle "réservoir"	m
H_r	humidité relative de l'air	%
K	conductivité hydraulique	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
k_c	coefficient cultural	-
L	longueur de l'échantillon dans le modèle de Darcy	m
LAI	Indice surfacique foliaire	-
M	masse molaire	$\text{kg}.\text{mol}^{-1}$
m_q	nombre de sets de mesure	
n	paramètre de distribution porale	-
n_{qj}	nombre de données de mesure pour un set donné	

P	intensité de pluviométrie	m.s^{-1}
p	paramètre de sensibilité	
P_l	pression de l'eau	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$
Q	débit évacué ou "sortant"	m.s^{-1}
q	variable observée (teneur en eau ou débit sortant)	
q^*	variable simulée (teneur en eau ou débit sortant)	
R	constante des gaz parfait	$\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$
S	terme source	s^{-1}
s	sensibilité des variables teneur en eau et quantité d'eau évacuée	-
S_w	degré de saturation	
T	température de l'air	$^{\circ}\text{C}$
t	temps	s
t_{ER}	temps de l'effet retard	h
z	dimension verticale - altitude	m

Exposants

k indice d'itération

Indices

0 initial

a air

ad air sec

c capillaire

d indice de drainage lors du phénomène d'hystérèse

en entrée

h indice d'humidification lors du phénomène d'hystérèse

i terme de discrétisation spatiale

j terme de discrétisation temporelle

l indice du paramètre de sensibilité

N nombre de nœuds du maillage

n indice de la condition de Neumann

r	résiduelle
s	sortant
V	volume
w	transport hydrique - eau
y	air humide
max	maximale
min	minimale

Introduction générale

Actuellement, différentes villes dans le monde se dotent de zones végétalisées, principalement au sein des « éco-quartiers ». En France, la plupart des grandes villes telles que : Nantes, Strasbourg, Lille ou Nancy adoptent ce concept. La toiture végétalisée est une technique alternative de gestion des eaux de pluie, tout comme les noues ou les bassins plantés de roseaux. Elle est privilégiée dans les projets urbanistiques. Cet objet se distingue tout de même des autres parce qu'il est disposé sur un toit plat et pourrait ainsi, proposer d'autres services que la rétention des eaux pluviales (EP). D'ailleurs, des produits commerciaux existent déjà et tendent à répondre en partie à des problématiques scientifiques : la consommation énergétique, le climat urbain, le confort thermique, la restauration en ville, la biodiversité, etc.

Une toiture végétalisée (TV) – aussi appelée toit végétal ou toit écologique – est une structure multicouches classiquement constituée de végétation (généralement des sedums), d'un substrat de croissance, d'une couche de drainage et d'une membrane d'étanchéité pour la protection de la structure du bâtiment. L'adjonction d'un dispositif de stockage telle qu'une structure ultra-légère en nid d'abeille, concept développé par la société Nidaplast, vise à améliorer les caractéristiques de la TV en ce qui concerne les propriétés hydriques et thermiques. L'analyse du comportement des TV est relativement récente. De nombreuses problématiques et questions sont encore ouvertes concernant leur fonctionnement et leurs performances. Mon travail de thèse a porté sur leur étude à travers un suivi à long terme, des expérimentations à différentes échelles et la réalisation de simulations numériques.

Ci-dessous, les grandes lignes de chaque chapitre de ce travail de thèse sont détaillées.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique recensant les problématiques de la gestion de l'eau en milieu urbain, les origines climatiques et technologiques des dysfonctionnements des hydrosystèmes ainsi que les solutions existantes pour prévenir les risques liés aux fortes précipitations. Il aborde également les autres fonctions attendues et les discute en fonction des attentes des usagers ou des pouvoirs publics. Le travail bibliographique s'est tout particulièrement attaché à recenser les travaux relatifs à l'étude des toitures végétalisées. La TV est une innovation architecturale qui connaît un développement majeur, aussi bien lors de la construction de nouveaux bâtiments que lors de travaux de rénovation. L'intérêt des TV réside sur différents arguments économiques, sanitaires et environnementaux : allongement de la durée de vie de la toiture, amélioration de la qualité de l'air, participation à la biodiversité et isolation thermique du bâtiment. Cependant, l'évaluation de ces performances a fait l'objet de peu de travaux qui se réduisent souvent à des études de cas de différents exemples de toitures végétalisées. Notre questionnement s'est porté sur les performances hydriques des TV et comment elles évoluent au cours du temps. Aussi, comment simuler le comportement hydrodynamique d'une TV pour en évaluer ses performances.

Le second chapitre rappelle des notions de bases et les équations qui permettent de décrire le transport de l'eau dans un milieu poreux. Par la suite, un état de l'art des fonctions attendues des TV et des modèles existants qui permettent de caractériser et modéliser le transport hydrique en leur sein est effectué. Avec ce travail, nous avons pu constater que des mécanismes tels que l'aptitude au stockage ou l'effet retard diffère de manière notable selon le type de végétation, le substrat utilisé et le climat. Les modèles existants dans la littérature sont classés en deux catégories : conceptuels et mécanistes. Ils sont détaillés et un examen critique des approches développées est présenté. Ces approches ont pour objectif de simuler le comportement hydrodynamique des TV en tenant compte de tout ou partie des

constituants. L'objectif visé est d'affiner la compréhension des phénomènes, de confronter les mesures à la mise en équation, en utilisant les données et paramètres disponibles. *In fine*, la prédiction du transfert du flux en fonction des propriétés du substrat, de la végétalisation et des variations météorologiques est un objectif bien identifié dans les publications. Une comparaison des résultats montre l'hétérogénéité des dispositifs étudiés et pointe le manque de connaissance pouvant aboutir à une méthodologie de caractérisation et à un type de modèle reproduisant les phénomènes observés sur plusieurs années.

Le troisième chapitre porte sur l'étude des composants de la toiture à court et long terme. En effet, suite à l'installation d'une plateforme expérimentale, des évolutions rapides ont été observées. Nous avons cherché à comprendre ce phénomène et, dans une démarche intégrée, cherché à faire le lien avec les évolutions de plus long terme.

Nous nous sommes tout particulièrement attachés à caractériser les divers constituants de la TV, avec une attention particulière pour le substrat afin d'en définir les principales propriétés. Deux types de caractérisation ont été effectuées :

- la caractérisation physique (densités apparente et réelle, morphologie, composition, etc.),
- la caractérisation hydrique (détermination de la courbe de rétention en eau pour en déduire les propriétés hydriques des constituants de la TV et la conductivité hydraulique à saturation).

Les résultats de la caractérisation des matériaux qui composent la TV sont utilisés pour comprendre son fonctionnement hydrique à partir de la formulation de van Genuchten (1980). Les paramètres sont comparés à ceux disponibles dans la littérature. Ces paramètres permettent de situer le substrat dans la famille des sols et de modéliser son comportement. Ces paramètres font l'objet des chapitres suivants.

Le quatrième chapitre est scindé en deux parties. La première est dédiée à la validation expérimentale du modèle hydrique à l'aide d'un dispositif à échelle réduite de toiture végétalisée (500 × 400 × 400 mm) et instrumentée. Ce dispositif est soumis à des conditions climatiques contrôlées. Il a permis de recueillir des données sur le comportement hydrique de la TV (teneur en eau et quantité d'eau sortante). Une toiture végétalisée constituée de matériaux neufs a ainsi été comparée à un échantillon évolué, prélevé sur une toiture mise en place il y a 3 ans avec les mêmes composants. La deuxième partie porte sur l'étude du comportement hydrique d'une TV instrumentée à l'échelle du bâtiment « *in situ* » représentée par quatre parcelles sous différentes situations (drainantes et stockantes).

Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation de l'hydrodynamique d'une TV à l'échelle du bâtiment à l'aide d'un logiciel libre « HYDRUS-1D ». Il s'intéresse en premier lieu à la définition du système à modéliser, puis vise à obtenir des jeux « sets » de paramètres robustes permettant d'obtenir des réponses du modèle aussi proche que possible des résultats expérimentaux. Des simulations sont enfin effectuées sur différentes modalités de TV afin de déterminer les performances hydriques et l'impact sur les quantités d'eaux évacuées. Ce chapitre est l'achèvement du travail entrepris dans les chapitres décrits plus haut. Il s'appuie sur les données expérimentales du dispositif de laboratoire et de la toiture installée au Laboratoire Régional de Nancy (LRN).

Contexte général

Sommaire

1.1	Problématiques liées au cycle de l'eau urbaine	8
1.1.1	Environnement urbain : imperméabilisation, faible densité de végétation, micro-climatologie urbaine	8
1.1.2	Conséquences : saturation des réseaux, inondations, mauvaise qualité des eaux de ruissellement	9
1.2	Solutions de gestion	9
1.2.1	Stratégie actuelle de gestion des eaux pluviales	9
1.2.2	Techniques alternatives innovantes	10
1.3	Végétalisation des toitures	11
1.3.1	Historique	11
1.3.2	Description du concept actuel de toiture végétalisée	11
1.3.3	Constituants	12
1.3.4	Fonctions attendues	14
1.4	Conclusion partielle	16
1.5	Questionnement	17

*« La bonne qualité des eaux étant une des choses
qui contribuent le plus à la santé des citoyens d'une
ville, il n'y a rien à quoi les magistrats aient plus
d'intérêt qu'à entretenir la salubrité de celles qui
servent à la boisson commune des hommes et des
animaux [...] »*

Bernard de JUSSIEU, Hist. de l'Académie royale des sciences,
1733, p. 351.

1.1 Problématiques liées au cycle de l'eau urbaine

1.1.1 Environnement urbain : imperméabilisation, faible densité de végétation, micro-climatologie urbaine

La densification des zones urbaines et leur extension périphérique tendent à modifier fortement les paysages. Les surfaces imperméabilisées (toitures, allées pavées, routes et stationnements asphaltés, etc.) occupent une place prépondérante dans ces espaces (Lazzarin *et al.*, 2005). Labrecque et Vergriete (2006) soulignent le danger de l'imperméabilisation des villes, un phénomène qui favorise l'augmentation du ruissellement de surface. En effet, la proportion d'eau pluviale ruisselée varie de 10 % (milieu naturel) à 55 % (milieu fortement urbanisé (Fig. 1.1)). Les paramètres qui conditionnent l'importance du ruissellement sont : i) l'occupation du sol (en particulier le fait qu'il soit ou non construit), ii) la conductivité hydraulique du sol et iii) la densité et la nature de la végétation (les plantes interceptent plus ou moins l'eau de pluie et leurs racines créent des zones privilégiées d'écoulement dans le sol). Ces connaissances ont d'ailleurs motivé le développement d'espaces verts qui deviennent des éléments incontournables de l'urbanisme moderne (Choumert, 2009). La densification des villes et l'accroissement

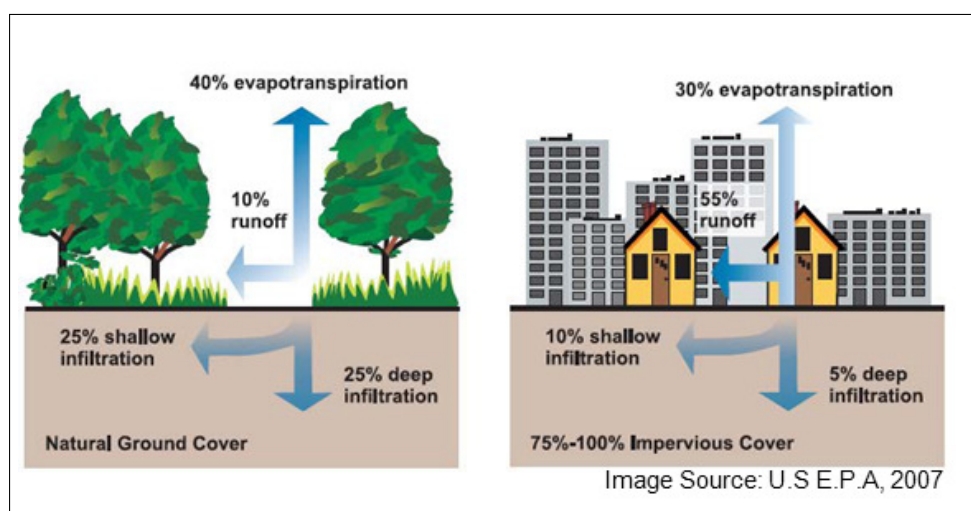


FIGURE 1.1 – Relation entre la nature des surfaces et le ruissellement. L'imperméabilisation augmente le ruissellement. Un milieu naturel ruisselle peu ($\approx 10\%$) alors que dans un milieu urbanisé, la majorité des eaux pluviales ($\approx 55\%$) ne peut s'infiltrer dans le sol (U.S. EPA, 2007).

global des consommations énergétiques entraînent un réchauffement climatique. Ces villes sont soumises à un micro-climat particulier qui est caractérisé par des températures près du sol généralement plus chaudes au centre des villes qu'en périphérie. Ce phénomène est nommé îlot de chaleur urbain (ICU) (Oke, 1987). Ce dernier peut être avantageux en période hivernale, mais, en période estivale, il devient dangereux pour le confort thermique à l'intérieur des bâtiments ainsi que pour la demande énergétique exigée par les systèmes de climatisation (Bozonnet, 2006). Les conséquences liées aux modifications du climat à l'échelle locale (en ville) ou bien un changement climatique global (planète) seraient caractérisées par une augmentation de la fréquence des canicules, comme il a été constaté durant l'été 2003 en France. Les études menées récemment ont montré que la hausse des températures (de $0,7^\circ\text{C}$ à plus de 1°C) au cours du 20^{ième} siècle est légèrement supérieure aux tendances établies par IPCC (2007) à l'échelle globale avec de fortes variations régionales pour la température maximale (Moisselin *et al.*, 2002), ainsi

qu'une augmentation d'événements extrêmes (Déqué *et al.*, 2007; de Munck *et al.*, 2013).

1.1.2 Conséquences : saturation des réseaux, inondations, mauvaise qualité des eaux de ruissellement

La qualité des réseaux de collecte des eaux pluviales est un enjeu majeur des politiques de gestion de l'eau dans les zones urbaines. En effet, Villarreal *et al.* (2004) expliquent que des réseaux vétustes et sous-dimensionnés peuvent être rapidement saturés et induire un risque d'inondation important dans le cas de précipitations intenses. Le phénomène de saturation exprime un dépassement des capacités des infrastructures à absorber les eaux ruisselées et à les évacuer vers les cours d'eau naturels. En hydrologie, le terme « pluie d'orage » est utilisé pour décrire un événement pluvieux de forte intensité ($> 8 \text{ mm.h}^{-1}$) s'étalant sur une période d'une heure à une journée. Les risques associés sont variés : inondation, surmortalité, risque de glissement de terrain). Ils sont aggravés par :

- l'intensité des précipitations ;
- la topographie des surfaces ;
- les facteurs liés au sol évoqués précédemment (§ 1.1.1).

Toutefois, à l'occasion d'événements extrêmes, lorsque le réseau est saturé, les pluies d'orage sont responsables de nombreux dégâts. Par exemple, lors de l'inondation survenue sur l'agglomération de Nancy dans la nuit du 21 au 22 mai 2012, des fortes pluies (intensité variant de 48 à 100 mm.h^{-1}) et une quantité d'eau abattue totale de 103 mm en 3 h ont inondé le centre-ville et provoqué des dégâts considérables. Plus de 200 pompiers ont mené 648 interventions toute la nuit, procédant à des dizaines d'évacuations. Le montant total des dégâts est estimé à plus de 50 millions d'euros ¹.

Le ruissellement en milieu urbain induit par les fortes précipitations, constitue également un vecteur important du transport de la pollution en véhiculant les effluents urbains (particules, détritiques, etc.) provenant de sources diverses (Peck *et al.*, 1999). Elles contribuent ainsi à la dégradation de la qualité de l'eau ainsi qu'à l'altération des écosystèmes aquatiques, par l'augmentation de la charge en pollution de ces milieux récepteurs (Eyles, 1997).

1.2 Solutions de gestion

1.2.1 Stratégie actuelle de gestion des eaux pluviales

Depuis quelques années, la gestion de l'eau de ruissellement est intégrée dans les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU). Ce règlement fixe les modalités de construction qui sont applicables aux terrains sur l'ensemble des communes. Cela se traduit par :

- l'encadrement des conditions de construction dans les zones inondables *non* urbanisées ;
- la réglementation applicable aux constructions dans les zones *déjà* urbanisées en intégrant la connaissance des risques.

¹communiqué de presse, Préfecture de Meurthe-et-Moselle, 23/08/2012

Ce plan restreint l'utilisation de systèmes de gestion de l'eau de ruissellement qui pourraient ne pas être conformes à la réglementation. Des solutions techniques existent néanmoins, par exemple les déversoirs d'orages (Labrecque et Vergriete, 2006). Dans le cas des surfaces déjà bâties, d'autres méthodes de réduction du ruissellement existent. On peut notamment évoquer :

- l'utilisation de revêtements perméables permet d'infiltrer jusqu'à 55 % de l'eau d'un orage d'une intensité de 15 mm.h^{-1} (Andersen *et al.*, 1999) ;
- la réduction de la largeur des rues (diminution de la surface globale imperméabilisée) aurait un impact important sur le ruissellement de surface avec une diminution de 30 % de ce dernier car le problème principal du ruissellement de surface provient de la proportion excessive de surfaces imperméables (Arnold et Gibbons, 1996) ;
- la déviation des eaux de ruissellement vers des zones perméables. Kronaveter *et al.* (2001) montrent que cette solution a permis de diminuer le ruissellement d'un îlot résidentiel de 16 % (jardin de 10 m^2 et toiture de 100 m^2) ;
- la végétalisation des zones urbaines, y compris des surfaces en toiture. Sanders (1986) explique que la politique de plantation d'arbres mise en place à Toronto (les surfaces boisées représentent 21,6 % de la surface totale de la ville), permet d'intercepter 7 % de l'eau de pluie par l'intermédiaire de la canopée des arbres. Le captage se produit aussi par les plantes herbacées qui représentent une surface végétalisée de 34,9 % de la surface totale de la ville de Toronto.

1.2.2 Techniques alternatives innovantes

Il existe diverses solutions mises en œuvre pour améliorer le drainage des eaux pluviales. La Fig. 1.2 montre un exemple des réalisations discutées ci-dessous :

Les bassins de rétention-infiltration sont construits de plus en plus en périphérie des villes. Ce sont des zones de stockage temporaire des eaux de ruissellement. Ils permettent de protéger les habitations et les infrastructures en aval du bassin versant en périodes de fortes pluies.

Les puits d'infiltration assurent le transit des eaux de ruissellement par infiltration vers les couches perméables du sol. Les eaux ne sont donc pas injectées directement dans la nappe. Ces puits d'infiltration sont alimentés par un réseau de conduites ou par ruissellement direct et sont principalement utilisés pour récupérer les eaux de toitures.

Les noues qui sont des stockages temporaires « ouverts » généralement alimentées par les eaux de pluie ou les gouttières. La noue est définie par un profil plus évasé et moins profond par rapport à un fossé. Elle permet de gérer les eaux pluviales d'une zone d'activité commerciale (ZAC), d'un lotissement et pour traiter les zones imperméabilisées le long des bâtiments, d'une route ou d'un parking.

Les toitures végétalisées sont utilisées comme solution tampon pour *réduire* le ruissellement grâce à un stockage temporaire de quelques centimètres d'eau de pluie sur les toits (substrat, couche de drainage et la captation par la végétation).



FIGURE 1.2 – Les solutions d’infiltration en milieu urbain et suburbain. Haut-gauche : toiture végétalisée. Haut-droit : Puits d’infiltration. Bas-milieu : Noue de stockage temporaire des eaux de pluie pour l’esthétisme d’une propriété.

1.3 Végétalisation des toitures

1.3.1 Historique

Le principe de la toiture végétalisée existe depuis la préhistoire. On trouve en Scandinavie des exemples de maisons traditionnelles équipées de toitures végétalisées. Cette architecture est originaire d’Islande où les toits et les murs sont recouverts de gazon (Ouldboukhittine *et al.*, 2012). Ces édifices se composaient de plantations d’arbres sur les terrasses inférieures, d’arbustes et de fleurs sur les derniers étages. L’arrosage était réalisé à l’aide de systèmes d’irrigation complexes (vis sans fin, etc.) (Lassalle, 2008).

La construction de toitures végétales a également été faite de manière traditionnelle dans diverses régions du Paléarctique². L’objectif principal de ces constructions était l’isolation du bâtiment. La construction des toitures végétalisées s’est exportée au nouveau monde, Amérique du Nord et Amérique Centrale lors du peuplement de ces régions par des colons européens (Nigel Dunnet, 2008).

1.3.2 Description du concept actuel de toiture végétalisée

Une toiture végétalisée est un « complexe » complétant et remplaçant en partie le toit traditionnel. Les toitures sont classées en général selon leur pente, elle comporte : i) la terrasse ou toiture végétalisée (pente de 0 à 20 % maximum). Ce type de toiture s’installe sur tout type de supports (béton, bois et acier), ii) la toiture terrasse jardin (pente inférieure à 5 %), elle s’installe uniquement sur des supports

²région comprenant l’Europe, la partie nord de l’Asie, sauf l’Inde et le sud de la Chine, le nord de l’Afrique

en béton. Un système de classification différent permet également de classer les TV en deux grandes familles :

- La toiture végétalisée extensive : la plus courante, elle est composée d'espèces herbacées, présente un complexe de culture de faible épaisseur et associée à un couvert végétal permanent. Les toitures extensives sont constituées de végétaux de petite taille (pelouses de sedums, graminées, plantes endémiques) ;
- La toiture végétalisée semi-intensive et intensive : il s'agit de toitures végétalisées de type horticole où le complexe de culture est plus élaboré, créant un espace végétal plus décoratif. Elles sont plus complexes et coûteuses à mettre en place et à entretenir. De tels jardins sont en général destinés à un usage récréatif.

1.3.3 Constituants

La toiture végétalisée est composée de différentes couches (Fig. 1.3) : la première couche constituée de l'isolation et l'étanchéité du support. Ensuite, elle est surmontée d'une couche drainante qui facilite le stockage et l'écoulement des eaux. Celle-ci est recouverte d'un filtre qui empêche l'entraînement des éléments supérieurs et d'un substrat organique et minéral. Enfin, les plantes sont mises en place (semis, tapis végétal, dalles cultivées ou micro-mottes) (Gendreau *et al.*, 2007).

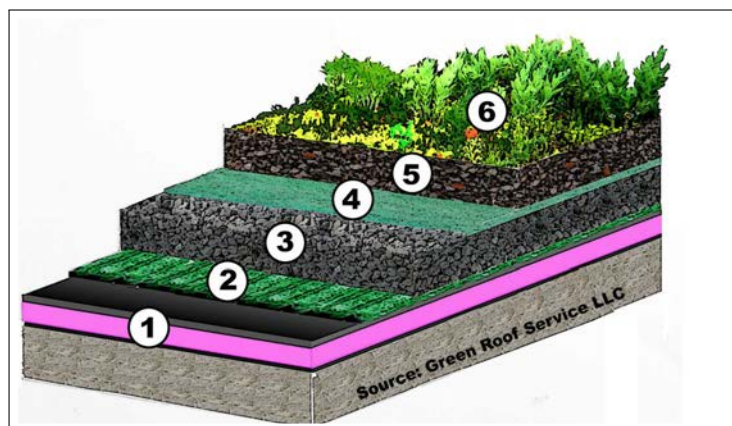


FIGURE 1.3 – Stratigraphie standard d'une toiture végétalisée extensive : 1) support du bâtiment et isolation ; 2) complexe d'étanchéité ; 3) couche drainante ; 4) filtre géo-membrane ; 5) substrat et 6) végétation, Source : Green Roof service LLC.

Le complexe étanchéité - isolation Cette couche comprend deux éléments, l'isolant thermique et le pare vapeur. Tout d'abord, la couche d'isolation est un ouvrage constitué par une ou plusieurs couches de panneaux isolants. Cette couche est destinée à réduire les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments (Nigel Dunnet, 2008). L'isolant thermique doit être soigneusement dimensionné afin de pouvoir résister aux différentes sollicitations : soit à l'intérieur de l'édifice en termes de résistance thermique ou bien à la surface de la toiture en termes de résistance à la compression dues aux surcharges des différentes couches. Les matériaux les plus couramment utilisés sont la laine de roche, le polystyrène et le polyuréthane.

La couche drainante La couche de drainage crée un espace de drainage dirigeant l'eau de pluie vers les évacuations du toit et prévient la détérioration de la végétation en gardant les racines au sec (ADIVET, 2007). La couche de drainage est constituée de matières naturelles (gravier, billes d'argile expansé) ou de matières synthétiques plus élaborées (structure en polypropylène ou polyéthylène).

Le filtre Le filtre ou géotextile est généralement constitué de fibres synthétiques, il est micro perforé et déposé sur le drainant. Le géotextile a pour fonction de retenir les particules fines du substrat. Il a aussi comme fonction d'éviter le colmatage de la couche de drainage.

Le substrat La plupart des substrats des toitures végétalisées sont fabriqués avec 60 à 80 % de matière minérale et 20 à 40 % de matière organique (Beattie et Berghage, 2004). L'élément principal est une roche volcanique appelée pouzzolane. En général, le substrat se compose d'un mélange de matériaux minéraux comme la pouzzolane, des matériaux issus de l'industrie ou de la récupération (brique, ardoise, tuiles), la pierre ponce et la zéolite ou bien les matériaux expansés (billes d'argile). Le substrat est aussi composé de matériaux organiques comme l'écorce, la tourbe, les fibres de coco. La couche de substrat doit être suffisamment légère pour être compatible avec la résistance des éléments porteurs de la toiture (structure béton, métallique ou bois). D'un point de vue fonctionnel, le substrat permet :

- l'ancrage physique des racines (bon développement de la végétation) ;
- la fourniture en éléments nutritifs ;
- la rétention d'eau en période sèche et le drainage en période humide (DeNardo *et al.*, 2005).

Selon les recommandations des cahiers techniques de l'ADIVET (2007), l'épaisseur minimale pour une bonne croissance de la plante est de 15 cm. Cependant, l'épaisseur de substrat varie en fonction du type de toiture végétalisée (extensif, semi-intensif et intensif) (Jarrett *et al.*, 2006).

La couche végétale Sur un toit, se côtoient des conditions météorologiques « difficiles » caractérisées par une vitesse de vent souvent élevée, une importante exposition au soleil et une ressource hydrique limitée par temps sec. L'ensemble de ces conditions restreint le choix de végétaux adaptés aux toitures végétalisées extensives (White et Snodgrass, 2003; Durhman *et al.*, 2006). La végétation est choisie en fonction du climat de la région, de la pente du toit où est posée la toiture, de l'épaisseur du substrat et de l'ensoleillement général (Nigel Dunnet, 2008). La végétation peut être mise en place par le dépôt d'un tapis de végétal, des plantations de mottes/micro-mottes ou de semis. Le choix de la plante est sensible car de nombreuses propriétés sont attendues, en particulier (Nigel Dunnet, 2008) :

- aptitude à couvrir un sol ;
- résistance au gel ;
- résistance à la sécheresse ;
- capacité d'auto régénération et de prospérité.

Les sedums sont largement utilisés car ils ont la capacité de se développer dans des milieux inhospitaliers, de se développer dans de faibles épaisseurs de support de culture. Le sedum appartient à la famille des crassulacées. Ce type de végétation pousse généralement sur des sols rocailloux dans les régions

de l'hémisphère nord (Europe, Amérique du nord). Il se développe aussi dans des zones habituées à la sécheresse du fait de sa capacité à fermer ses stomates au cours de la journée. Les échanges se font majoritairement la nuit pour diminuer les pertes en eau par évapotranspiration. De plus, la plupart des sedums ont la capacité de stocker une grande quantité d'eau dans leur feuille (Sayed, 2001). Il existe plus de 400 espèces de sedums. Nagase et Dunnett (2010) font état des principales espèces de sedums utilisées sur les toitures végétalisées (sedums album et rupestre), avec une moyenne de vingt espèces. La prolifération et le succès des sedums dans les TV sont aussi attribués à leur faculté à capter le CO₂ présent dans l'atmosphère (Durhman *et al.*, 2006). Toutefois, la capacité des sedums à contribuer directement à la gestion des eaux pluviales reste encore à démontrer (Lundholm et Marlin, 2006).

1.3.4 Fonctions attendues

Du fait des aides financières qui sont octroyées pour la végétalisation des toits, le concept des toitures végétalisées est une solution attrayante, plus rentable et plus durable que la rénovation des infrastructures traditionnelles (Hudson, 2000). Elles répondent aisément aux principales recommandations du Grenelle de l'environnement et s'inscrivent dans quasiment l'ensemble des directives HQE³ (Gendreau *et al.*, 2007).

Le succès démontré ou supposé des TV repose sur des performances environnementales, économiques et sanitaires. En effet, les TV peuvent filtrer les fines particules (poussières) en suspension dans l'atmosphère. De plus, les plantes ont la capacité d'absorber les polluants atmosphériques comme le dioxyde de soufre ou l'oxyde d'azote et contribuent ainsi à l'amélioration de la qualité de l'air en ville. Cette absorption a pour effet de diminuer les taux de CO et CO₂ dans l'air (Emilsson *et al.*, 2007). Elles permettent de limiter l'effet du smog⁴ de 0,2 kg de particules en suspension dans l'air par jour pour un mètre carré de végétation (toiture végétalisée équipée de gazon) installée (Banting *et al.*, 2005). Berndtsson (2010) trouve que la TV (étude faite à Augustenborg, Malmö, Suède) évacue de faibles concentrations en métaux lourds (Zinc, Plomb ou Chrome) dans les eaux de ruissellement urbaines, ces concentrations correspondent à une pollution modérée des eaux. Schwager *et al.* (2014) montrent que les matériaux organiques contenus dans un substrat peuvent adsorber le Cuivre et une TV (étude réalisée à Nancy, France) équipée d'un drainage en billes d'argile a la capacité de retenir ces mêmes métaux lourds. Parfois, un relargage est constaté du fait de la lixiviation des matériaux constitutifs de la toiture végétalisée, particulièrement dans les premiers mois après la pose (Köhler et Schmidt, 2003). La toiture est considérée comme favorisant un environnement bénéfique. Elle provoque la présence d'une biodiversité urbaine et le développement d'une faune et d'une flore (Kim, 2004; MacIvor et Lundholm, 2011). Cependant, les principales contributions attendues des TV pour l'amélioration de la gestion de l'espace urbain se situent globalement à d'autres niveaux.

D'une part, la présence des TV favorise la réduction de l'effet de l'îlot de chaleur urbain. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est le résultat d'une augmentation de la température de l'air et une diminution de l'humidité de l'air en ville comparé aux zones environnantes (Fig. 1.4). Bass et Baskaran (2003) montrent pour des travaux réalisés à Toronto que l'utilisation d'espaces verts (toitures végétalisées) avec un système d'arrosage favoriserait une baisse de la température de l'air de l'ordre de 1 à 2 °C. Cette amélioration sensible est due à l'évapotranspiration induite par la présence de végétation sur le toit (Wong *et al.*, 2003; Ouldboukhithine *et al.*, 2012). Elles contribuent également à l'isolation du bâtiment par

³Haute qualité environnementale

⁴Le smog est une brume brunâtre épaisse, provenant d'un mélange de polluants atmosphériques, qui limite la visibilité dans l'atmosphère.

l'ajout de couches ayant des propriétés thermiques avantageuses sur le toit (Del Barrio, 1998; Teemusk et Mander, 2010; de Munck *et al.*, 2013). Niachou *et al.* (2001) ont effectué une étude sur deux bâtiments à Athènes (Grèce), le premier possède une isolation classique et le second, une toiture végétalisée a été installée. Ils ont constaté que la température de l'air intérieur a été réduite de 2°C et la fluctuation de la température moyenne journalière est passée de 7 à 4°C pour le bâtiment équipé d'une TV. Celle-ci favorise donc l'inertie thermique du bâtiment. Les toitures végétalisées offrent un gain en terme de consommation énergétique de chauffage et de climatisation. Jacquet (2011) a observé pour des toitures végétalisées à Montréal (Fig. 1.5), une réduction de la demande en climatisation en été de 98,9 % et 90,8 % (respectivement quand la TV est arrosée et non arrosée) et une réduction modérée de la demande en chauffage en hiver de 38,3 % et 27,7 % (respectivement en condition d'arrosage ou non).

D'autre part, la présence des TV permet le stockage et la rétention des eaux pluviales pour l'amélioration du cycle urbain de l'eau (Carter et Jackson, 2007; Teemusk et Mander, 2009). Il est possible de citer les travaux de Mentens *et al.* (2006), qui montrent clairement l'efficacité des TV dotées d'une épaisseur de substrat inférieure à 150 mm. En pratique, elles permettent de retenir jusqu'à 52 % des eaux de pluie.

La toiture végétalisée est assimilée à une structure poreuse constituée par le substrat et le système de drainage. On parle alors d'*effet de rétention de l'eau*. Un autre effet propre aux toitures végétalisées pour la gestion des eaux pluviales est l'*effet retard à l'évacuation*. Soit, le temps nécessaire à l'eau de pluie pour atteindre les réseaux de voirie. La mise en place de TV permet d'augmenter cet effet retard (Peck *et al.*, 1999). Mentens *et al.* (2006) font aussi état des performances hydriques annuelles de différentes toitures en Europe avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat. Plusieurs travaux ont traité des

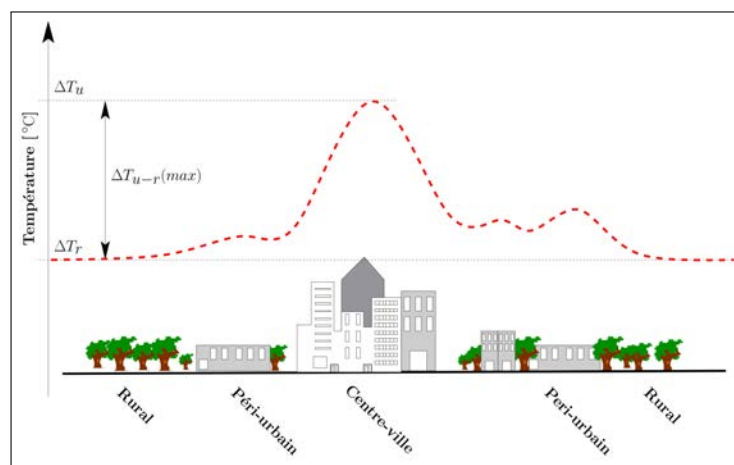


FIGURE 1.4 – Effet de l'îlot de chaleur urbain d'après Claverie et al. (2011) .

bienfaits économiques liés à la présence des toitures végétalisées (Niu *et al.*, 2010). Aussi de manière générale, le coût de l'installation d'une toiture végétalisée varie de 80 à 160 $\text{€} \cdot \text{m}^{-2}$ contre 30 à 70 $\text{€} \cdot \text{m}^{-2}$ pour une toiture classique. La viabilité économique des toitures végétalisées est sensiblement influencée par le type de végétation et la longévité de la couche d'étanchéité. Ce dernier paramètre est suffisant pour assurer cette viabilité. Pour une toiture non végétalisée, la durée de vie moyenne d'une étanchéité varie de 10 à 20 ans. Il a été constaté que la présence de la toiture végétalisée permettait de limiter la température au niveau de la surface du toit (membrane d'étanchéité) ce qui permettait d'assurer une longévité de l'étanchéité de l'ordre de 50 ans (Theodosiou, 2009).

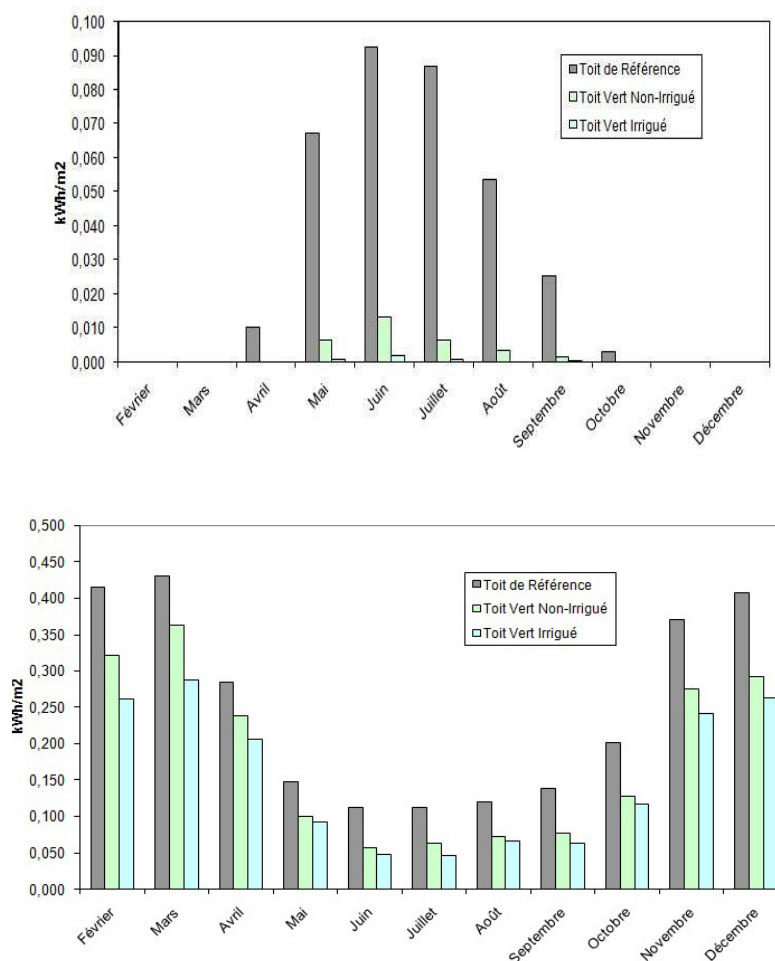


FIGURE 1.5 – Les différents comportements énergétiques vis-à-vis de la saison. Haut, demande d'énergie de chauffage due aux pertes de chaleur par le toit. Bas, demande d'énergie de climatisation due à l'échauffement par le toit d'après (Jacquet, 2011).

1.4 Conclusion partielle

Avec ce chapitre d'introduction, nous avons mis en évidence que l'augmentation de l'urbanisation dans les villes est responsable de diverses problématiques liées à l'environnement urbain : i) une imperméabilisation des surfaces qui entraîne une saturation des réseaux, ii) une faible densité de végétation qui conduit à une diminution des quantités d'eau de pluie captées par les plantes. Ainsi, la végétalisation en zone urbaine est devenue une réalité et qu'elle demeure une nécessité. Avec ses avantages, la toiture végétalisée s'intègre parfaitement au paysage et à l'enveloppe du bâtiment. A contrario, cette technologie subit le coût de son développement, puisqu'elle est régie par des réglementations (PLU) et des normes d'installation (conditions liées aux différents types de support : béton, structure métallique ou bois) qui visent à garantir la viabilité, la sécurité et la longévité des toits sur lesquelles elles sont installées.

Les verrous qui déterminent l'installation des toitures végétalisées sont nombreux : i) la conception du bâtiment, la localisation géographique ou les conditions climatiques, qui influencent le choix des constituants de la TV, ii) les contraintes économiques des particuliers ou des collectivités concernant l'installation. Ces contraintes permettent d'une part de mieux comprendre les limites d'utilisation d'une

toiture végétalisée et d'autre part, de déterminer son comportement optimum à travers un choix de matériaux adaptés au climat. Le prochain chapitre présente l'état de l'art concernant les constituants de la toiture végétalisée. Leurs caractéristiques physiques et hydriques y sont détaillées. La caractérisation du fonctionnement hydrique d'une TV et les phénomènes qui s'y produisent sont explorés à travers la modélisation du comportement hydrodynamique.

1.5 Questionnement

La densification et l'extension des zones urbaines génèrent des problématiques économiques, environnementales et sanitaires de premier plan (e.g. risques d'inondation, phénomènes d'îlot de chaleur urbain, dégradation de la qualité des milieux naturels adjacents). Pour ce qui concerne plus spécifiquement l'optimisation de la gestion du cycle de l'eau urbaine, les toitures végétalisées semblent constituer une réponse pertinente. En effet, ces systèmes, capables de s'intégrer aussi bien au paysage urbain qu'à l'enveloppe du bâtiment, peuvent jouer un rôle « d'éponge » qui stockent, pendant une durée donnée, une partie des précipitations. Les surfaces équipées de TV complètent les parcs urbains, avec une stratégie de végétalisation bien plus réaliste à l'échelle de la ville. En effet, les superficies de toitures équipées sont potentiellement très fortes. Cependant, des questions demeurent :

Quelles sont les performances hydriques des TV et comment évoluent-elles au cours du temps ? Il s'agit notamment de déterminer les indicateurs pertinents pour l'évaluation des performances de régulation hydrique des TV et de savoir comment ces derniers évoluent au cours du temps.

Comment simuler le comportement hydrodynamique d'une TV pour évaluer ses performances ? Cela revient à déterminer les lois de transfert hydrique adaptées aux spécificités des TV pour en déduire les performances.

État de l'art

Sommaire

2.1	Introduction	20
2.2	L'eau dans les milieux poreux	20
2.2.1	Caractéristiques physiques et hydrauliques des milieux poreux	20
2.2.2	Les différentes échelles d'observation	22
2.3	Spécificité des toitures végétalisées	24
2.4	Dynamique de l'eau au sein d'une toiture végétalisée	24
2.4.1	Capacité de rétention en eau	24
2.4.2	Quantification de l'effet retard	26
2.4.3	Importance du phénomène d'évapotranspiration	26
2.5	Évolution des constituants des toitures végétalisées	27
2.5.1	Modèles fonctionnels ou conceptuels	29
2.5.2	Modèles physiques	31
2.5.3	Influence du phénomène d'hystérèse	37
2.6	Comparaison des modèles	39
2.7	Objectifs, questionnement et hypothèses	39

*« Un scientifique est quelqu'un qui fait une enquête
de la façon la plus objective possible »*

Claude PEDRIEL, L'Obs., 2014

2.1 Introduction

Que ce soit pour l'étude de l'hydrologie urbaine, ou pour décrire un système à une échelle réduite, la modélisation et la simulation sont associées à des champs de recherche variés. Dans le domaine de l'hydrologie urbaine, cela a abouti à l'émergence d'un grand nombre de modèles dont chacun a des spécificités et des domaines d'applications propres. Avant de décrire les méthodes ou modèles, il est nécessaire de rappeler les équations et les notions de base qui permettent de décrire le transport de l'eau dans un milieu poreux ainsi que les variables et les paramètres associés à ces équations. Ensuite, nous rappelons l'état de l'art concernant les modèles hydriques « déterministes » et « fonctionnels » qui décrivent l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux. Un comparatif est fait entre ces deux types de modélisation. Enfin, nous nous intéressons à la description de la dynamique de l'eau au sein de la TV. Ce travail permet d'appréhender l'importance des différents phénomènes physiques en présence, ainsi que la validité des hypothèses de ces modèles. L'objectif visé est d'affiner la modélisation de composants des TV, et de prédire fidèlement le comportement hydrodynamique de cette structure. Ce chapitre se termine par un questionnement sur la pertinence des modèles présentés et leur aptitude à décrire les TV. Puis des conclusions sont apportées en ce qui concerne cette synthèse bibliographique.

2.2 L'eau dans les milieux poreux

L'élément clé d'une toiture végétalisée est le substrat et dans une certaine mesure la couche de drainage. Les autres composants ne participent pas ou peu au transport de l'eau. Nous portons notre attention sur la caractérisation de ces milieux poreux.

Un substrat de toiture végétalisée est ainsi un milieu poreux dans lequel les fluides s'écoulent à travers sa porosité et peut être assimilé à un sol. Le volume et la structure de cet espace poreux sont définis par l'organisation de la phase solide du sol, qui dépend de la nature et de la taille de ses constituants (Musy et Soutter, 1991). Plus précisément, un milieu poreux est constitué de trois états (solide, liquide et gaz). Il apparaît donc comme un complexe dynamique à trois phases, qui s'influencent mutuellement. Les pores peuvent être isolés (volumes morts) ou interconnectés (Ruiz, 2009).

2.2.1 Caractéristiques physiques et hydrauliques des milieux poreux

Variables descriptives fondamentales

La porosité La porosité d'un matériau caractérise l'importance du vide (pores) qu'il contient. Elle représente donc la fraction volumique de vide, c'est-à-dire le rapport entre le volume de l'espace du milieu poreux V_{vide} et le volume total du milieu poreux V_{total} :

$$\varepsilon = \frac{V_{vide}}{V_{total}} \quad (2.1)$$

Le système poral, considéré comme un réseau communicant de pores et de conduites de faibles dimensions, peut être décomposé en plusieurs classes de porosité. Il est fait mention de *porosité résiduelle* pour la partie du système poral constitué de pores dépourvus de communications. Les pores communicants forment la *porosité effective*. Cette dernière est composée de deux parties : i) la macroporosité (porosité efficace) où se déroule la majorité des écoulements hydriques et ii) la microporosité (porosité capillaire),

qui correspond à la partie du système poral pour laquelle les faibles diamètres de pores empêchent l'écoulement gravitaire (Musy et Soutter, 1991).

La teneur en eau La teneur en eau du sol θ exprimée en $[\text{m}^3.\text{m}^{-3}]$ ou $[\%\text{.vol}]$ est la quantité d'eau V_w $[\text{m}^3]$ présente dans un volume unitaire de sol. Celle-ci est définie par le volume relatif de la phase liquide V_w exprimé en $[\text{m}^3]$, soit le rapport de son volume au volume total du sol V_{total} exprimé en $[\text{m}^3]$ (Musy et Soutter, 1991) :

$$\theta = \frac{V_w}{V_{total}} \quad (2.2)$$

La teneur en eau dans un sol est comprise entre une valeur minimale proche de zéro et une valeur maximale (point de saturation) θ_s appelée teneur en eau de saturation (Musy et Soutter, 1991).

La Saturation La saturation d'un sol, aussi appelée *indice de saturation* S_w $[-]$, est définie par le rapport du volume de la phase liquide V_w $[\text{m}^3]$ au volume de l'espace poral V_{vide} $[\text{m}^3]$ (Musy et Soutter, 1991) :

$$S_w = \frac{V_w}{V_{vide}} \quad (2.3)$$

Les « formes » de l'eau dans le sol Il est possible de distinguer dans un sol donné, quatre « formes » de l'eau en fonction de la taille des pores : l'eau libre, l'eau capillaire, l'eau hygroscopique et l'eau d'hydratation. Elles sont caractéristiques de l'interaction du fluide avec le milieu poreux qui le contient. Dans ce document, il est question uniquement de l'eau libre et capillaire. Les deux autres formes de l'eau sont liées respectivement à des phénomènes d'adsorption et de constitution interne à la fraction minérale. Elles ne sont pas prises en compte dans les processus physiques (gravité, évaporation à l'air libre, pression osmotique...) de drainage de l'eau.

L'eau libre ou gravitaire L'eau gravitaire est celle qui s'écoule librement, dans les macropores et les fissures. Ceux-ci ont une dimension caractéristique qui varie de quelques centimètres à quelques millimètres voire moins (diamètre de pores supérieur à 300 μm , mais qui permettent un écoulement sous l'effet de la gravité) (Fig. 2.1c) (Claridge et Edwards, 2012). En milieu naturel, la majeure partie de cette eau libre circule de la surface en profondeur pour alimenter les nappes souterraines.

L'eau capillaire L'eau capillaire se met en place sous l'action de la tension superficielle et des forces d'adhésion liquide-solide. L'eau capillaire est celle qui est contenue dans les pores dont le diamètre équivalent est inférieure à 30 μm (Musy et Soutter, 1991). Les déplacements sont alors contrôlés par les forces de capillarité, qui exercent sur la phase liquide une succion (Fig. 2.1b). Cette force de succion (égale à l'ascension par capillarité) se produit aussi dans les racines des végétaux qui aspirent l'eau des pores capillaires. Le phénomène de capillarité désigne la capacité de l'eau à remonter naturellement malgré la force de gravité le long des pores du sol. Plus le diamètre des pores connectés est petit, plus la remontée capillaire est favorisée.

Notion de potentiel de l'eau du sol Le potentiel hydrique d'un sol est mesuré comme une quantité d'énergie ou potentiel énergétique par une quantité d'eau (Hopmans et Rolston, 2000). Ce potentiel hydrique est défini aussi comme la quantité de travail externe par unité de masse d'eau pure qu'il faut fournir pour transférer de façon réversible et isotherme une quantité infinitésimale d'eau d'une position

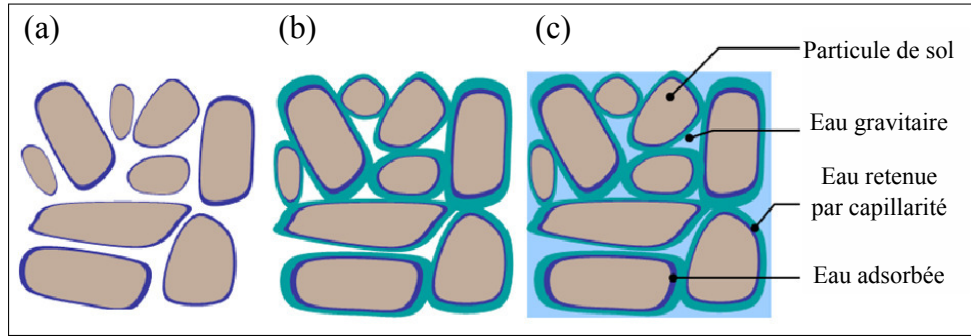


FIGURE 2.1 – Visualisation de l'état hydraulique dans un sol d'après (Séré, 2011).

donnée vers une autre position plus basse (Fig. 2.2). Le potentiel hydrique peut être exprimé en trois unités (Hopmans et Rolston, 2000) :

- Potentiel par unité de masse (μ : $\mu = \text{potentiel/masse} = gl \text{ (m}^2.\text{s}^{-2})$)
- Potentiel par unité de volume (Ψ : $\Psi = \text{potentiel/volume} = \rho_w Vgl / V = \rho_w gl \text{ (N.m}^{-2} \text{ unité de pression d'eau)}$)
- Potentiel par unité de poids (h) : $h = \text{potentiel/poids} = mgl / mg = l \text{ (m, charge)} = \text{équivalent hauteur d'eau}$

Dans la suite du document, nous utilisons uniquement la terminologie du potentiel de pression par unité de poids (h) équivalent à une hauteur d'eau [m].

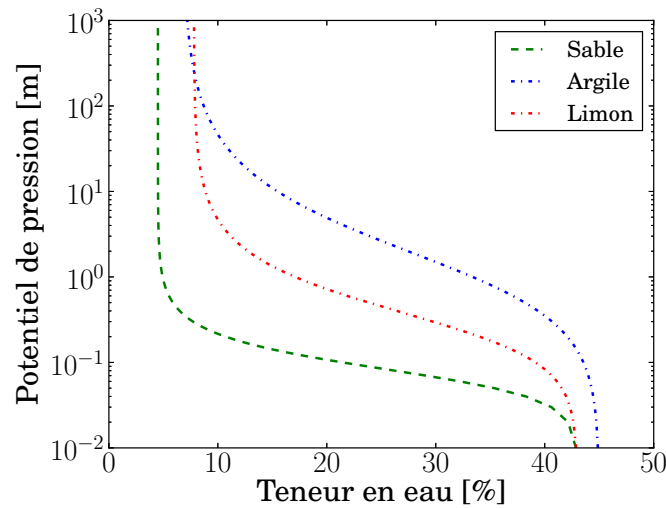


FIGURE 2.2 – Potentiel de pression selon la nature (texture) du sol (sableux, argileux et limoneux).

2.2.2 Les différentes échelles d'observation

D'un point de vue morphologique, il a été mis en évidence l'existence de deux niveaux d'organisation de la structure d'un milieu poreux comme un sol ou, en l'occurrence un substrat. Il y a l'échelle *micro-structurelle* et l'échelle *macro-structurelle*. Cette notion d'échelle résulte, d'une part de la notion de

distribution granulométrique des éléments solides dans le sol, d'autre part, de l'existence de forces électrostatiques dues à des particules chargées présentes dans les minéraux argileux et l'humus. Ces forces confèrent aux éléments colloïdaux¹ une fonction de « ciment » entre les particules grossières, dont provient la cohésion des éléments structuraux (Musy et Soutter, 1991). La Table 2.1 montre la relation qui peut exister entre le potentiel de pression, la tailles des pores et l'état hydrique dans le sol.

TABLE 2.1 – Relation entre la taille des pores et le potentiel de pression nécessaire pour les vider de leur eau, d'après Rowell (1994)

Taille des pores [μm]	Potentiel de pression [m]	Commentaire
300	0, 1	Potentiel de pression à saturation
60-30	0, 5-1	Potentiel de pression à la capacité au champ
2	15	Taille limite de pore contenant de l'eau facilement utilisable
0, 2	150	Point de flétrissement
0, 003	10000	Potentiel de pression d'un sol sec à l'air

L'échelle du pore d'observation L'analyse de la structure d'un sol ou d'un substrat d'un point de vue *micro-structurel* se fait par l'observation au microscope de coupes minces. À cette échelle, les grandeurs caractéristiques sont celles du diamètre moyen du pore dans le cas d'un milieu consolidé et celles du diamètre du grain dans un milieu non consolidé. Les transferts hydriques dans le substrat à l'échelle *microscopique* s'effectuent dans les micro-cavités des pores reliés par de fines canalisations que forme le système poral (Musy et Soutter, 1991). À l'échelle *microscopique*, ou échelle des pores, apparaissent des discontinuités entre le solide et les phases fluides (Grossein, 2009).

L'échelle locale dite macroscopique Cette échelle est aussi appelée « *échelle de Darcy* », car elle est représentée à des échelles relativement grandes par rapport à la dimension d'un pore. L'échelle *macroscopique* est caractérisée par la dimension du Volume Élémentaire Représentatif (VER). Le milieu poreux peut alors être assimilé comme continu (Grossein, 2009). La représentation de la taille de ce volume doit être suffisamment importante pour diminuer l'influence de l'hétérogénéité du milieu par méthode d'homogénéisation (Auriault, 1991). Dans le cadre de l'échelle *macroscopique*, l'écoulement est considéré de manière uniforme au travers du VER (Musy et Soutter, 1991).

L'échelle globale dite « grande échelle » Cette échelle permet de considérer l'ensemble des applications et des mécanismes qui peuvent se dérouler au niveau d'une parcelle (distance métrique) ou d'un niveau supérieur, par exemple, l'échelle du bassin versant (distance kilométrique).

Afin de procéder à des changements d'échelle, différentes méthodes sont employées. Les plus courantes sont : la méthode d'homogénéisation développée par Bensoussan *et al.* (1978) et Sanchez-Palencia (1980) ainsi que la méthode de changement d'échelle par prise de moyenne volumique introduite par Whitaker (1967) et Marle (1967).

¹suspension d'une ou plusieurs substances, dispersées régulièrement dans une autre substance

2.3 Spécificité des toitures végétalisées

Les sols sont composés de matières minérales et organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants. Ils proviennent de la transformation et de la modification de matériaux parents sous l'influence de facteurs pédogénétiques : le climat, la nature de la roche, la topographie et l'activité biologique (Oldeman *et al.*, 1994). Récemment, une nouvelle classe de sol a fait son apparition dans les classifications pour décrire les sols qui ont été fortement modifiés par l'Homme ou qui se sont directement développés sur des artefacts (matériaux transportés ou fabriqués par l'Homme) : les Technosols (IUSS, 2014) autrement appelé Anthroposols dans la classification française (Baize et Girard, 2008). Les substrats des toitures végétalisées apparaissent ainsi comme des types de Technosols aux propriétés physiques et hydriques particulières, différentes des sols naturels. Leur composition (fraction organique importante constituée de tourbe ou de compost et texture grossière) impliquent ainsi des caractéristiques spécifiques (forte microporosité) et des propriétés originales en termes d'hydrophobicité et de disponibilité de l'eau (Séré, 2011; Cannavo et Michel, 2013).

2.4 Dynamique de l'eau au sein d'une toiture végétalisée

Pour réduire le volume d'eau ruisselé et réduire le débit d'eau de pluie arrivant au réseau d'assainissement, l'utilisation des TV s'avère être une solution intéressante. La toiture végétalisée est une structure stockante de plus en plus intégrée dans la gestion des eaux de pluie en milieu urbain. Des études se sont focalisées sur les quantités d'eau retenues par la TV particulièrement lors d'événements pluvieux ponctuels (Mentens *et al.*, 2006). Kok (2004) montre que le risque de ruissellement augmente avec l'imperméabilisation des surfaces en ville (étude réalisée à Montréal, Canada). Il montre que les toits représentent 30 % des surfaces imperméabilisées en ville.

Les TV jouent dans une certaine mesure le même rôle que la biomasse aérienne des plantes qui intercepte l'eau de pluie avant que celle-ci n'atteigne le sol. La végétation qui s'y développe permet aussi une évaporation plus rapide (emplacement sur le toit, qui favorise l'échange avec l'atmosphère), grâce à l'eau accumulée comme cela a été observé et rapporté par Labrecque et Vergriete (2006).

2.4.1 Capacité de rétention en eau

Plusieurs études démontrent qu'une TV intensive retient une grande partie de l'eau de pluie qui les arrose (Villarreal *et al.*, 2004; Mentens *et al.*, 2006; Palla *et al.*, 2008). Mentens *et al.* (2006) montrent que, logiquement, la capacité de stockage des TV est proportionnelle à l'épaisseur du substrat. En effet, pour une épaisseur de substrat moyenne de 100 mm (toitures végétalisées extensives), les TV retiennent jusqu'à 52 % des eaux de pluie alors qu'une épaisseur de 150 mm, permet une rétention jusqu'à 75 % (étude faite en Allemagne entre 1987 et 2003 sur 121 toitures végétalisées extensives et 11 toitures végétalisées intensives).

Metselaar (2012) décrit le suivi de sept toitures végétalisées avec des épaisseurs différentes de substrat (5, 10, 20, 40, 60, 80 et 100 cm) pour plusieurs scénarios de teneur en eau initiale du substrat (sec, humide et saturé) au cours d'une journée printanière. Le résultat de ce suivi montre que pour l'ensemble des substrats étudiés, le pourcentage de rétention en eau est de 55 % pour les épaisseurs 5 et 10 cm et de 75 % pour les épaisseurs 20, 40, 60, 80 et 100 cm.

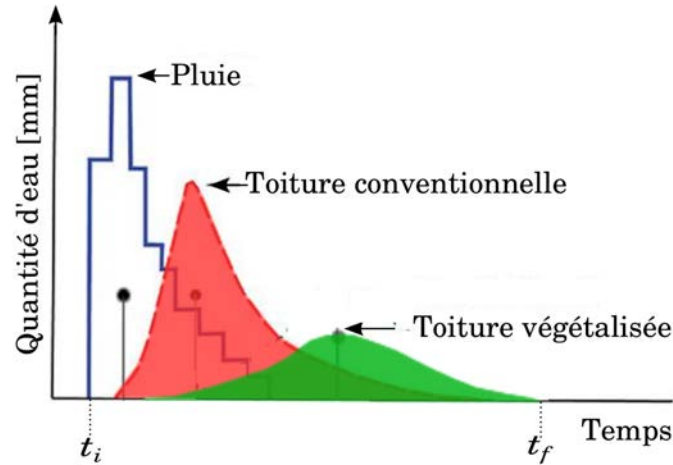


FIGURE 2.3 – Représentation de la capacité de rétention pour une toiture conventionnelle (aire rouge) et une toiture végétalisée (aire verte) lors d'un événement pluvieux.

Lors d'une étude antérieure, De Gouvello et Berthineau (2005) ont mis en place un dispositif expérimental représentant quatre types de toitures différentes. Il comprend quatre plateformes : toitures classiques en tuiles romanes, acier, gravillon et complexe de végétalisation extensive. L'objet de cette étude était d'évaluer la capacité de rétention des toitures végétalisées, leur aptitude à restituer les eaux de pluie ainsi que leur effet retardateur. Les TV étudiées montrent une rétention notable des eaux pluviales. En effet, lors de la période estivale, 92 % de l'eau est stockée. Ce phénomène est estompé durant la période hivernale où, la rétention atteint toutefois 70 % car le substrat est fréquemment saturé au début de l'épisode pluvieux.

Fioretti *et al.* (2010) étudient également la capacité de rétention des TV pour différentes périodes de l'année (saisons automne/hiver de novembre 2007 à début avril 2008). La quantité d'eau de pluie stockée varie de 53 à 91 % selon la nature des événements pluvieux. Lors d'orages, la quantité d'eau stockée est moindre car le substrat se sature rapidement. Palla *et al.* (2008) extrapolent ce résultat dans une étude faite à l'échelle urbaine d'un bassin versant (région de Gênes en Italie) sur une période de 18 ans en montrant qu'une végétalisation de 10 % des toits d'un bassin versant peut augmenter la capacité de rétention (quantité d'eau qui ne s'est pas déversée dans les cours d'eau) de 5 % et jusqu'à 80 % pour un bassin versant complètement végétalisé (pour une pluviométrie allant de 1 à 25 mm).

Ainsi, nous choisissons de définir la capacité de rétention (CR) par la relation (Eq. 2.4) comme la quantité d'eau qui n'est pas drainée, c'est à dire rejetée dans les réseaux de collecte d'eaux pluviales, pendant une période donnée. Il s'agit ainsi bien de l'eau qui est retenue dans la toiture végétalisée ou qui est évapotranspirée (Fig. 2.3).

$$CR = \int_{t_i}^{t_f} \left(1 - \frac{Q_s}{P} \right) dt \quad (2.4)$$

Avec P , la quantité d'eau précipitée [mm] et Q_s , la quantité d'eau drainée hors de la TV [mm].

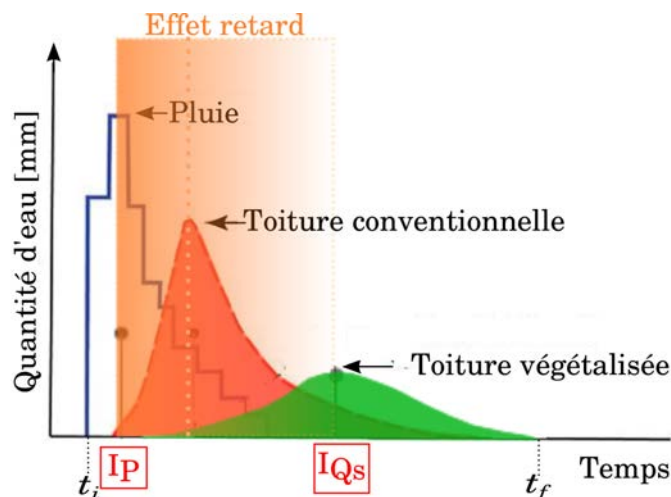


FIGURE 2.4 – Représentation de l'effet retard lors d'un événement pluvieux pour une toiture conventionnelle (aire rouge) et une toiture végétalisée (aire verte).

2.4.2 Quantification de l'effet retard

Carter et Jackson (2007) montrent qu'une TV permet de réduire le débit de pointe² en ajoutant un stockage supplémentaire sous le substrat avec la couche de drainage. Le débit a pu être diminué de 15 % pour de faibles pluies. Par ailleurs, Palla *et al.* (2008) démontrent que la diminution du débit de pointe est proportionnelle au taux de recouvrement de la végétation (e.g. 51 % de réduction pour une couverture de 100 % et 5 % de réduction pour une couverture de 10 %). La gestion des eaux pluviales est liée à l'intensité des pluies, au-delà d'une certaine quantité d'eau précipitée, la toiture ne joue plus son rôle de réduction du débit de pointe (Mentens *et al.*, 2006). L'eau est alors presque directement déversée dans le réseau.

L'effet retard a aussi été étudié par De Gouvello et Berthineau (2005), ils constatent que la restitution de l'eau de pluie reçue par une toiture végétalisée extensive est décalée de 15 min en moyenne (ce résultat est conditionné par les conditions initiales d'humidité du substrat). En outre, quatre heures après la fin d'une averse, les auteurs constatent encore un débit en sortie de toiture. Ainsi, l'effet retard peut être défini pour une période donnée comme l'intervalle de temps entre le pic d'intensité de pluie (I_P) [mm.h^{-1}] et le pic de l'eau évacuée (I_{Q_s}) [mm.h^{-1}] (Fig. 2.4).

$$t_{ER} = t(\max I_P) - t(\max I_{Q_s}) \quad (2.5)$$

2.4.3 Importance du phénomène d'évapotranspiration

Le suivi *in situ* de TV permet à la fois d'établir un bilan qui reproduit la réponse hydrologique pour des conditions climatiques données et de comprendre le fonctionnement hydrique.

²débit élevé observé à la sortie d'un réseau de drainage pendant et juste après une pluie

Ouldboukhitine *et al.* (2012) analysent la performance d'une TV pour la gestion des eaux pluviales en comparant l'évapotranspiration (ETP) d'une TV munie d'une végétation de type sedum avec une autre recouverte de poacées (gazon). L'ETP est plus importante pour le gazon (8 mm cumulé sur 72 h) que pour les sedums (5 mm cumulé sur 72 h). Le sedum est un végétal qui transpire peu par rapport aux graminées ; ceci est aussi l'une des raisons pour lesquelles, le sedum, du fait des faibles quantités d'eau transpirées, est couramment utilisé en toiture végétalisée.

Lazzarin *et al.* (2005) ont étudié l'évapotranspiration d'une toiture végétalisée entre 2002 à 2004 (Italie). Ils ont quantifié l'évapotranspiration (chaleur latente) liée à la présence d'une végétation (sedums, graminées) en modélisant le bilan énergétique d'une toiture en utilisant une méthode empirique (loi linéaire entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle). Les résultats montrent que pendant la période estivale où le substrat est quasiment sec, la TV permet de diminuer la chaleur reçue par le bâtiment par conduction de 60 % en comparaison avec un toit traditionnel, et d'augmenter la quantité d'eau évapotranspirée de 12 %. Pour un substrat humide, l'évaporation du substrat et la transpiration des plantes augmentent, ce qui, diminue encore la quantité d'eau évacuée vers le réseau de collecte.

Berthier *et al.* (2010) ont poursuivi l'étude de De Gouvello et Berthineau (2005) sur l'analyse du comportement hydrique des TV (pluie et ruissellement) en ajoutant un lysimètre par pesée afin de compléter le bilan hydrique et ainsi mieux estimer la quantité d'eau rejetée par évapotranspiration. Les résultats de l'étude sont obtenus sur une période de neuf jours (du 1^{er} au 9 septembre 2007). Les conclusions de cette étude sont que les valeurs mesurées de l'évapotranspiration pour la TV avec une végétation type sedum sont équivalentes aux valeurs d'ETP journalières fournies par Météo-France pour une végétation gazon. Ce résultat semble contredire celui de Lazzarin *et al.* (2005) décrit plus haut. La différence entre les deux travaux s'explique par les dimensions des dispositifs expérimentaux utilisés par les deux études. Dans l'étude de Lazzarin *et al.* (2005), la TV a une surface de 1000 m² avec 20 cm de substrat et 10 cm de drainage (polyéthylène expansé), alors que la surface de la TV de l'étude de Berthier *et al.* (2010) ne fait que 1 m², avec une épaisseur de substrat de 10 cm et ne dispose pas de couche de drainage.

Cependant, ces deux études illustrent la forte capacité de la TV à évacuer les eaux pluviales par le mécanisme d'évapotranspiration, bénéfique en terme de confort urbain, par l'abaissement localisé de la température de l'air. Liu (2005) mentionne qu'il est possible de diminuer de 0,1 à 0,8 °C la température d'une ville comme Toronto en végétalisant 50 % des toits de la ville.

2.5 Évolution des constituants des toitures végétalisées

La nature même des constituants des substrats de toitures végétalisées qui résultent du mélange de matériaux très différents d'origine naturelle (e.g. tourbe, pouzzolane) ou artificielle (e.g. compost, briques) leur confère des propriétés très particulières. En effet, ils peuvent être assimilés à des Technosols – des sols qui ont été fortement modifiés, voire créés par l'Homme (IUSS, 2014). Selon cette classification, il serait classé comme "Histi-spolic Technosol andic" (Bouzouidja *et al.*, 2014).

Ces sols fortement anthropisés sont bien connus pour être des milieux extrêmement réactifs qui sont soumis à une évolution intense et rapide de leurs propriétés physico-chimiques (Séré *et al.*, 2010; Huot *et al.*, 2013). En conséquence, une évolution significative de l'architecture porale des substrats au cours du temps peut être attendue qui modifierait leurs propriétés hydrauliques (Kutilek, 2004). Pourtant, ce sujet

est aujourd'hui peu abordé dans la bibliographie scientifique. Mentens *et al.* (2006) a évoqué, dans son article de revue, l'absence d'influence de l'âge des toitures végétalisées sur leurs performances hydriques. Au contraire, une étude menée sur un substrat vieux de 5 ans mettait en évidence une augmentation de la capacité de stockage d'eau par rapport à un substrat neuf de même composition (Getter *et al.*, 2007). Les auteurs notaient, sans le mesurer, une évolution de l'abondance et de la connectivité des micro et des macropores. Par ailleurs, une évolution au cours du temps des caractéristiques chimiques (baisse du pH, augmentation des teneurs en carbone organique et de l'azote total) et physiques (tassement) de différents substrats de toitures végétalisées ont été mis en évidence par Schrader et Boening (2006), sans que les conséquences de ces modifications sur les propriétés hydrauliques aient été mesurées.

La végétation présente sur la toiture entraîne aussi l'évolution des propriétés hydrodynamiques du substrat, notamment par l'action des racines qui va agir en occupant une partie de la porosité, en favorisant la connectivité des pores et en accélérant la formation d'associations organo-minérales. En effet, la porosité totale diminue et une modification de la courbe de conductivité hydraulique $k(\theta)$ reflétée par une variation de la tortuosité est observée (Cannavo *et al.*, 2011). La modélisation des phénomènes physiques mis en jeu lors des écoulements hydriques pour un milieu poreux en régime insaturé en particulier et plus généralement pour les TV a été discutée dans la littérature. La représentation physique et mathématique requiert la compréhension des phénomènes et des variables, représentatifs des transferts hydriques dans un milieu poreux et hétérogène. La modélisation est nécessaire à deux égards :

Comprendre les phénomènes qui régissent ces transferts et ainsi, déterminer les performances hydriques des TV sur les deux points importants : le stockage et la réduction du ruissellement des eaux pluviales. Comme dans la plupart des situations, la modélisation peut contribuer au développement de nouvelles connaissances scientifiques sur le fonctionnement des TV (Beven, 2001).

Disposer d'un modèle robuste afin de proposer une modification de toute ou partie des couches ou de leur constitution en vue d'optimiser certaines voies de transferts et donc les performances. D'un point de vue pratique, la modélisation peut contribuer à améliorer la prise de décision et la conception de systèmes végétalisés de plus en plus innovants (Nigel Dunnet, 2008).

La littérature nous renseigne sur les modèles existants (Mermoud, 2005) :

Modèles stochastiques Les paramètres du sol et éventuellement certaines autres données d'entrée sont introduites sous forme de variables aléatoires décrites par des fonctions de densité de probabilité (Bernard, 2013). La majorité des modèles stochastiques sont utilisés soit parce que le phénomène étudié est aléatoire, soit parce que le but est de représenter des comportements hydrologiques difficilement explicables physiquement (Chocat, 1997). Les modèles stochastiques simulent des processus qui dépendent en partie ou totalement du hasard. Pour des conditions initiales et aux limites données, différentes applications d'un modèle stochastiques donnent pour un même entrée, des sorties différentes. L'hypothèse sous-jacente est que le phénomène considéré (cf. précipitations, crue) résulte d'une telle complexité de causes que la relation entre les entrées et les sorties du modèle n'est pas univoque. L'utilisation d'un tel modèle conduit donc à générer une réalisation possible de la variable de sortie, conditionnellement aux valeurs des variables d'entrée du modèle. Cette réalisation résulte de l'évolution dans le temps, d'une ou plusieurs variables aléatoires appropriées au phénomène étudié (Hingray *et al.*, 2009).

Modèles déterministes Les paramètres du sol et les autres données d'entrée sont définis de façon unique, si bien que la réponse du modèle est unique.

- Modèles physiques : les équations de cette catégorie de modèle (généralement des équations aux dérivées partielles, EDP) reposent sur des lois fondamentales empruntées à la physique, la chimie et, le cas échéant, la biologie. Elles fournissent les variations spatio-temporelles des variables d'état, en fonction des conditions initiales et aux limites. Ce type de modèle nécessite une connaissance précise des paramètres caractérisant les propriétés du sol.
- Modèles fonctionnels : les processus impliqués dans les transferts sont pris en compte de façon très simplifiée ; la formulation mathématique de ces modèles est généralement simple ; ils exigent peu de données et sont faciles à résoudre.

L'approche considérée dans la suite de ce chapitre sur l'état de l'art est de type déterministe.

2.5.1 Modèles fonctionnels *ou conceptuels*

La modélisation conceptuelle en hydrologie est décrite comme une méthode qui a recours à la simplification de l'écriture des paramètres hydriques et physiques du sol (Chkir, 2010).

Un modèle conceptuel se définit comme étant un ensemble de relations mathématiques destiné à trouver une représentation schématique d'un processus donné. Celui-ci doit, autant que possible, intégrer la complexité des processus, en essayant de reproduire simplement le concept physique du comportement du système. Ce type de modèle garde un sens physique même s'il ne représente pas une description exacte de l'ensemble des processus en jeu (Chkir, 2010). Les caractéristiques des modèles conceptuels résident dans la simplicité des paramètres hydriques utilisés tout en ayant la capacité de simuler les échanges (précipitations – débits). Une autre caractéristique des modèles conceptuels utilisés pour décrire les écoulements dans les sols est la décomposition en une succession de réservoirs en cascade.

On distingue deux types de modèles conceptuels (réservoir et ruissellement). Dans les modèles à réservoir (Fig. 2.5), l'ensemble des écoulements est régi par des transferts de réservoir à réservoir. Alors que pour les modèles à ruissellement (Fig. 2.7), les écoulements sont estimés à partir des données de précipitation et d'évaporation au moyen d'une représentation simple, établie sous forme de « compartiments », qui peuvent se remplir et se vider durant le processus de transport de l'eau ³.

Présentation des modèles L'étude des modèles conceptuels (méthode des réservoirs) remonte aux années 60. Ce modèle anciennement nommé « modèle de Stanford » est utilisé dans le dimensionnement des bassins versant pour la détermination des transferts hydrauliques (Crawford et Linsley, 1964). Il a été pensé pour prendre en compte l'effet stockage d'eau dans le bassin, il est représenté schématiquement sous forme d'un réservoir avec une entrée et une sortie, voire une surverse. Ce réservoir peut avoir un fonctionnement linéaire (section constante) ou non-linéaire (section différente suivant la profondeur). La Fig. 2.5 montre les deux types de réservoirs couramment utilisés. Ces modèles sont utilisés aussi pour décrire le fonctionnement du sol, en particulier lorsque celui-ci se gorge d'eau au cours d'un événement pluvieux. En effet, les différentes parties du sol se comportent comme des réservoirs d'eau qui se remplissent chacun suivant une loi conditionnée par la partie du système située à son amont et se vident suivant une loi qui dépend de sa propre constitution, de son degré de remplissage et parfois de l'état des réserves situées à son aval. Le fonctionnement du modèle conceptuel à gauche de la Fig. 2.5,

³modèle HYRRROM, wmo.int

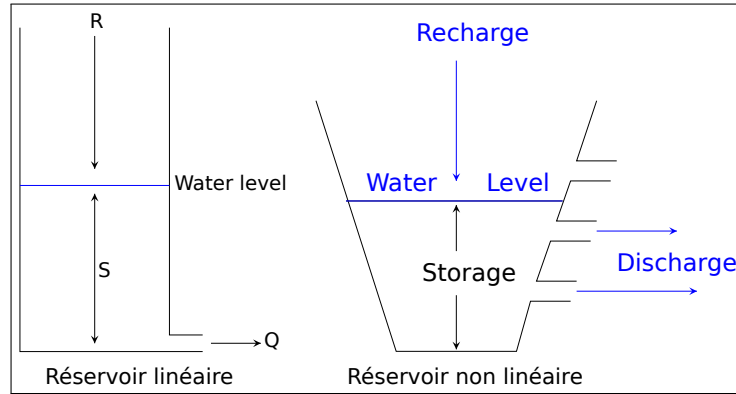


FIGURE 2.5 – Schéma descriptif des différents types de réservoirs : à gauche le modèle linéaire et à droite le modèle non linéaire.

peut se résumer à l'aide de l'Eq. 2.6.

$$\begin{cases} Q^i = 0 & h^i < sl \\ Q^i = Cst \cdot (h^i - sl) & h^i \geq sl \end{cases} \quad (2.6)$$

Où, i est le pas de temps, Q est la vitesse de drainage de l'eau [$L \cdot T^{-1}$], Cst est la constante de temps du réservoir [T^{-1}], sl est la valeur de seuil [L], h est la hauteur de l'eau dans le réservoir [L]. Un système peut être composé d'un ou plusieurs réservoirs : en cascade ou en parallèle (Roche, 1971), suivant la configuration du bassin versant.

Application aux toitures végétalisées Le modèle conceptuel nécessaire à la détermination des performances des toitures terrasses végétalisées (TTV) doit décrire la réponse de la TTV à des séries d'événements de précipitations (Mentens *et al.*, 2003), c'est-à-dire, établir une relation temporelle entre la quantité de précipitation et le ruissellement qui tient compte de la nature de la structure (végétation, substrat, couche de rétention) (Martin, 2008). Ce bilan est modifié par : le type d'hydrométéore⁴, le design de la toiture végétalisée et l'évapotranspiration dont il est difficile d'évaluer l'influence (Martin, 2008). La Fig. 2.6 résume l'association des fonctions du bilan et les mécanismes qui les modifient.

Un modèle similaire est développé par Prowell (2006). Ce dernier se compose aussi d'une seule entrée (précipitation), d'une partie rétention (quantité d'eau stockée) et de trois sorties : évaporation, transpiration et ruissellement (Fig. 2.7). En effet, Prowell (2006) décompose l'évapotranspiration en évaporation et transpiration, ce qui permet de distinguer les rôles du sol et de la végétation. Prowell (2006) observe alors, que la partie végétalisée (sedum) n'influence que très peu la capacité de stockage. Les modèles conceptuels se distinguent par leur simplicité d'application (entrée - sortie) et aussi, par la bonne appréciation des réponses hydrologiques des toitures végétalisées (quantité d'eau ruisselée à l'exutoire). Ils requièrent néanmoins un nombre significatif de données expérimentales pour être représentatifs du transfert hydrique d'une application donnée. En outre, ils sont restreints au cas étudié et ne peuvent être appliqués aisément à d'autres problèmes. Par ailleurs, ces modèles supposent que le milieu poreux étudié a des propriétés homogènes sur l'ensemble de son épaisseur alors qu'en réalité, il existe un gradient de teneur en eau sur l'ensemble de la couche de substrat de la toiture ou encore des hétérogénéités spatiales

⁴la pluie, la bruine, la neige, la grêle, le brouillard

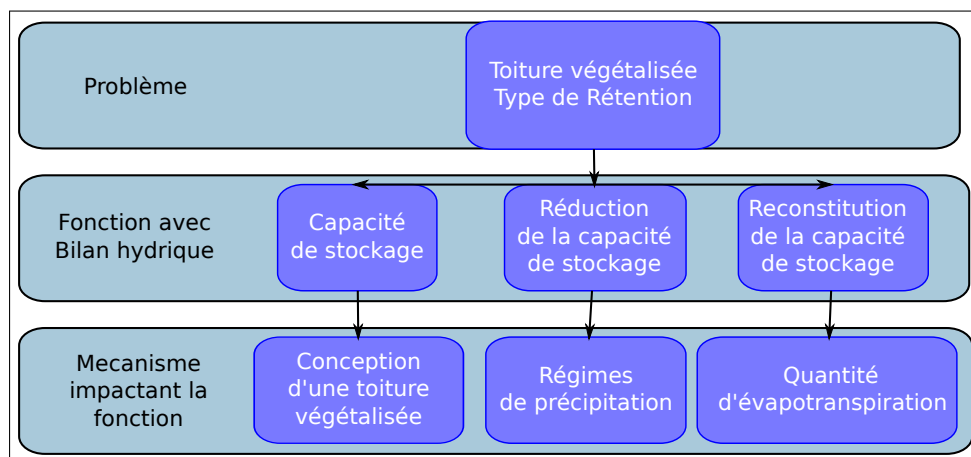


FIGURE 2.6 – Synoptique du bilan hydrique conceptuel défini par Martin, montrant le lien entre les fonctions du stockage et les mécanismes associés intervenant dans le bilan hydrique. (Martin, 2008).

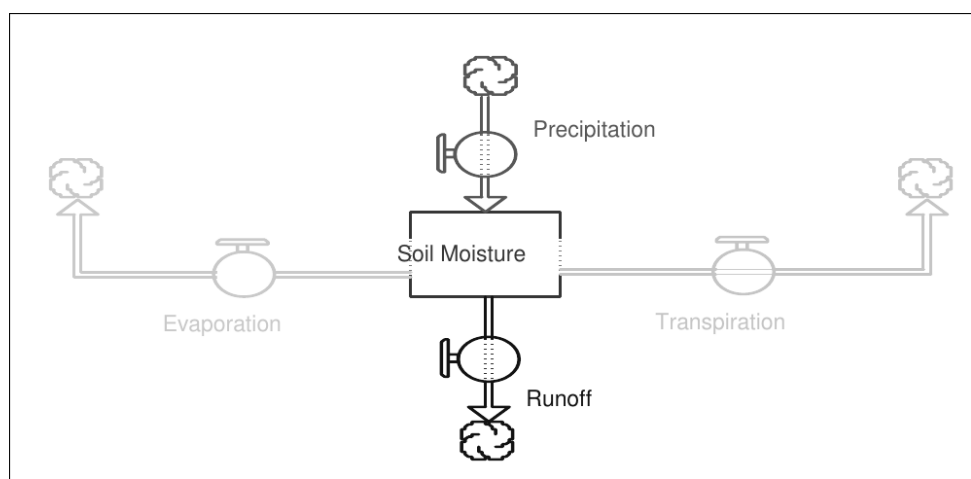


FIGURE 2.7 – Modèle conceptuel de Prowell, permettant de distinguer les rôles de la végétation et du sol sur les phénomènes de transpiration et d'évaporation. Ce schéma montre le rôle important du substrat pour la détermination de ces trois valeurs (Prowell, 2006).

dans la composition du substrat (Spengen, 2010).

2.5.2 Modèles physiques

Les modèles conceptuels décrits précédemment permettent de faire un bilan des flux entrants et sortants à travers un substrat, en supposant que la teneur en eau dans le milieu est homogène (Prowell, 2006) et que le comportement hydrodynamique est spécifique au site d'étude (Martin, 2008). Pour déterminer quel est le fonctionnement nominal et comment ce dernier est perturbé, il est préférable d'utiliser une modélisation prenant en compte la physique du sol. Les modèles « mécanistes » prennent en compte l'état intrinsèque du milieu étudié (Hilten *et al.*, 2008).

Modèle de Darcy La loi de Darcy résulte des travaux d'Henry Darcy (Darcy, 1856) portant sur l'écoulement de l'eau à travers du sable. Cette loi exprime la vitesse d'un écoulement dans un milieu poreux. Elle fut déterminée afin de dimensionner les filtres à sable utilisés pour la purification des eaux

d'alimentation de la ville de Dijon (Fig. 2.8). Cette loi empirique établit une relation *linéaire* entre la densité de flux et la perte de charge par :

$$\Delta Q = -K_s \cdot \frac{A \cdot \Delta H}{L} \quad (2.7)$$

Où Q est le débit d'eau [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], ΔH est le gradient hydraulique [m], L est la longueur de l'échantillon [m] et A est la section de passage de l'eau [m^2]. Darcy vérifia la pertinence de ses équations par l'intermédiaire de deux expériences (puits artésiens et conduites). Ces deux configurations verticale et horizontale ont permis de valider que le volume débité est inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche traversée.

La loi de Darcy peut aussi se généraliser par l'Eq.(2.8) dans laquelle, la vitesse de Darcy q – ou vitesse de filtration de l'écoulement – définit le débit du fluide qui s'écoule à travers le milieu poreux par unité de surface. K_s est la conductivité hydraulique à saturation du milieu poreux et représente la résistance à l'écoulement du fluide.

$$\vec{q} = -K_h \cdot \vec{\nabla} H \quad (2.8)$$

H est la charge hydraulique ou potentiel total [m]. Il définit la somme de toutes les charges matricielles et gravitationnelles, définie par la loi de Bernoulli :

$$H = \frac{P_l}{\rho_w g} + z \quad (2.9)$$

Dans cette relation, z représente l'altitude [m], P_l la pression de l'eau [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$], ρ_l la masse volumique de l'eau [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] et g l'accélération de la pesanteur [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]. Cette équation montre la relation entre la charge totale et la pression de l'eau. Elle sera utilisée par la suite dans les écoulements non saturé (modèle de Richards).

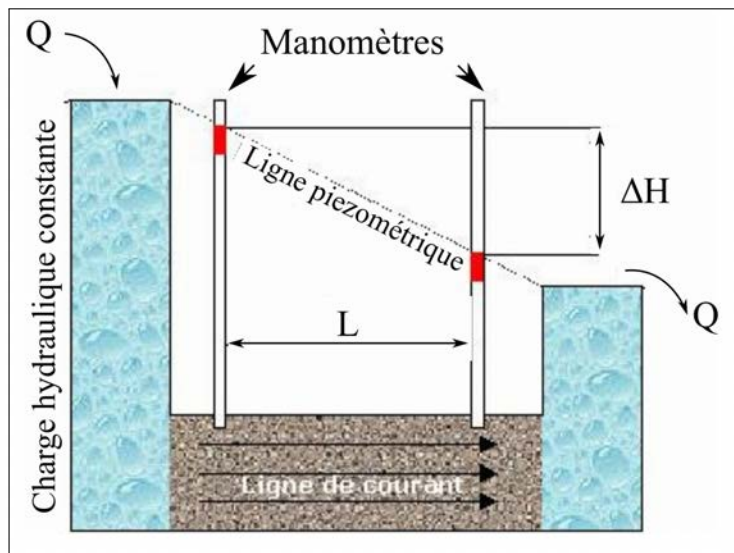


FIGURE 2.8 – Exemple d'application de la loi de Darcy à un écoulement latéral (Cardenas Gomez, 2007).

Modèle de Richards La plupart des processus de circulation de l'eau dans le sol se déroulent dans des conditions de sols non saturés. Les processus d'écoulement sont en général compliqués et difficiles à décrire quantitativement, car ils donnent souvent lieu à des variations de l'état et de la teneur en eau du

sol pendant l'écoulement. Ces variations impliquent des relations complexes entre la teneur en eau, la succion et la conductivité hydraulique. Ces variables peuvent être influencées par la structure du milieu et sa texture.

De plus, des processus de transfert de l'eau dans les sols se déroulent dans des conditions caractérisées par une teneur en eau inférieure à la saturation. La description de cette dynamique repose dès lors sur une généralisation des principes développés dans le cas des écoulements saturés, qui est la combinaison d'une loi dynamique et d'une loi de continuité. Les modifications intervenant dans la forme que prennent ces relations proviennent, d'une part, des caractéristiques spécifiques des forces auxquelles sont soumises les particules de fluide dans la zone non saturée et d'autre part, de la modification du domaine d'écoulement, qui ne correspond plus à l'ensemble de l'espace poral du sol, mais à une fraction variable de celui-ci (Musy et Soutter, 1991).

La complexité du domaine d'écoulement est encore accrue dans le cas des écoulements non saturés par le fait que le taux de saturation du sol devient une variable dans l'espace et dans le temps. Lorsque l'on s'éloigne de la saturation, des discontinuités apparaissent dans la masse de fluide (Musy et Soutter, 1991).

La circulation de l'eau du sol est donc due à une force motrice résultante d'un gradient de potentiel effectif⁵. La direction de l'écoulement est celle du potentiel décroissant et le régime d'écoulement (ou le flux) est proportionnel au gradient, il est affecté par les propriétés géométriques des canaux des pores au travers desquels l'écoulement se produit. Ces principes sont également applicables dans les sols non saturés. La force motrice (somme des forces de pesanteur et des forces de pression hydrostatique) dans un sol saturé entraîne l'apparition d'un potentiel de pression positif. D'autre part, l'eau dans un sol non saturé est sujette à une pression inférieure à la pression atmosphérique, ou succion et le gradient de cette succion constitue lui aussi une force motrice (Musy et Soutter, 1991).

Richards a généralisé l'équation de Darcy (Eq. 2.7) aux milieux poreux non-saturés (Eq. 2.10).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \vec{\nabla} \left(K(h) \cdot \vec{\nabla} H(h) \right) - S \quad (2.10)$$

Où θ est la teneur en eau volumique [$L^3.L^{-3}$], t est le temps [T], K est la fonction de conductivité hydraulique [$L.T^{-1}$], h est le potentiel de pression [L], S peut être soit un terme source ou puits [$L^3.L^{-3}.T^{-1}$]. H est le potentiel total (somme du potentiel de pression et de la gravité) [L] (Eq. 2.9). La résolution de l'équation de Richards permet d'établir une courbe de rétention $h(\theta)$, qui décrit la relation entre la teneur en eau θ (voir Fig. 2.2), le potentiel de pression h en fonction de la conductivité hydraulique $K(h)$.

Ce modèle permet le calcul des transferts d'eau liquide dans un milieu poreux non saturé. Il prend uniquement en compte les écoulements de la phase liquide et ignore l'effet de la phase vapeur dans le bilan hydrique massique (Hilten *et al.*, 2008). Du fait de la forte dépendance à la fois de la conductivité hydraulique et du potentiel de pression vis-à-vis de la teneur en eau, l'équation de Richards est fortement non linéaire (Gujisaite, 2008). Les fonctions $K(h)$ et $h(\theta)$ dépendent de la texture du sol (taille des particules) mais aussi de l'arrangement granulaire (structure). Il existe différentes méthodes pour approximer ces fonctions (e.g. Brooks et Corey (1964), Mualem (1976) ou van Genuchten (1980)). Ces modèles sont généralement basés sur un jeu de données physiques ou expérimentales qui ont été calibrés sur différents types de sols (Weynants, 2011).

⁵énergie d'un corps en interaction gravitationnelle

Diverses formulations de modèles numériques en milieux non saturés ont été identifiées afin de déterminer et de caractériser les propriétés du milieu poreux. Notamment, l'allure de la courbe de rétention $h(\theta)$ et la fonction caractérisant la conductivité hydraulique $K(\theta)$.

Caractéristiques générales des courbes de rétention La courbe de rétention donne la teneur en eau dans le sol (saturé ou non) en fonction de la pression matricielle appliquée. Si les pores sont représentés par un ensemble de capillaires, avec des propriétés de rétention identiques à un sol réel, la courbe de rétention fournit une distribution des tailles de pore du sol considéré à partir de laquelle la conductivité hydraulique $K(h)$ peut être déterminée. Pour la définition de la courbe de rétention, Kosugi *et al.* (2002) supposent que l'eau et l'air sont respectivement les fluides mouillants et non mouillants présents dans le sol. En conséquence, la notation concerne uniquement le système air-eau et peut être différente pour un autre système multi-fluide. En outre, le sol est supposé homogène et rigide. Par définition, la teneur en eau θ est égale à la saturation θ_S lorsque le potentiel de pression h est égale à zéro. Toutefois, sous certaines circonstances. La teneur en eau à saturation peut être égale à la porosité ε lorsque toute l'eau est stockée dans les pores, sinon elle peut être définie par $\theta_S \approx 0,85 - 0,9\varepsilon$ (Kosugi *et al.*, 2002).

La Fig. 2.9 représente la schématisation de la courbe de rétention $\theta(h)$ ou du degré de saturation d'un sol donné pour en définir les différents paramètres. h_a est la pression de l'air dans le sol (remplacement de l'eau par de l'air). Cette valeur est supposée être inversement proportionnel à la taille maximale des pores formant un réseau connecté dans le sol. Quand la valeur du potentiel de pression est inférieure à h_a , θ décroît selon une courbure en « S » avec un point d'inflexion h_i . Lorsque le potentiel de pression décroît encore plus, θ décroît a priori asymptotiquement pour atteindre une teneur en eau du sol spécifique connue comme la *teneur en eau résiduelle*, θ_r .

La raison pour laquelle θ_r possède une valeur finie est que la majorité des mesures de teneur en eau sont réalisées dans la zone humide du sol et que les modèles de courbe de rétention assument un comportement asymptotique pour une faible teneur en eau. Il en résulte que la plupart des modèles décrivent la courbe de rétention entre la teneur en eau résiduelle et la teneur en eau à saturation (Kosugi *et al.*, 2002).

En plus de ces paramètres, différents modèles hydrologiques intègrent des paramètres adimensionnels, qui décrivent la distribution des tailles de pores dans le sol. Plusieurs fonctions ont été proposées pour lier le potentiel de pression à la teneur en eau. La plupart de ces relations sont empiriques mais induisent des paramètres qui ont un sens physique. Vu la multitude des modèles, seuls les plus cités dans la bibliographie sont évoqués dans ce travail de thèse.

Formulation de Brook et Corey Le modèle proposé par Brooks et Corey (1964) est adapté pour la détermination des propriétés hydrodynamiques d'une large gamme de sol (sableux, argileux et limoneux) en utilisant le degré de saturation S_w en fonction du potentiel de pression h :

$$\begin{cases} S_w = \left(\frac{h_a}{h}\right)^n & h < h_a \\ S_w = 1 & h \geq h_a \end{cases} \quad (2.11)$$

Où le paramètre h_a la pression de l'air dans le sol [m] et h est le potentiel de pression matricielle du sol [m]. n est déterminé comme étant un paramètre de taille des pores ou indice de distribution de la taille des pores [-]. La courbe caractéristique sol – eau décrit une fonction exponentielle décroissante

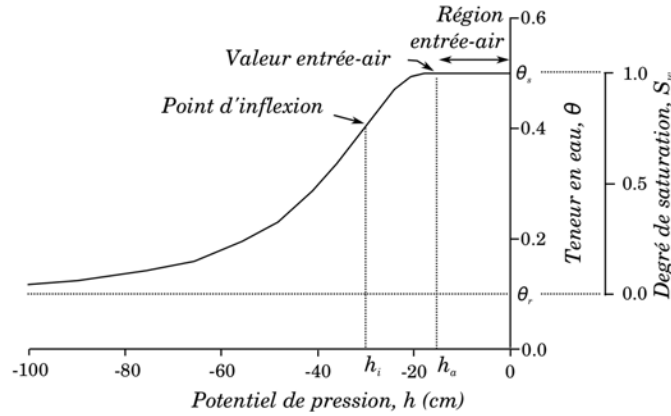


FIGURE 2.9 – Représentation schématique d'une courbe de rétention d'un sol type avec la définition des différents paramètres. La région entrée-air représente le domaine de la pression de l'air dans le sol (Kosugi et al., 2002).

quand la succion (potentiel matriciel) est plus grande que la pression de l'air entrant dans le sol. Elle est supposée constante pour une succion inférieure à la pression atmosphérique (Sillers *et al.*, 2001). Les deux paramètres h_a et n contribuent énormément à l'allure de la courbe de rétention (Fig. 2.10).

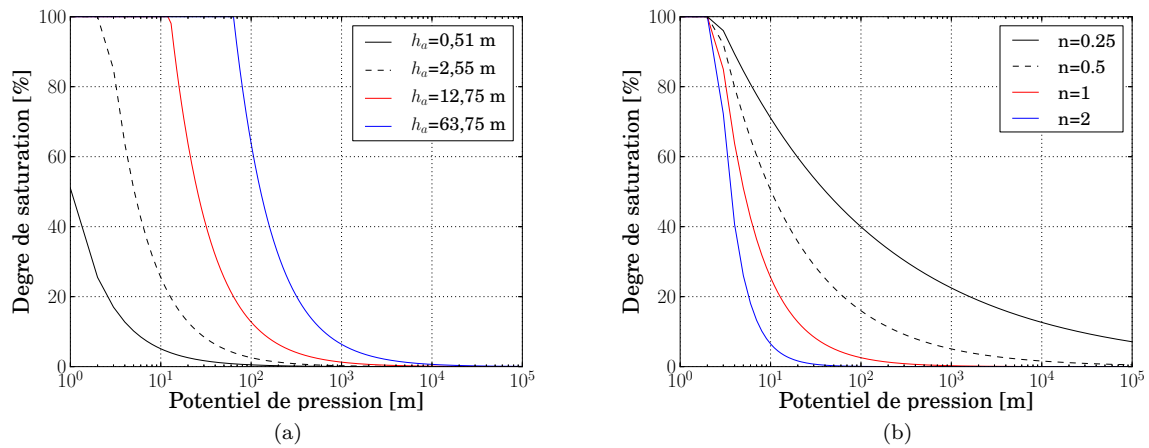


FIGURE 2.10 – Représentation du modèle de Brooks et Corey (1964) en faisant varier le paramètre h_a ou n , (a) $n = 2,55$ et h_a varie et (b) $h_a = 2,55$ m et n varie.

Formulation de Van Genuchten Le modèle de Brooks et Corey (1964) présente une discontinuité de la dérivée de la teneur en eau au niveau de la pression d'entrée d'air (Vogel *et al.*, 2001). Cette particularité de ce modèle a conduit au développement du modèle de van Genuchten (1980), qui est un modèle continu. Il permet d'ajuster le degré de saturation S_w avec les données de potentiel matriciel sur toute la gamme des pressions du sol étudié. L'équation fait apparaître trois paramètres d'ajustement : α est un paramètre d'ajustement du potentiel de pression. Il est assimilé à l'inverse du paramètre h_a introduit dans le modèle de Brooks et Corey (1964). Le paramètre n définissant la distribution de la taille des pores et m est le paramètre de « it » du modèle (Sillers *et al.*, 2001). van Genuchten (1980) propose différentes formulations du paramètre m : $m = 1 - 1/n$ ($n > 1$, $0 < m < 1$) et $m = 1 - 2/n$ ($n > 2$,

$0 < m < 1$) pour la détermination de la courbe de rétention.

$$S_w = \begin{cases} \frac{1}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Le degré de saturation S_w est aussi exprimé en fonction des différents teneurs en eau.

$$S_w = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.13)$$

Où θ_r et θ_s sont respectivement les teneurs en eau résiduelle et à saturation [$L^3.L^{-3}$].

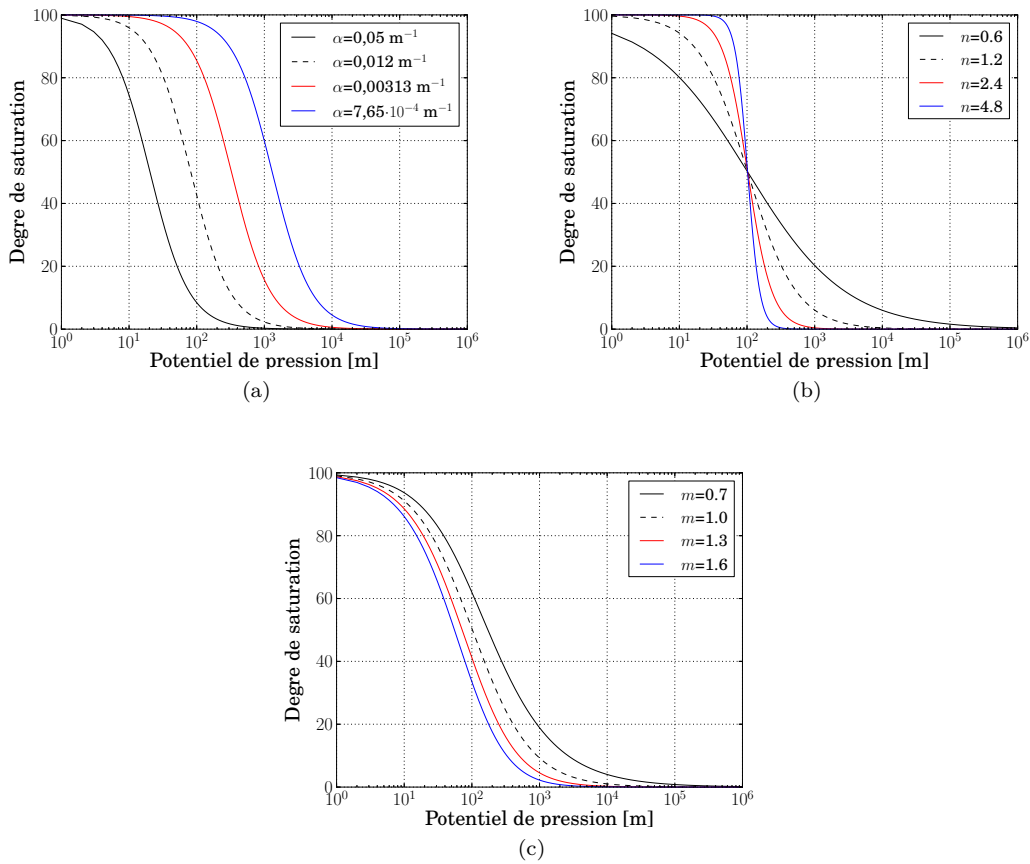


FIGURE 2.11 – Représentation du modèle de van Genuchten (1980) en faisant varier un paramètre α ou n ou m , a) haut gauche m et n constants (i.e. $n=1, 5$ et $m=1$); α varie, b) haut droit m et α constants (i.e. $m=1$ et $\alpha=9,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$); n varie, c) bas milieu n et α constants (i.e. $n=1$ et $\alpha=9,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$); m varie (Sillers et al., 2001)

L'analyse de la Fig. 2.11 montre que le paramètre α influence le comportement hydrodynamique du milieu poreux mais pas l'allure de la courbe. Il crée un décalage de la courbe, ce qui se traduit par un décalage du potentiel matriciel exprimé par une succion plus ou moins importante. En faisant varier ce paramètre, nous faisons varier la pression de flétrissement⁶ et la capacité au champ⁷. La modification du paramètre n entraîne la création d'un point d'inflexion autour de la valeur constante de α (inverse du

⁶humidité du sol à partir de laquelle la plante ne peut plus prélever d'eau

⁷capacité de rétention maximale en eau du sol

potentiel matriciel). Quand la valeur de n est importante, la distribution des pores est uniforme et une zone de dé-saturation est créée. Cette zone est marquée par un palier entre une position saturée et une autre sèche.

Vogel *et al.* (2001) rappellent une particularité du modèle de van Genuchten (1980), à savoir sa capacité de représenter correctement les sols à texture fine à proximité de la saturation, ce qui n'est pas le cas pour le modèle de Brooks et Corey (1964).

Application aux toitures végétalisées Il existe divers modèles physiques qui ont été développés et adaptés à la simulation numérique du flux d'eau à travers la TV. En premier lieu, ils s'attachent à décrire la complexité des milieux qui la constitue notamment le substrat. De plus, les écoulements qui s'y produisent sont majoritairement non saturés et la présence de végétation (racines) complique la tâche (Mandal *et al.*, 2002). Enfin, la plupart des modèles ne sont fiables que pour une certaine intensité de pluie et limités à un nombre réduit de paramètres hydrauliques. En fait, ils n'arrivent pas à simuler les quantités d'eau drainées lors de fortes pluies (orages). D'un autre côté, les propriétés hydrauliques et les effets du vieillissement du substrat sont des questions ouvertes, qui nous le verrons plus loin affectent le transport de l'eau dans une TV. Finalement, le transfert à travers les différentes couches de la TV est faiblement décrit et prédit. Ce qui limite les possibilités de comparaisons et de validation.

Hilten *et al.* (2008) a résolu les transferts hydriques au sein de la toiture en utilisant un bilan hydrique pour faire le lien entre l'impact de l'évapotranspiration sur le stockage de l'eau à différentes périodes de l'année (scénario hiver et été) en se focalisant sur le ruissellement et les performances hydriques de la TV. Dans son modèle, du fait de la texture hétérogène du substrat, le ruissellement est parfois surestimé. Il ressort de l'étude que des milieux complexes ayant une structure hétérogène peuvent influencer le transport hydrique.

Les modèles physiques décrits précédemment obéissent aux lois de transferts hydriques dans les milieux insaturés (équation de Richards). Afin de résoudre ce type d'équation, les modèles ont besoin d'un grand nombre de paramètres d'entrée. Selon Palla *et al.* (2012), pour une TV composée de deux couches (substrat et drainage), chaque couche requiert une paramétrisation hydrique (θ_r , θ_s , K_s , α , n). Le modèle physique a l'avantage d'être capable de déterminer les quantités d'eau évacuées et le retard du débit de pointe pour des événements pluvieux variables. Cependant, cette modélisation et les calculs associés, comme la quantité d'eau ruisselée (évacuée), sont très sensibles à la qualité de l'estimation et de la représentativité des paramètres hydriques utilisés (Hilten *et al.*, 2008).

Les méthodes de détermination des paramètres hydriques des substrats des TV sont reprises par un grand nombre d'auteurs. Pires *et al.* (2008); Hilten *et al.* (2008) ont utilisé la méthode des presses extractives à basses et hautes pressions dans leurs travaux afin d'obtenir des informations sur : la distribution des pores du substrat, l'analyse de la courbe de rétention en eau pour mettre en évidence la relation entre la variation de la distribution des tailles de pores et les phases de saturation/drainage (phénomène d'hystérèse). Les résultats ont montré que la structure du sol (milieu poreux) présente d'importantes variations dans la distribution des tailles de pores causées par des cycles de saturation/drainage.

2.5.3 Influence du phénomène d'hystérèse

La relation entre la potentiel de pression et la teneur en eau n'est pas explicite. Les courbes déterminées par *drainage*, différent en effet celle déterminées par *humidification*. La relation $h(\theta)$ (Eq. 2.12) dépend par conséquent de la *direction* à laquelle la teneur en eau et le potentiel de pression évoluent. La teneur

en eau d'un milieu poreux est ainsi plus grande lorsque ce dernier se trouve en phase de drainage par rapport à la phase d'humidification. Ce propos est illustré avec la Fig. 2.12.

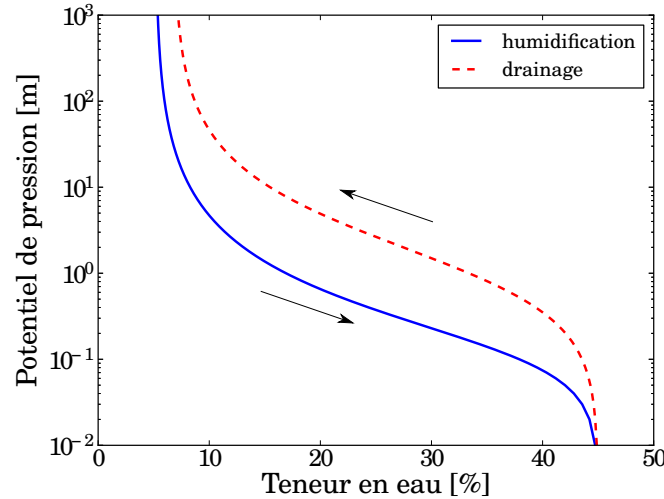


FIGURE 2.12 – Représentation de l'effet d'hystérèse. courbe de drainage (ligne rouge discontinue) , courbe d'humidification (ligne continue bleue) d'après Musy et Soutter (1991)

Plusieurs facteurs contribuent à l'effet d'hystérèse. Parmi eux, la présence d'air piégé et sa dissolution progressive, qui a tendance à réduire la teneur en eau du milieu poreux fraîchement humidifié et les phénomènes de gonflement et de retrait affectant la phase solide qui, peut provoquer des variations de la structure du substrat (Musy et Soutter, 1991). Elle dépend aussi de la température qui entraîne une modification de la viscosité de l'eau, qui provoque une interconnexion de pores de tailles différentes (Trabelsi, 2010; Arai, 2013) et de l'état hydrique du matériau poreux qui entraîne une modification de la conductivité hydraulique (Baroghel-Bouny, 2007).

La majorité des références bibliographiques qui traitent des transferts hydriques pour les TV ne tiennent pas compte ce phénomène, car ce dernier intervient très peu dans la détermination des quantités d'eau sortantes. Il intervient principalement dans le comportement hydrique du milieu poreux (teneur en eau ou potentiel de pression matricielle) (Abbasi *et al.*, 2012). Néanmoins, en physique du sol, ce phénomène est largement utilisé. Il est possible de citer les travaux de Smith (1993) qui montre pour un sol de faible épaisseur l'importance de la prise en compte du phénomène d'hystérèse. De plus, Le substrat des TV est constitué de matériaux organiques (tourbe, écorces). L'hystérèse a une influence sur le comportement hydrique des sols tourbeux ou limoneux (Naasz *et al.*, 2005; Abbasi *et al.*, 2012). Ce phénomène est accentué lorsque l'échelle d'étude est plus grande (Javaux et Vanclooster, 2006).

Différents modèles sont utilisés, il est possible de citer la formulation de Scott *et al.* (1983) reprise et complétée par Kool et Parker (1987). Cette formulation fait intervenir d'autres paramètres hydriques par rapport au modèle de van Genuchten (1980) (Eq. 2.12). Scott *et al.* (1983) introduisent le phénomène d'hystérèse dans la courbe de rétention $h(\theta)$ en stipulant que lors du séchage ou de la saturation du matériau, le chemin n'est pas le même, de ce fait deux courbes distinctes font apparaître pour chacune des paramètres différents : $(\theta_r^h, \theta_s^h, K_s^h, \alpha^h, n^h)$ pour la phase d'humidification et $(\theta_r^d, \theta_s^d, K_s^d, \alpha^d, n^d)$ pour la phase de drainage (séchage) (Abbasi *et al.*, 2012).

2.6 Comparaison des modèles

Dans le domaine de l'hydrologie des sols, plusieurs études ont déjà traité de la comparaison des modèles hydriques. Zeller (1987) distingue les différences des modèles suivant leur degré de complexité, selon qu'ils prennent ou non en compte un certain nombre de processus physiques et selon le type d'interface sol-atmosphère auquel ils s'appliquent : i) application à sol nu, à un couvert végétal, ou à une surface partiellement végétalisée, ii) prise en compte du comportement hydrique de la végétation : résistance stomatique, réservoir en eau pour la plante, extraction racinaire, et iii) représentation des transferts d'eau au sein du profil racinaire. Choissnel (1992) les a proposé un autre type de classification en deux groupes, suivant qu'ils résolvent ou non, de façon explicite l'équation du bilan hydrique .

Notre objectif est de comparer uniquement les modèles utilisés pour les toitures végétalisées. L'ensemble des modèles recensés aujourd'hui ont un seul et même but, la quantification des performances hydrologiques des TV, en termes de réduction de la quantité d'eau ruisselée et d'amélioration de l'effet retard (Palla *et al.*, 2012). Avant de décrire les différences qui peuvent exister entre les deux types de modèles (physiques et conceptuels), il est utile d'énoncer les verrous liés aux performances de ces derniers. Li et Babcock Jr. (2014) ont fait un état de l'art de différents articles traitant de l'hydrodynamique des TV. Ils ont pu déterminer que l'efficacité des modèles est sujette à des facteurs multiples, notamment les conditions aux limites employées (le volume et l'intensité des précipitations) (Stovin *et al.*, 2012), l'état antérieur du milieu étudié (Stovin, 2010), le type de végétation (Metselaar, 2012), le substrat utilisé et l'inclinaison de la toiture (Van Woert *et al.*, 2005). Ces contraintes peuvent réduire l'efficacité des modèles à décrire le comportement hydrodynamique des TV et l'évaluation de leurs performances.

Afin de démontrer la différence qu'il peut y avoir entre les modèles conceptuels et physiques appliqués aux TV, il est nécessaire d'énoncer les différences qu'il peut exister entre chaque modèle. Les avantages et les inconvénients de ces deux approches sont différents et ils ne répondent pas aux mêmes contraintes et n'ont pas les mêmes objectifs.

Les modèles conceptuels ont l'avantage d'être rapides en terme de modélisation, aussi le nombre de compartiments (réservoir) peut être limité, ce qui implique la nécessité d'un nombre limité de mesures (variables). En revanche, les paramètres utilisés lors de la modélisation n'ont pas nécessairement de sens physique et ils doivent être « ajustés » par une optimisation systématique des mesures faites. Concernant les modèles physiques, ils ont un domaine de validité des lois étendu par rapport aux modèles conceptuels. De même, ils nécessitent un calage moins important en termes de durée et de quantité de données nécessaire. Enfin, ils ont la capacité de prendre en compte les modifications de la physique (développement de la végétation, changement de la structure du milieu ou le vieillissement). Les modèles physiques ont par contre l'inconvénient d'avoir besoin d'une description fine de la géométrie et des paramètres représentatifs de la TV pour s'assurer de la fiabilité des résultats. La modélisation peut être longue et complexe vue la finesse de la géométrie et des conditions aux limites.

2.7 Objectifs, questionnement et hypothèses

Ce travail de thèse vise ainsi à décrire l'hydrodynamique au sein d'un milieu poreux fortement anthropisé, complexe et original. Ce Technosol se caractérise en premier lieu par une faible épaisseur de matériau. Il présente une forte hétérogénéité spatiale, à la fois de par sa constitution en couches de natures très différentes mais également, à une échelle fine, par l'existence d'une porosité complexe due à l'utilisation

de matériaux aux propriétés très différentes. De plus, en tant que Technosol constitué de matériaux fragmentés, il est attendu que ses propriétés varient au cours du temps.

Les objectifs de la thèse se déclinent de la manière suivante :

- comprendre et caractériser les transferts d'eau au sein d'un Technosol mince présentant une dynamique spatiale et temporelle ;
- pouvoir évaluer les performances (rétention en eau, effet retard) au cours du temps d'une TV depuis l'échelle du profil, jusqu'à celle du bâtiment ;
- développer une approche de modélisation capable d'intégrer les spécificités décrites ci-dessus en vue, notamment de tester et proposer des améliorations techniques au système.

Les questions scientifiques qui en découlent sont :

- Quelles sont les indicateurs pertinents qui permettent d'estimer les performances hydriques d'une toiture végétalisée ?
- Les méthodes de caractérisation des propriétés physiques et hydriques développées sur les sols naturels permettent-elles de décrire les transferts *in situ* dans la TV (Technosol) ?
- Comment évoluent les propriétés physiques d'une TV à partir de sa mise en place sur un toit ? Comment mettre en évidence cette évolution ? Comment cette évolution peut-elle influencer les performances hydriques ?
- La caractérisation des propriétés hydriques et physiques est-elle suffisante pour résoudre un modèle permettant de simuler de manière réaliste les transferts hydriques ?
- Quelles sont les causes de l'incertitude liées à la prédiction des performances hydriques des TV et le lien avec le modèle hydrique employé ?
- Comment intégrer l'aspect vieillissement des couches de la TV dans la modélisation ?

Au regard des travaux précédemment cités, certaines hypothèses ont été formulées :

- À l'échelle de la TV, nous considérons l'écoulement dans la TV comme unidimensionnel étant donné le rapport entre les surfaces considérées ($> 30 \text{ m}^2$) et l'épaisseur de la TV ($< 30 \text{ cm}$) ;
- Le modèle utilisé (modèle mécaniste de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) est choisi pour représenter l'hydrodynamique du substrat ;
- Le modèle utilisé est à simple porosité, avec une structure porale simplifiée en forme de tubes parallèles (loi de Jurin-Laplace pour la distribution des tailles de pores).

Caractérisation physique et hydrique des constituants d'une TV

Sommaire

3.1	Introduction	42
3.2	Matériels et méthodes	42
3.2.1	Présentation des constituants	42
3.2.2	Préparation des échantillons	43
3.2.3	Prélèvement du substrat	44
3.2.4	Mesures physiques	44
3.2.5	Mesures hydriques	45
3.3	Résultats et discussion	51
3.3.1	Le substrat	51
3.3.2	Les billes d'argile	55
3.3.3	Le géotextile	57
3.3.4	Première évaluation des performances hydriques	58
3.4	Conclusion partielle	58

« Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre. »

Marie CURIE

3.1 Introduction

La solution à la plupart des problèmes de transfert hydrique et de flux dans les Technosols requiert la connaissance d'informations quant aux propriétés physiques et hydriques de ces milieux en conditions non saturées. Ces paramètres constituent en effet les paramètres d'entrée de ce type de problèmes. Dans ce chapitre, nous présentons les campagnes d'investigations qui ont été réalisées pour la caractérisation des différents constituants des toitures végétalisées étudiées. Ces mesures permettent l'évaluation de la contribution de chaque composant et surtout une première estimation des performances hydriques.

3.2 Matériels et méthodes

3.2.1 Présentation des constituants

Comme décrit dans le chapitre 1, les TV sont composées de cinq couches : (i) une végétation, (ii) un substrat, (iii) un filtre, (iv) une couche de drainage et (v) une membrane d'étanchéité (ADIVET, 2007).

Végétation Les plantes qui sont installées sur la TV sont : *sedum album*, *sedum reflexum*, *sedum reflexum germanicum*, *sedum sexangulare*, *sedum floriferum* (Bouzouidja *et al.*, 2013). Ces plantes n'excèdent pas 15 cm de hauteur.

Substrat Cette couche est un milieu poreux antropisé composé de (80 %) de matière minérale et de (20 %) de matière organique. La part minérale représente la pouzzolane, qui est issue de roche volcanique et utilisée pour son faible poids et son importante porosité (Londra, 2010). Deux granulométries sont utilisées (3 – 6 mm et 7 – 15 mm) pour une capacité optimale de rétention en eau. Les propriétés physiques (données usine) fournies par le fabricant sont données dans la Table 4.1.

La part organique est composée de 10 % of *tourbe blonde* et 10 % d'écorces de pin maritime.

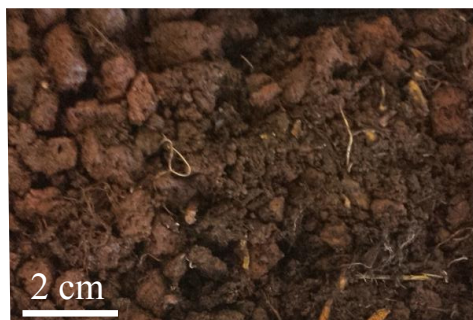


FIGURE 3.1 – Photographie du substrat qui compose la TV.

Géotextile (Filtre) Son rôle est de garantir le bon écoulement de l'eau de pluie et de prévenir le lessivage du substrat. C'est une fine géomembrane synthétique en polyester permettant à l'eau de traverser le filtre. L'épaisseur de cette couche est de : 1,7 mm. La masse par unité de surface est de : 200 g.m^{-2} . L'ouverture de filtration est de : $90 \mu\text{m}$. Les propriétés fournies par le fabricant sont dans la Table 4.1.

Drainage Cette couche est représentée par deux types : synthétique (structure alvéolaire (Nidaroo)) et naturel (Billes d'argile expansées). Cette couche est utilisée d'une part, pour soutenir les couches supérieures et d'autre part, pour permettre le stockage temporaire de l'eau de pluie. Concernant la structure alvéolaire d'épaisseur de 40 et 60 mm (Stock40 et Stock60), elle est faite en polypropylène avec un taux de vide de 95 %. Ce vide explique la capacité théorique de stockage d'eau. La densité apparente est de : 35 kg.m^{-3} . Concernant, les billes d'argile, leur épaisseur est de 50 mm. Elles sont issues de la production par séchage à haute température (1100°C) de sols argileux. À cette température, un gaz est libéré et fait expander l'argile (Wever et van Leeuwen, 1995). Les billes d'argile sont considérées selon le mode de production comme des agrégats légers. Cette dénomination est due à leur faible densité (Chandra et Berntsson, 2002). La densité apparente est de 275 kg.m^{-3} . L'ensemble des propriétés fournies par le fabricant sont dans la Table 4.1.

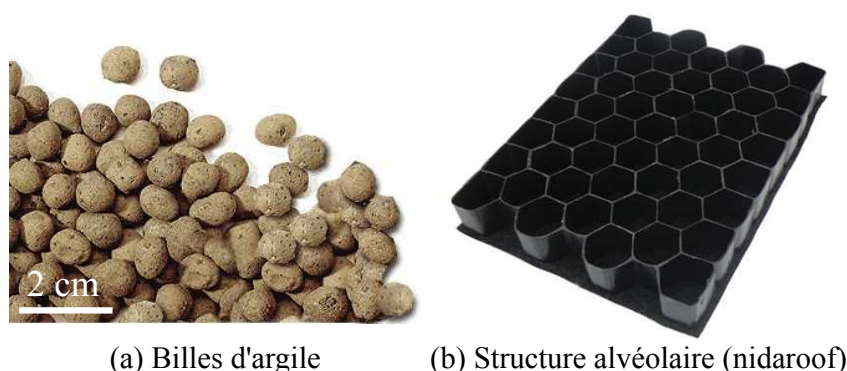


FIGURE 3.2 – Photographie du système de drainage : a) les billes d'argile, b) la structure alvéolaire, qui compose la TV.

3.2.2 Préparation des échantillons

Les TV sont des milieux poreux qui remplissent notamment des fonctions de support de végétation, de régulation des flux hydriques et à ce titre, elles peuvent être assimilées à des sols. Comme précédemment évoqué, l'origine des matériaux parents les rattachent plus spécifiquement à la classe des Technosols construits.

Les constituants des TV étudiés sont des milieux hétérogènes. Une étape d'échantillonnage et de quartage est ainsi primordiale.

Échantillonnage et quartage du substrat Ces opérations visent à homogénéiser le substrat et à prélever une quantité suffisante d'échantillon représentatif du produit commercial utilisé. Cette réduction d'un échantillon s'effectue par une succession d'opérations de quartage (c'est-à-dire de fractionnements d'une quantité de matériau) comme le montre la Fig. 3.3. Le substrat est livré dans des sacs d'une masse de 500 kg. L'opération de quartage et d'homogénéisation est reprise de la méthode de Van Wambeke *et al.* (1976). Ces opérations de quartage sont reproduites jusqu'à obtention d'un sous échantillon homogène d'une masse d'une vingtaine de kilos.

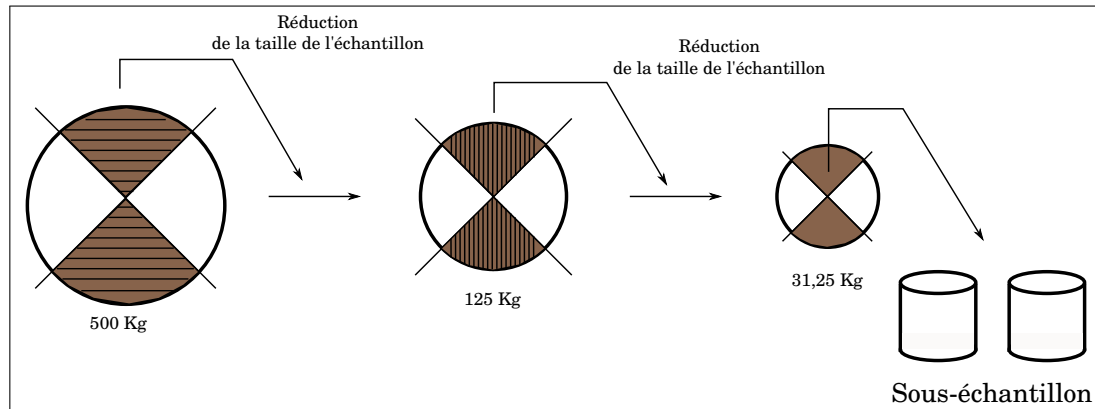


FIGURE 3.3 – Opération de quartage sur le substrat nécessaire pour les différentes campagnes de caractérisation hydrique. Au final, huit sous-échantillons sont obtenus.

3.2.3 Prélèvement du substrat

Deux types de substrat sont étudiés : le premier dénommé « initial », qui n'a pas été exposé aux contraintes météorologiques (S_0) et le second dénommé « évolué », qui lui a été exposé à 30 mois de conditions météorologiques (S_{30}). Le premier provient du fabricant (Falienor, France) alors que le second est extrait de la TV située sur le toit du Laboratoire Régional de Nancy (LRN). Le substrat S_0 a été mélangé et quarté pour assurer une distribution homogène des proportions organiques et minérales. Au début de cette étude, une quantité de 20 kg de substrat à teneur en eau a été stockée dans des sacs hermétiques. Le substrat S_{30} contenant de la végétation et des racines a été stocké dans un bac. Les constituants ont été stockés afin d'y être analysés. Par la suite, une deuxième mesure a été effectuée après une période de 30 mois d'utilisation de la toiture végétalisée (S_{30}).

Le choix de la date du prélèvement du substrat à 30 mois après l'installation est basé sur l'occurrence d'une période froide (février 2014), compatible avec le plan d'avancement de la thèse où le substrat n'est pas impacté par des températures trop importantes et ne présente pas de développement végétal important.

3.2.4 Mesures physiques

Analyse granulométrique L'analyse granulométrique d'un sol peut être considérée comme une fonction mathématique qui donne la quantité relative de particule solide par rapport au diamètre de ces dernières. Elle est cruciale dans la compréhension des propriétés physiques d'un sol (Musy et Soutter, 1991).

La mesure de la granulométrie des particules a été réalisée en utilisant la norme NF P94-056 relative à l'analyse de la granulométrie des sols au LRN (Fig. 3.4) par tamisage par voie humide sur tamis à maille carré. Une colonne de tamis est constituée conformément à la norme NF ISO 565 relative aux caractéristiques des tamis lors de l'analyse. Pendant le tamisage, la colonne est agitée manuellement (Fig. 3.4b) et le matériau est lavé pour faciliter le décollement des particules entre elles et éliminer les plus petites. Après séchage, la colonne est à nouveau agitée, les « refus »¹ sont ensuite pesés, tamis par tamis ainsi que les particules inférieures à 80 μm . Cela permet d'établir la courbe granulométrique. Le

¹particules restantes dans chaque tamis

détail de cette analyse est présentée en Annexe A.1.



FIGURE 3.4 – Exemple d'essai granulométrique. a) représente la colonne des différents tamis de diamètre allant de 8 mm à 63 µm. b) l'agitation du tamis pour évacuer les particules dont le diamètre est inférieur au diamètre du tamis. c) lessivage du matériau pour évacuer les particules fines.

Mesures de la densité réelle et apparente, estimation de la porosité La détermination de la densité réelle est réalisée au moyen d'un pycnomètre à hélium (UltraPyc-1200e) (Fig. 3.5). La cellule qui contient le substrat a une capacité de 135 cm³ pour un diamètre interne de 49 mm et une profondeur de 75 mm.

Tout d'abord, l'air contenu dans le cylindre est chassé hors du dispositif. Par la suite, une quantité d'hélium déterminée est injectée, cette quantité va pénétrer tous les pores du substrat. Lorsque la pression est égale à la pression atmosphérique, l'appareil mesure le volume injecté. On en déduit alors la densité réelle D_r .

$$D_r = \frac{M_s}{V_s} \quad (3.1)$$

Où M_s est la masse de substrat [g] et V_s et le volume de substrat [cm³].

La détermination de la densité apparente est effectuée en utilisant une adaptation de la norme NF-EN 12580 détaillée en Annexe A.2. La masse volumique apparente ou densité apparente est définie comme le rapport de la masse solide après séchage à 105 °C pendant 24 h sur le volume total à l'humidité du terrain au moment du prélèvement (Eq. 3.2). Elle a été déterminée en utilisant la méthode des cylindres, par pesée des cylindres de 251 cm³, 5000 cm³, 14 000 cm³ et 19 000 cm³.

$$D_a = \frac{M_s}{V_t} \quad (3.2)$$

Où V_t et le volume de total du récipient [cm³].

La porosité totale représente le volume qui sera rempli par l'air ou l'eau. Ainsi, la porosité est fonction de la densité (Eq. 3.3), son calcul se fait à partir de la mesure de la densité apparente et réelle.

$$\varepsilon = 1 - \frac{D_a}{D_r} \quad (3.3)$$

D_r est la densité réelle du sol [g.cm⁻³], D_a est la densité apparente du sol [g.cm⁻³].

3.2.5 Mesures hydriques

Les paramètres mesurés sont :

- la teneur en eau à saturation θ_S ;



FIGURE 3.5 – Dispositif de mesure de la densité réelle par la méthode du pycnomètre à He

- la conductivité hydraulique à saturation K_S ;
- la teneur en eau à capacité au champ θ_{cc} .

Mesure de la teneur en eau à saturation La teneur en eau à saturation a été estimée par remontée capillaire dans des cylindres de 251 cm³. Le substrat était stocké dans des sacs hermétiques et conservé à 4 °C. Le dispositif est constitué de deux membranes, une grossière (maille 1,5 × 2 mm) et une fine (200 µm) maintenues à l'aide d'un élastique sur la partie inférieure du cylindre. Ces membranes ont été installées afin de retenir le substrat lors des différentes mesures. Les cylindres ainsi préparés ont été placés dans un récipient en PVC sur une plaque de PVC de maille de 2 × 20 mm située à quelques cm du fond du récipient. Cette dernière a été remplie d'eau déminéralisée jusqu'à 1-2 mm au-dessus du plan de contact entre les cylindres et la grille en PVC puis fermé. Le substrat est porté à saturation pendant une durée de 24 h avant l'essai par remontée capillaire. Enfin, les cylindres de sol saturé ont été pesés afin de déterminer la teneur en eau par différence avec la masse des cylindres séchés à 105 °C.

La teneur en eau à saturation est en principe égale à la porosité si l'ensemble des pores est occupé par l'eau. Il s'avère que dans les conditions naturelles, un sol ne parvient jamais à une saturation totale, car il reste toujours des cavités où l'air est piégé (Musy et Soutter, 1991). Il n'est pas évident de discerner la vraie valeur de teneur en eau à saturation. Dans la suite du document, la teneur en eau à saturation est une valeur estimée.

Mesure de la teneur en eau à capacité au champ La teneur en eau à capacité au champ est définie comme le taux d'humidité du sol après que l'excédent d'eau ait été drainé et que le régime d'écoulement vers le bas soit devenu pratiquement nul. Ce régime est obtenu habituellement deux à trois jours après une pluie ou une irrigation dans des sols perméables, de texture et de structure uniformes (Musy et Soutter, 1991). Dans le domaine de l'hydrologie des sols, beaucoup de confusion existe par rapport à la définition du terme « capacité ». La teneur en eau à capacité au champ est aussi définie comme la teneur en eau maximale non mobilisable après écoulement par effet gravitaire (Baize, 2000). De même, d'autres auteurs la définissent comme étant la quantité d'eau absorbée par le sol et par la plante par effet capillaire. Bruand et Coquet (2005) la définissent comme étant la borne supérieure de la Réserve en eau Utile RU. Lorsque la quantité d'eau contenue dans le sol se situe entre la saturation et la capacité

au champ, elle ne peut être considérée disponible pour les plantes car elle séjourne trop brièvement dans le substrat. Une des principales applications de la teneur en eau à capacité au champ concerne l'évaluation de la RU du sol pour l'alimentation hydrique des plantes. Notre objectif est d'estimer la teneur en eau à capacité au champ et de proposer une définition de son temps d'établissement.

Le concept de « capacité au champ », s'il demeure fort utile en agronomie et « parlant » en agriculture, n'est pas aisé traduire en valeur de potentiel matriciel. Aussi, plutôt que de tenter de normaliser le concept de capacité au champ et par la même réduire son champ d'application, les physiciens du sol préfèrent parler de « capacité de rétention » à un pF donné. Celui-ci peut varier de 1,5 à 2,5 selon les types de sol et le climat. Comme il n'y a pas d'accord sur la valeur à attribuer au pF équivalent à la capacité au champ, il convient d'être prudent quant à la généralisation d'une valeur particulière de pF (Bruand et Coquet, 2005).

La mesure de la capacité au champ s'effectue par la détermination de la teneur en eau lors de la phase de drainage (Fig. 3.6). La pente des courbes représentatives de l'évolution de ces paramètres présente en général un point de rupture, plus ou moins marqué, correspondant à la transition entre les phases de drainage rapide et drainage lent (Fig. 3.7) (Musy et Soutter, 1991). L'appareillage utilisé comporte les



FIGURE 3.6 – Essai de détermination de la teneur en eau à capacité au champ en réalisé sur un échantillon de substrat des parcelles argile expansé et stockage 60 mm. La figure de gauche représente l'insertion du substrat dans le cylindre. La figure du milieu représente les différents éléments utilisés pour l'expérience. La figure de droite représente l'essai en cours d'exécution

éléments suivants :

- un entonnoir, qui sert à diriger l'eau percolée du substrat vers le récipient (bêcher) en contrebas ;
- un cylindre, qui contient le substrat ;
- un film plastique, qui va empêcher les échanges avec l'extérieur (phénomènes d'évaporation) ;
- une balance, qui va mesurer la masse d'eau évacuée du substrat.

Afin d'être représentatif des conditions *in situ*, six répliquats ont été mis en place.

Détermination de la courbe $h(\theta)$ La courbe de rétention en eau a été obtenue dans un premier temps, en mesurant la teneur en eau à plusieurs potentiels de pression matricielle fixés en imposant des contraintes hydriques à l'aide de deux méthodes complémentaires, à savoir la méthode des presses à membrane (extractives) et la méthode par évaporation. En utilisant ces mesures et à l'aide de la méthode de Peters et Durner (2008). Nous avons utilisé le modèle de van Genuchten (1980) (Eq. 2.12) décrite

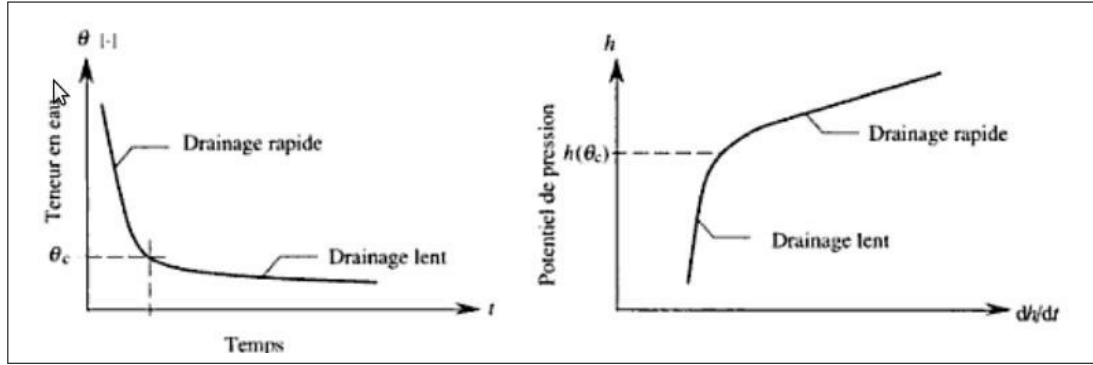


FIGURE 3.7 – Détermination de la teneur en eau à capacité au champ (Musy et Soutter, 1991).

dans le chapitre 2 combiné avec le modèle de Mualem (1976) pour déterminer et obtenir une expression analytique robuste du potentiel hydrique $h(\theta)$ comme fonction de la teneur en eau du substrat θ . Ces expressions sont utilisés dans les modèles d'écoulement hydriques des TV (Hiltner *et al.*, 2008; Palla *et al.*, 2009, 2012). Les paramètres du modèle sont obtenus à partir d'un algorithme de régression non linéaire.

Les mesures ont été effectuées sur des cylindres ayant un volume de 251 cm³ après mise à saturation des échantillons (méthode similaire à la détermination de la teneur en eau à saturation). Pour conserver un matériau homogène, l'ajout du substrat s'est fait par palier de 2 à 3 cm le long du cylindre pour obtenir une bonne représentation spatiale des grains. Dans le même temps, un contrôle de la densité apparente a été fait pour être en adéquation avec la densité apparente mesurée pour la détermination de la porosité.

- **Méthode des presses extractives** : Le dispositif que nous avons employé (Soil Moisture Equipment Corporation) pour la détermination de la courbe de rétention en eau du substrat permet d'appliquer des pressions allant de 10 à 1500 kPa (1,02 m à 153 m). Pour chaque valeur de la pression matricielle h , la teneur en eau de l'échantillon est mesurée. Le détail de la méthode des presses extractives est repris dans l'Annexe B.1.
- **Méthode par évaporation (Méthode de Wind)** : Ce protocole est basé sur la méthode d'évaporation simplifiée de Schindler (1980) et repris dans les travaux de Huot (2013). Il a été appliqué en utilisant le dispositif ku-pF (UGT) qui permet d'obtenir la courbe de rétention en eau $h(\theta)$ depuis la saturation jusqu'à une valeur de 100 kPa (10,2 m). La détermination se base sur la quantité d'eau évaporée par la face supérieure du cylindre exposée à l'air extérieur (évaporation) et le gradient de teneur en eau de l'échantillon. La description détaillée de cette méthode est faite dans l'Annexe B.1.

L'état hydrique d'un sol est défini par une teneur en eau et par la répartition de l'eau et de l'air au sein de la distribution en taille de pores. La rétention de l'eau dans les sols résulte à la fois des forces capillaires et des forces d'adsorption de la matrice solide. La courbe de rétention en eau $h(\theta)$ peut également être interprétée en terme de distribution de taille de pores par application de la loi de Jurin-Laplace, qui relie le potentiel de pression matricielle (h) au rayon de pore équivalent (r) selon la formule suivante :

$$h = \frac{-2\sigma \cos \varphi}{\rho_w g r} \quad (3.4)$$

où σ est la tension interfaciale liquide-vapeur (75·10⁻³ N·m⁻¹ de l'eau pure dans l'air à 20 °C), φ est

l'angle de raccordement de l'eau sur la paroi du pore, g est l'accélération de la pesanteur [m.s^{-2}], ρ_w est la masse volumique de l'eau [g.m^{-3}]. L'angle de raccordement ou de mouillabilité φ est en relation avec l'équilibre hydrophobe / hydrophile de la surface du sol.

L'application de la loi se fait en considérant à la fois que le matériau est rigide et qu'il présente des pores cylindriques parfaitement rectilignes et que l'angle de contact est nul (mouillabilité parfaite). Ces hypothèses fortes ne permettent d'avoir qu'une distribution approximative de la taille des pores. La distribution a été calculée à partir de l'équation donnée par van Genuchten (1980) :

$$\frac{d\theta}{d(\log h)} = (\ln 10)h \frac{d\theta}{dh} = 2,303 (\theta_S - \theta_r) \frac{m}{1-m} S_w \left(1 - S_w^{\frac{1}{m}}\right) \quad (3.5)$$

La nature des constituants du substrat (pouzzolane, matière organique et racines des plantes) peut engendrer un phénomène d'hydrophobicité. L'hydrophobicité des sols caractérise les interactions sol-eau-air, participe à la structuration des sols et à la circulation de l'eau par la création de chemins préférentiels (DeBano, 2000). En revanche, les interactions sol-eau-air sont totalement négligées dans la description du comportement physique des milieux granulaires du fait des distances importantes entre grains. Lorsque les matériaux granulaires sont constitués de particules de tailles et formes différentes (pouzzolane, tourbe et écorce), la proportion de chaque type de grains affecte l'arrangement des particules et ainsi les propriétés physiques et hydriques (densité, porosité et conductivité hydraulique) (Jones *et al.*, 2002).

Philip (1975) montre que le phénomène d'hydrophobicité crée un flux instable (ie : un flux préférentiel ou un gradient vertical de potentiel de pression) en opposition avec le flux gravitationnel. Différentes études ont mis en évidence la présence d'un tel flux dans les sols (Starr *et al.*, 1978; Pendexter et Furbish, 1991; Ritsema *et al.*, 1996, 1997, 1998). Afin de tenir compte de ce phénomène dans le transfert d'eau au sein du substrat, Nieber (1996) a développé une solution numérique basée sur la technique conventionnelle de Galerkin en éléments finis. Le système algébrique est dérivé avec une discrétisation implicite. Le système non linéaire est résolu avec la procédure modifiée de Picard. Nieber (1996) a adapté le modèle de van Genuchten (1980) en y incorporant la fonction de l'air sec présent dans le sol (ad) et la fonction d'air humide (y) (Eq. 3.6)

$$\theta = (\theta_S - \theta_j) \left(\frac{1}{1 + (\alpha_j h_c)^{n_j}} \right)^{1 - \frac{1}{n_j}} + \theta_j \quad j = d, y, ady \quad (3.6)$$

h_c est la pression capillaire [m], θ_{ady} est la teneur en eau de l'air-sec [$\text{L}^3.\text{L}^{-3}$] (cette eau provient de l'eau retenue par le sol), α_j [m^{-1}] et n_j [-] sont les paramètres de forme pour la fonction d'air sec ($j = d$), la fonction d'air humide ($j = y$) et la fonction commune air-sec-humide ($j = ady$).

Mesure de la conductivité hydraulique à saturation par la méthode de la charge constante

La valeur de conductivité hydraulique à saturation traduit la capacité d'un milieu poreux à transmettre l'eau, lorsqu'il est saturé, c'est-à-dire lorsque l'ensemble des pores est rempli d'eau. Le mode de représentation le plus explicite consiste à assimiler le réseau de pores à un ensemble de capillaires qui vont tous permettre à l'eau de s'écouler.

Le principe de la mesure est une application directe de la loi de Darcy (1856) pour un écoulement vertical d'un sol saturé. Le détail de la mesure de conductivité hydraulique à saturation est décrit en Annexe B.3 (Eq. 3.7) :

$$K_s = \frac{V \times L}{A \times \Delta t \times h} \quad (3.7)$$

K_s est la conductivité hydraulique à saturation [m.s^{-1}], V est le volume d'eau percolé [m^3], L est la longueur de la colonne de l'échantillon [m], A est la section de passage traversée par le flux d'eau [m^2], Δt est le temps de l'essai [s] et h est la différence de pression hydraulique [m]. Nous utilisons le dispositif

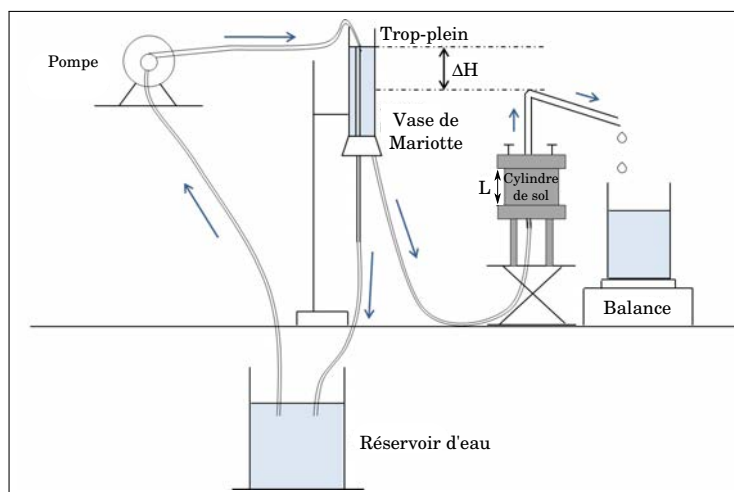


FIGURE 3.8 – Schéma du dispositif de mesure de la conductivité hydraulique à saturation K_s

du perméamètre à charge constante présent au LSE pour la mesure de la conductivité hydraulique K_s (Fig. 3.8) présenté en Annexe B.3.

L'ensemble des paramètres physiques et hydriques mesurés durant ces travaux de thèse est résumé dans la Table 3.1.

TABLE 3.1 – Récapitulatif des différentes mesures effectuées pour la détermination des paramètres physiques et hydriques avec la démarche employée, n représente le nombre de répétition

Paramètre	Méthode	Taille et conditionnement	Répétition	Échantillon
Texture/distribution granulométrique				
distribution granulométrique	fractionnement granulométrique		n=1	$S_0 - S_{30}$
Espace poral (volume et distribution)				
masse volumique apparente sèche (D_a)	méthode du cylindre	cylindres de substrat non perturbés frais de 251 cm^3	n=15	$S_0 - S_{30}$
masse volumique réelle (D_r)	pycnométrie	aliquote (petite fraction) de substrat sec des cylindres de 251 cm^3	n=15	$S_0 - S_{30}$
porosité (ϵ)	calcul à partir de D_a et D_r	cylindres de substrat 251 cm^3	n=15	$S_0 - S_{30}$
distribution de la porosité	exploitation de la courbe de rétention - protocole de Peters <i>et al.</i> (2011)			$S_0 - S_{30}$
Rétention en eau				
courbe de rétention en eau $h(\theta)$	presses à membranes (6 pressions successives) et séchage	cylindres de substrat 251 cm^3	n=3	S_0
courbe de rétention en eau $h(\theta)$	méthode du ku-pF (évaporation) + modélisation	cylindres de substrat 251 cm^3	n=3	S_0
Conductivité hydraulique				
conductivité hydraulique à saturation K_s	perméamètre à charge constante	cylindres de substrat 251 cm^3	n=6	S_0

3.3 Résultats et discussion

3.3.1 Le substrat

Conductivité hydraulique à saturation La valeur de conductivité hydraulique à saturation K_S pour le substrat à l'état initial (S_0) obtenue est de $1,8 \pm 0,2 \text{ mm.s}^{-1}$. Cette valeur est cohérente avec celle obtenue dans la littérature pour ce type de substrat ($2,3 \text{ mm.s}^{-1}$) (Vila *et al.*, 2012). Elle est cependant supérieure à la valeur renseignée par le fabricant ($1,0 \text{ mm.s}^{-1}$). La différence des dispositifs permettant la mesure de la conductivité hydraulique à saturation peut expliquer cet écart. La conductivité hydraulique à saturation reste tout de même très élevée. Ceci est caractéristique d'un drainage rapide. Dans le même temps, cette valeur est analogue à celles trouvées dans la littérature pour les sols de texture grossière, entre $0,2$ à 2 mm.s^{-1} . Musy et Soutter (1991) définissent la particularité d'un sol grossier comme étant perméable. En résumé, le substrat peut être décrit comme un milieu perméable.

Propriétés physiques Dans la Table 3.2, l'ensemble des propriétés relatives à la porosité et les densités réelle et apparente du substrat mis en œuvre dans les TV est reporté. La valeur expérimentale de la densité réelle du substrat à l'état initial (S_0) et après 30 mois d'utilisation (S_{30}) est respectivement de 2840 kg.m^{-3} , 2552 kg.m^{-3} pour la sous-couche supérieure du substrat et 2722 kg.m^{-3} pour la sous-couche inférieure du substrat. L'origine volcanique de la pouzzolane (composée de minéraux à forte densité) présente en grande quantité dans le substrat, influence fortement la densité. On note ainsi que la densité réelle du substrat est plus importante que celle d'un horizon profond de sol (à faible concentrations en matières organiques) qui est comprise entre 2600 et 2700 kg.m^{-3} . Ceci confirme bien la part importante de la fraction minérale de ce matériau (Wilson et Ding, 2007). La densité apparente du substrat S_0 et S_{30} (respectivement 750 et 830 kg.m^{-3}) mesurée est du même ordre de grandeur que celle donnée par le fabricant (851 kg.m^{-3}). Elle est aussi similaire à la densité apparente mesurée par Mesgouez *et al.* (2014) (822 kg.m^{-3}) pour un substrat ayant une composition similaire (60 % de pouzzolane et 40 % de tourbe). Cette densité classe le substrat parmi les sols les moins denses, voire même dans la catégorie des sols « tourbeux ». Ceci est notamment dû à la présence d'éléments organiques. Il en résulte, une porosité totale très élevée (72 %). En effet, pour la plupart des sols naturels, la porosité est comprise entre 30 et 60 % (Musy et Soutter, 1991). Cette grandeur est en accord avec la conductivité hydraulique à saturation qui est également élevée.

Certaines caractéristiques des propriétés physiques du substrat de la toiture végétalisée sont mises en évidence : i) une forte porosité indique un comportement comparable à un Histosol (tourbe) pour certains aspects, à un Andosols (sol volcanique) pour d'autres (Craig et Howes, 2007; Huot, 2013), ii) une importante réserve d'eau pour la plante et iii) une grande capacité de drainage en condition saturée.

Les comparaisons évoquées peuvent nous permettre de comprendre les caractéristiques du substrat. Ainsi, les Andosols sont caractérisés par une faible densité apparente et une forte microporosité (60 à 90 %) de la porosité totale due à une structure très fine (Baize et Girard, 2008). La porosité totale importante (75 à 95 %) de ces sols explique leur forte capacité de rétention en eau ainsi que leur sensibilité lors des périodes sèches. Le séchage peut entraîner des effets irréversibles sur les propriétés hydriques (perte de la capacité à retenir l'eau et augmentation de la conductivité hydraulique) en modifiant la porosité (Bartoli *et al.*, 2007). Les Histosols possèdent également une capacité de stockage de l'eau importante en relation avec leur très forte porosité (plus de 80 %) et leur faible masse volumique apparente (20 à 250 kg.m^{-3}) qui s'expliquent par une très forte abondance en matières organiques.

TABLE 3.2 – Porosité et densités apparente et réelle du substrat S_0 , S_{30} -haut (profondeur de substrat de 0-7 cm) et S_{30} -bas (profondeur de substrat de 7-14 cm); données fabricants.

Paramètres		Densité réelle D_r (kg m ⁻³)	Densité apparente D_a (kg m ⁻³)	Porosité ε (%)
Substrat	Fabricant	-	851 ± 23,4	67 ± 0,9
	Mesure (S_0)	2840 ± 22,6	800 ± 9,2	72 ± 1,0
	Mesure (S_{30} -haut)	2552 ± 15,3	749 ± 37,0	69 ± 1,3
	Mesure (S_{30} -bas)	2722 ± 118,9	829 ± 22,6	70 ± 0,5

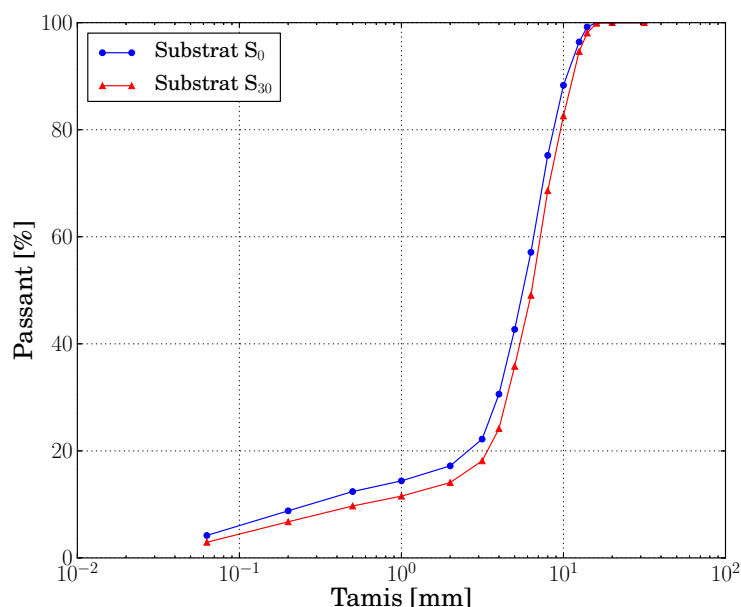


FIGURE 3.9 – Courbe granulométrique des deux substrats « initial » S_0 (ligne avec rond plein bleue) et « évolué » S_{30} (ligne continue avec triangle vers le haut rouge).

La contribution massique de chaque fraction a été évaluée pour les deux substrats S_0 et S_{30} entre 31,5 mm et 63 μ m. Les résultats sont présentés dans la Fig. 3.9. La première observation est la similarité entre les deux substrats (écart de 4 %). Après 30 mois d'exposition, il n'y a pas d'évolution texturale du substrat. Par ailleurs, les courbes témoignent d'une distribution irrégulière de la taille des particules et privilégiant une gamme spécifique de diamètre supérieure ou égale à 10 mm, qui représente une classe texturale « gravier » avec 78 % en proportion massique, cette valeur est similaire avec la donnée annoncée par le fabricant (80 %). La fraction fine tamisée qui correspond à la texture sableuse représente une proportion de 4,8 %. Les fraction argileuse représente 1,2 %. En résumé, d'un point de vue de la texture, le substrat se comporte comme un sol graveleux. Cette classification texturale a été appréciée à partir des résultats d'une distribution granulométrique en se basant sur la classification définie par l'United States Department of Agriculture (U.S.D.A., 1975).

Propriété hydrique - courbe de rétention Le résultat des mesures hydriques (méthode des presses extractives et d'évaporation) est représenté dans la Fig. 3.10. La comparaison des résultats des deux méthodes montre une complémentarité des points de mesures jusqu'à un potentiel de pression de 9 m. Nous avons pris deux matériaux comme référence, l'un sableux (ligne discontinue verte) et l'autre argileux (ligne discontinue pointée bleue) comme limite basse et haute du comportement hydrique que pourrait

avoir le substrat.

Les mesures de la méthode des presses extractives commencent à diverger des mesures issues de la méthode par évaporation à partir de 51 m de colonne d'eau, ce qui correspond à une pression de 5 bar. En comparant avec les valeurs de la méthode d'évaporation, la teneur en eau devrait être inférieure à ce potentiel de pression. L'origine de cette différence est probablement la présence d'eau dans les pores du matériau et un séjour dans les presses extractives limité à 3 jours. Solone *et al.* (2012) montrent que cette méthode est très bien adaptée pour les matériaux ayant une texture fine (sable et argile), alors qu'elle est moins adaptée pour les matériaux à forte taille de granulométrie pour les hautes pressions. Bruand *et al.* (1996) ont testé une gamme de sols avec différentes textures. Ils expliquent que sept jours sont en effet nécessaires pour que les matériaux atteignent l'équilibre quels que soient le potentiel matriciel et la composition des matériaux. Pour des échantillons de tailles supérieures (taille centimétrique), le temps de mise à l'équilibre serait donc plus long.

Nous avons ainsi fait le choix de baser la suite du travail uniquement sur les données issues de la méthode par évaporation. Les mesures à l'aide de la méthode d'évaporation ont conduit à des valeurs de

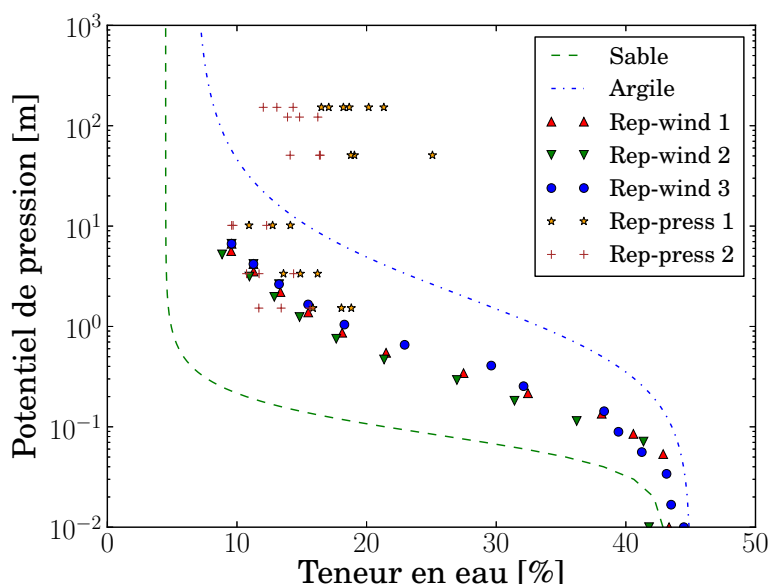


FIGURE 3.10 – Courbes de rétention en eau du substrat estimée à partir des mesures par la méthode d'évaporation ($ku-pF$) (rond bleu, triangle rouge et triangle inversé vert) et la méthode des presses extractives (étoile marron et plus orange); comparaison avec les courbes de rétention du sable (ligne discontinue tiret verte) et de l'argile (ligne discontinue tiret point bleue) tirée de (Schaap *et al.*, 2001) calculs réalisés à l'aide du logiciel ROSETTA

la teneur en eau et du potentiel de pression respectivement entre $0,09 \text{ m.m}^{-3}$ à $0,46 \text{ m.m}^{-3}$ et de $0,01 \text{ m}$ à 9 m . La courbe de rétention en eau moyenne déterminée pour le substrat de la toiture végétalisée dans l'état initial S_0 est présentée dans la Fig. 3.11. Elle a été générée par modélisation à partir de l'ensemble des données des trois réplicats en utilisant la méthode d'évaporation.

La comparaison des résultats avec des courbes obtenues sur des matériaux comme le sable et l'argile (Calvet, 2003) fait apparaître une teneur en eau à saturation du substrat du même ordre (43 à 45 %). La valeur pour le substrat S_0 est de 45,9 %. Elle est légèrement plus élevée que la valeur renseignée par le fabricant (43,2 %). Il existe une différence significative entre la porosité totale mesurée (72 %) et la

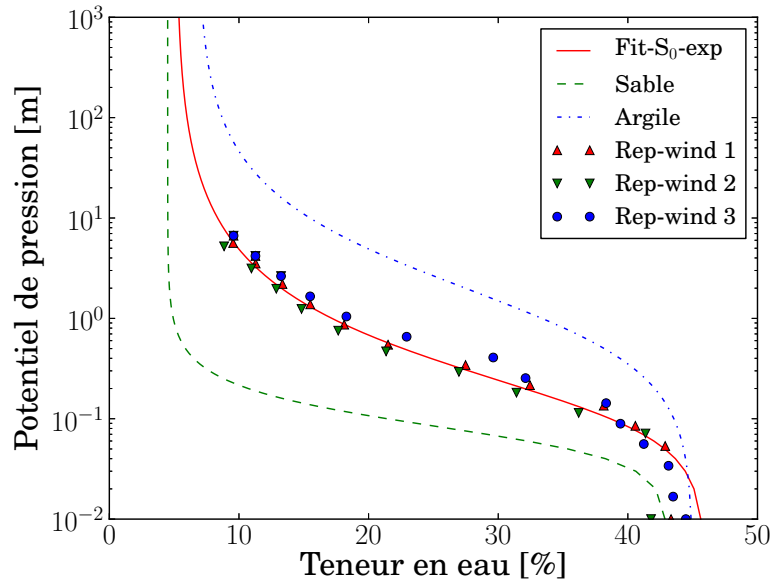


FIGURE 3.11 – Courbes de rétention en eau du substrat (ligne continue rouge) et paramètres de modélisation (θ_r , θ_S , α , n , K_S) estimée à partir des mesures par la méthode d'évaporation ($ku-pF$) (rond bleu, triangle rouge et triangle inversé vert); comparaison avec les courbes de rétention du sable (ligne discontinue tiret verte) et de l'argile (ligne discontinue tiret point bleue) tirée de (Schaap et al., 2001) calculs réalisés à l'aide du logiciel ROSETTA

teneur en eau à saturation. Cette différence (28 %) représente des macropores à drainage extrêmement rapide (de l'ordre de la seconde) ou des pores non connectés – non accessibles pour l'eau.

TABLE 3.3 – Paramètres hydriques modélisés du substrat estimés à partir des résultats de la méthode d'évaporation.⁽¹⁾ indique les paramètres hydriques du substrat déterminées à l'aide du logiciel ROSETTA (Schaap et al., 2001). ⁽²⁾ indique les paramètres hydriques issues de la littérature d'après Mesgouez et al. (2014).

Matériau	θ_r (% vol)	θ_s (% vol)	n (-)	α (m ⁻¹)	K_S (mm.s ⁻¹)
Substrat	5,1±0,1	45,9±2	1,5±0,2	8,0±2,0	2,1±0,5
Substrat ¹	3	51,2	1,4	6,4	12,4
Substrat ²	3,8	43,5	1,3	6,7	93,6

Les paramètres hydriques (θ_r , θ_S , α , n , K_S) requis par le modèle de van Genuchten (1980) sont listés dans la Table 3.3. Nous avons obtenu à l'aide du logiciel ROSETTA (Schaap *et al.*, 2001) les paramètres hydriques en utilisant les résultats de : densité apparente, la teneur en eau à capacité au champ et au point de flétrissement, le pourcentage de sable, d'argile et limon. Aussi, afin de comparer ces résultats à la littérature, Mesgouez *et al.* (2014) ont déterminé des paramètres hydriques pour un substrat contenant les mêmes composants, à savoir pouzzolane, un mélange de tourbe et d'écorces avec des proportions (60 % de pouzzolane et 40 % de tourbe). La comparaison révèle des valeurs similaires pour les paramètres de forme de la courbe de rétention (α et n). Il en va de même pour la teneur en eau à saturation, qui est similaire à celle déterminée par Mesgouez *et al.* (2014). Ces deux valeurs ont été déterminées par la mesure alors que celles obtenues à l'aide de ROSETTA sont une approximation. La valeur de la teneur en eau résiduelle est légèrement supérieure à la littérature. La valeur de ce paramètre est à prendre avec précaution sachant qu'il n'a pas réellement de sens physique. Peters *et al.* (2011) ont négligés l'importance de ce paramètre. Pour aller plus loin, Rossi et Nimmo (1994) vont jusqu'à l'annuler.

Enfin, la conductivité hydraulique à saturation est six fois inférieure à la valeur de Schaap *et al.* (2001) et trente-six fois inférieure à celle de Mesgouez *et al.* (2014). Les proportions de pouzzolane et de tourbe, ainsi que la granulométrie différentes peuvent expliquer cet écart important.

3.3.2 Les billes d'argile

Conductivité hydraulique à saturation La conductivité hydraulique à saturation K_S mesurée ($3,3 \text{ mm.s}^{-1}$) est trois fois plus faible que la donnée renseignée par le fabricant (10 mm.s^{-1}). La différence entre la mesure et la donnée renseignée peut être liée au fait que la technique de mesure au laboratoire n'est pas adaptée vu la taille des billes d'argile (10-20 mm) par rapport aux dimensions de la méthode de mesure de la conductivité hydraulique à saturation (Fig. 3.8). Reynolds *et al.* (2000) expliquent que la taille de l'échantillon doit être entre 5 et 10 cm pour que la méthode de la charge constante soit valide. Dano *et al.* (2006) expliquent qu'un ratio de 5 à 10 entre la taille du grain (billes d'argile) et la taille du dispositif de mesure (diamètre intérieur du cylindre) doit être utilisé. Dans notre cas ce ratio est de 5,4.

Propriétés physiques La densité réelle des billes d'argile mesurée (1982 kg.m^{-3}) est légèrement plus forte que celle renseignée par le fabricant (1529 kg.m^{-3}), qui elle-même supérieure à celle trouvée dans la littérature (1200 kg.m^{-3}) (Wever et van Leeuwen, 1995). La valeur de la densité apparente des billes d'argile mesurée (273 kg.m^{-3}) est légèrement plus élevée que la valeur renseignée par le fabricant (260 kg.m^{-3}) (Table 3.4). Ces deux valeurs sont plus faibles que celle relevée dans la littérature (280 kg.m^{-3}) (Musy et Soutter, 1991).

TABLE 3.4 – Porosité et densités apparente et réelle des billes d'argile ; données fabricants.

Paramètres		Densité réelle D_r (kg.m^{-3})	Densité apparente D_a (kg m^{-3})	Porosité ε (%)
Bille d'argile	Fabricant	$1529,41 \pm 100$	260 ± 50	$83 \pm 0,3$
	Mesure	$1982,4 \pm 66,2$	$273,8 \pm 27,4$	$86.2 \pm 1,8$

Ces différences sont essentiellement dues au mode de production des billes d'argile. Les fortes températures lors de la fabrication peuvent altérer la structure des billes d'argile et modifier leurs propriétés physiques (de Kreij *et al.*, 1995). Cette observation est confirmée par l'étude de Berretta *et al.* (2014), qui pour un matériau similaire observent une densité apparente faible et une porosité élevée. Cette faible densité et la présence de vides (macro-pores) entre les billes d'argile procurent une bonne aération et un bon drainage, d'où une conductivité hydraulique à saturation élevée (Vila *et al.*, 2012).

Paramètre hydrique - courbe de rétention en eau Des paragraphes précédents, nous avons vu que les billes d'argile ont une densité apparente faible et une forte porosité totale. Le résultat des mesures hydriques (méthode des presses extractives) est présenté dans la Fig. 3.12. Ce graphe montre clairement que le comportement des billes d'argile n'est pas similaire à un sol argileux. Aussi, des précédentes discussions, le protocole de détermination de la courbe de rétention en utilisant la méthode des presses extractives n'est pas adapté. Durant la campagne de caractérisation, nous n'avons pu réaliser la mesure avec la méthode d'évaporation pour compléter le graphe (pression de 0,01 à 1 m). Du fait de la dimension des cylindres de l'expérience qui n'est pas adaptée (diamètre de 60 mm) à la taille des billes d'argile (diamètre entre 10 à 20 mm). La courbe de rétention (Fig. 3.12) obtenue en utilisant la méthode des presses extractives n'a pas donné le résultat escompté. Berretta *et al.* (2014) sont arrivés à la même

conclusion dans leur étude. Pour cette raison, dans la suite de ce travail, nous utilisons les paramètres hydriques ($\theta_r=9\%$, $n=1,3$ et $\alpha=9,8\text{ m}^{-1}$) issus de la littérature (Maier *et al.*, 2009). Ce choix se base sur des propriétés physiques (granulométrie, densité apparente et réelle) identiques dans cette étude et est conforté par la même provenance des matériaux.

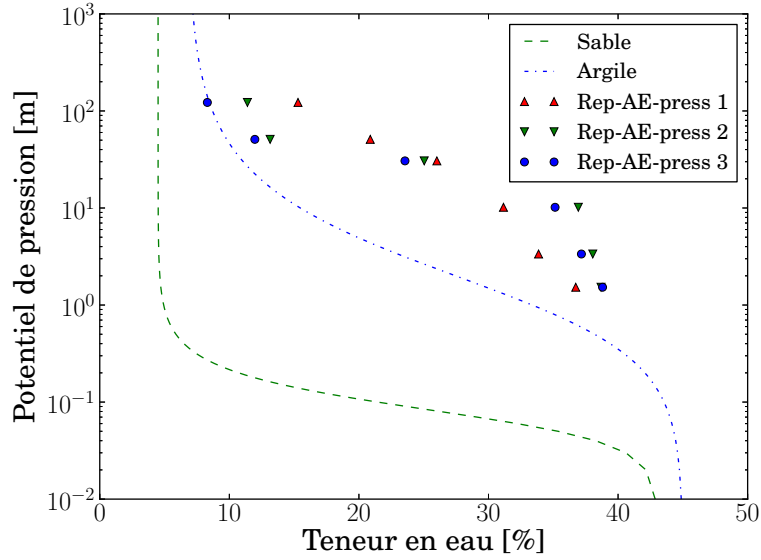


FIGURE 3.12 – Représentation des courbes de rétention de : l'argile issue de la littérature (ligne bleue discontinue), du sable (ligne verte discontinue) et le résultat des mesures de la méthode des presses extractives (rond bleu, triangle rouge et triangle inversé vert)

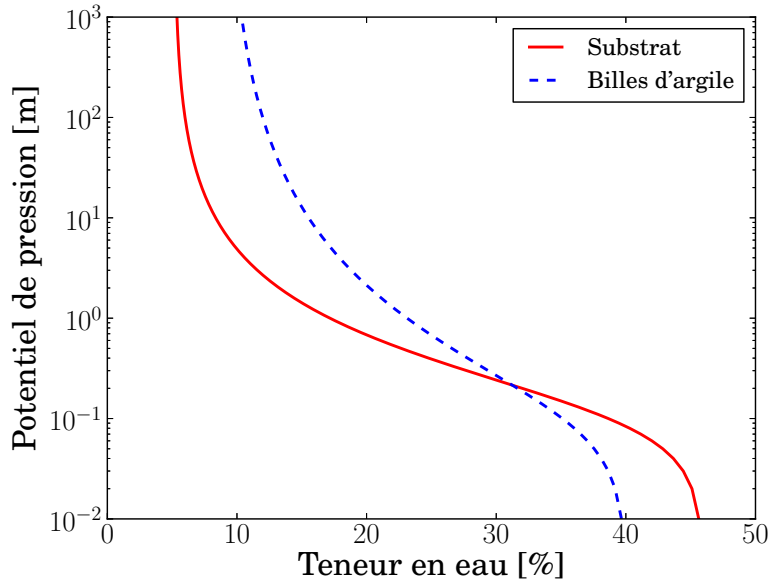


FIGURE 3.13 – Représentation des courbes de rétention de : l'argile issue de la littérature (ligne bleue discontinue) et du substrat (ligne continue rouge)

La Fig. 3.13 montre la courbe de rétention des billes d'argile (ligne discontinue bleue). Elle est basée sur les différents paramètres mesurés (K_S et θ_S) et tirées de la littérature (α et n) et la courbe de

rétenion du substrat S_0 précédemment décrite. La courbe de rétenion des billes d'argile ou argile expansé présente une courbure différente de celle du substrat. Nous comparons ces deux courbes pour estimer un comportement des billes d'argile (couche drainante au niveau de la parcelle AE décrite au paragraphe § 4.2.1. La valeur du paramètre n est plus faible que la valeur du paramètre n du substrat S_0 . Cette différence indique la présence de micro-pores. Ajouter à ce résultat, la porosité totale des billes d'argile est très élevée par rapport à celle du substrat. Même si la teneur en eau à saturation des billes d'argile est légèrement plus faible que celle du substrat, cela montre qu'il existe des pores encore non remplis par l'eau.

3.3.3 Le géotextile

Les propriétés physiques et hydriques des géotextiles ne sont pas prises en compte par la plupart des auteurs. Ils considèrent celui-ci comme une continuité de la couche de substrat (Bass et Baskaran, 2003; Palla *et al.*, 2009; She et Pang, 2010). La principale propriété du géotextile est d'empêcher le lessivage du substrat (Nigel Dunnet, 2008). Vu les caractéristiques géométriques du géotextile, seuls les propriétés physiques et quelques propriétés hydriques (K_S et θ_S) sont discutées.

Propriétés physiques Les données renseignées par le fabricant n'indiquent pas les propriétés physiques (densité apparente, densité réelle et porosité totale). La porosité élevée du géotextile (86 %) lui confère une grande capacité de stockage en eau. Afin de modéliser les transferts hydriques des TV, nous faisons l'hypothèse que le géotextile se comporte comme un milieu poreux avec des propriétés physiques. La densité réelle du géotextile mesurée est de 1325 kg.m^{-3} et sa densité apparente est de 185 kg.m^{-3} (Table 3.5). Selon cette hypothèse, le géotextile est assimilé à un milieu tourbeux et organique.

TABLE 3.5 – Porosité et densités apparente et réelle du géotextile ; données fabricants.

Paramètres		Densité réelle D_r (kg m^{-3})	Densité apparente D_a (kg m^{-3})	Porosité ε (%)
Géotextile	Fabricant Mesure	- $1325 \pm 9,0$	- $187 \pm 10,5$	- $86 \pm 0,1$

Propriétés hydriques - courbe de rétenion La conductivité hydraulique à saturation du géotextile ($2,2 \pm 0,3 \text{ mm.s}^{-1}$) est quasi similaire à celle renseignée par le fabricant (3 mm.s^{-1}). Le paramètre θ_S du géotextile a été déterminé par mesure de la teneur en eau à saturation (Table 3.6). Ainsi, le géotextile se classe parmi les milieux poreux très perméable (Klute et Dirksen, 1986) ce qu'il lui confère une propriété drainante. Ce résultat est en accord avec la définition des fonctions du géotextile.

La Table 3.6 résume les paramètres hydriques obtenues soit par la mesure laboratoire ou à travers la littérature.

TABLE 3.6 – Paramètres hydriques modélisés pour le substrat, géotextile et les billes d'argile (* désigne que les valeurs sont tirées de Maier et al. (2009))

Matériau	θ_r (% vol)	θ_s (% vol)	n (-)	α (m^{-1})	K_S (mm.s^{-1})
Substrat	$5,1 \pm 0,1$	$45,9 \pm 2$	$1,5 \pm 0,2$	$8,0 \pm 2,0$	$2,1 \pm 0,5$
Géotextile	$5,1 \pm 0,1$	$39,3 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,2$	$8,0 \pm 2,0$	$2,2 \pm 0,1$
Billes d'argile	$9,0^*$	$40,0 \pm 0,8$	$1,3^*$	$9,8^*$	$3,3 \pm 0,4$

3.3.4 Première évaluation des performances hydriques

TABLE 3.7 – Humidités caractéristiques des différents constituants des TV étudiée.

	Humidité à saturation (%)	Humidité à capacité au champ (%)	Humidité au point de flétrissement (%)
Substrat	45,9	18,7	9,0
Géotextile	39,0	-	-
Bille d'argile	40,0	24,2	11,4
Structure alvéolaire 40 mm	-	-	-
Structure alvéolaire 60 mm	-	-	-

TABLE 3.8 – Récapitulatif de la capacité de stockage en eau des différents constituants de la TV : capacité de stockage dans le substrat avec évacuation fermée, à capacité au champ, et la réserve utile.

		Capacité totale de stockage dans le substrat (évacuation fermée) (mm)	Capacité de stockage à l'équilibre dans le substrat (capacité au champ) (mm)	Réserve d'eau utile dans le substrat (mm)
Substrat		46,8	19,2	10,0
TV entière	avec billes d'argile	66,8	31,3	16,4
	avec Stock40	86,8	59,2	50
	avec Stock60	106,8	79,2	70

La Table 3.7 résume les humidités caractéristiques déterminées tout au long de la campagne de caractérisation qui sert à déterminer la capacité de stockage de substrat à saturation, à capacité au champ. La Table 3.8 montre que la capacité de stockage du substrat si le système de retenue d'eau (bouchons) est mis en place est de 46,8 mm. La réserve utile pour la plante est de 10 mm. Cette réserve est de 16,4 mm en présence de billes d'argile. En présence de structures alvéolaires, cette réserve utile est triplée voire quadruplée respectivement pour la parcelle Stock40 et Stock60. Cette quantité permet d'assurer l'alimentation hydrique des plantes. Cependant, une partie plus grande de l'eau pouvant être fortement retenue dans des pores de petite taille et se révéler non accessible aux plantes. En outre, la présence du géotextile pourrait être un obstacle à la pénétration et au développement des racines.

3.4 Conclusion partielle

Le substrat se caractérise par l'origine et les transformations (e.g. extraction, transport, mélange) des matériaux parents qui le constituent. Il présente des propriétés physiques et hydriques spécifiques : conductivité hydraulique élevée avec la présence d'une macroporosité à drainage très rapide, forte capacité de rétention en eau, densité apparente faible. Ces propriétés répondent très bien aux deux fonctions principales attendues pour le substrat à savoir un support de végétation léger et peu soumis au tassement. Par ailleurs, ces caractéristiques peuvent le rattacher à la fois aux sols volcaniques et aux sols de tourbe. Selon la World Reference Base (WRB) (IUSS, 2014), la TV est un « Isolatic Technosol (Andic, Drainic, Folic, Transportic) ». qui traduit : i) l'absence de contact avec des matériaux terreux ou une roche en place du fait de la position sur le toit et de la présence d'une géomembrane, ii) une concentration élevée en matières organiques (apportée par la tourbe), iii) des matériaux transportés par l'Homme (tourbe +

pouzzolane) et qui ne proviennent pas de l'altération d'une roche mère en place, iv) des sols développés sur des matériaux volcaniques, exprimant la présence de pouzzolane, v) la présence de drainant artificiel.

L'évolution des propriétés physiques du substrat et le colmatage du géotextile laisse à penser que ce Technosol (substrat+géotextile+drainage) pourrait connaître une évolution sensible de ses propriétés au cours du temps sous l'influence du climat et de la végétation (Bouzouidja *et al.*, 2014). En effet, de par le déséquilibre entre les matériaux parents des Technosols et leur environnement, une pédogenèse rapide et intense est fréquemment observée (Séré *et al.*, 2010; Huot *et al.*, 2013).

,

Étude expérimentale de l'hydrodynamique d'une TV

Sommaire

4.1	Introduction	62
4.2	Matériels et méthodes	62
4.2.1	Présentation des différents « profils » de TV	63
4.2.2	Description du dispositif expérimental de laboratoire	64
4.2.3	Description de la plateforme expérimentale du LRN à Tomblaine	67
4.3	Résultats et discussion	74
4.3.1	Évolution de la géométrie des TV à l'échelle du bâtiment	74
4.3.2	Étude hydrodynamique à l'échelle du laboratoire	76
4.3.3	Étude hydrodynamique à l'échelle du bâtiment	79
4.4	Conclusion partielle	93
4.4.1	Caractéristiques hydriques	93
4.4.2	Performances	94
4.4.3	Évolution des TV	95

« Ne tenez pour certain que ce qui est démontré. »

Isaac NEWTON

4.1 Introduction

Nos travaux sont fondés d'une part, sur des expériences en laboratoire, à échelle réduite avec un milieu poreux en conditions saturée et insaturée. D'autre part, des plateformes grandeur nature végétalisées à l'échelle *in situ* ont été installées sur le toit du site du LRN. Pour le dispositif à échelle réduite, le contrôle de différents paramètres est possible, ce qui permet une investigation fine des mécanismes fondamentaux. On peut ainsi évaluer le comportement des constituants de la TV au sein de cette dernière, leurs effets sur les performances hydriques en terme de capacité de rétention et de l'effet retard à l'évacuation.

Nous avons opté de travailler avec deux constituants de la TV (substrat et géotextile), donnant lieu à un système modèle destiné à étudier des processus de saturation/drainage, d'évaporation en milieu saturé et insaturé. À l'échelle du laboratoire, nous reproduisons divers événements pluvieux et des périodes sèches. À l'échelle *in situ*, nous réalisons un suivi et une analyse du comportement des parcelles entre 2011 et 2014. Cette étude est menée sur différentes périodes annuelles (chaudes et froides).

Dans ce chapitre, nous présentons le résultat des investigations expérimentales de ces deux dispositifs.

4.2 Matériels et méthodes

Le LRN s'est équipé en octobre 2010, d'un ensemble de parcelles expérimentales de toitures végétalisées extensives de 600 m² composée de neuf parcelles (Fig. 4.1). Les toits sont plats et conformes à la norme DTU 43-1 relative aux toitures terrasses et toitures inclinées. Ils sont constitués d'éléments porteurs en béton et en aggloméré. L'installation de ces TV résulte d'un financement par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, avec le soutien des entreprises Nidaplast, Végétoit¹ et Falienor². Seules quatre parcelles sont étudiées : la parcelle Stockage 60 mm (Stock60), la parcelle 40 mm (Stock40), la parcelle Argile expansé (AE) et la parcelle gravier (GR).

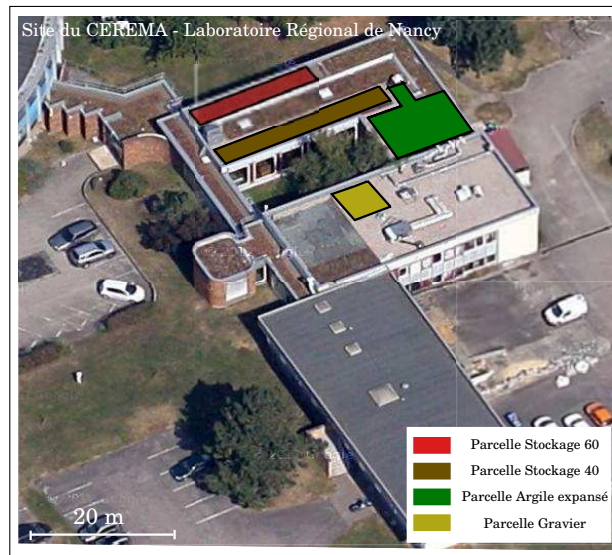


FIGURE 4.1 – Implantation des parcelles expérimentales sur les toits des bâtiments du Laboratoire Régional de Nancy (LRN).

¹<http://www.vegetoit.com>

²<http://www.falienor.com>

4.2.1 Présentation des différents « profils » de TV

Description des parcelles

- La parcelle argile expansé (AE) étudiée possède une surface de 75 m^2 . Elle est végétalisée avec du sedum, qui a la particularité d'être résistant aux conditions de sécheresse et possède une forte capacité d'adaptation pour des conditions de croissance difficiles. L'épaisseur du complexe (substrat) est de 10 cm et la hauteur de la végétation est de 15 cm. La parcelle est composée d'une structure drainante en billes d'argile (argile expansé) d'une épaisseur de 5 cm. La capacité de rétention en eau de la parcelle, à capacité maximale en eau (CME), est de $24,42 \text{ l.m}^{-2}$ pour le substrat seul et à 35 l.m^{-2} en ajoutant la capacité de rétention des billes d'argile. Le poids indicatif du complexe à saturation est de $160,7 \text{ kg.m}^{-2}$. La Fig. 4.2 présente la structure en coupe de la parcelle.

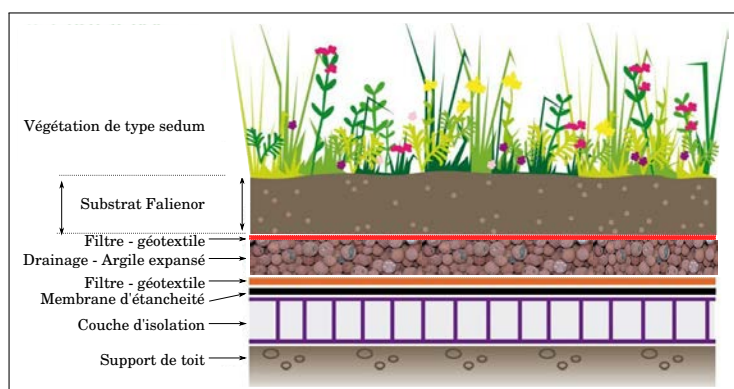


FIGURE 4.2 – Représentation en coupe de la toiture végétalisée (parcelle argile expansé).

- La parcelle Stockage 60 mm (Stock60) possède une surface de 28 m^2 . Elle est associée à la présence d'une structure alvéolaire d'une épaisseur de 60 mm (Nidaroo®60, NIDAPLAST) ayant une double fonction de drainage et de stockage d'eau. Tout comme la parcelle AE, la parcelle Stock60 est mise en œuvre avec une végétation de type sedum d'une hauteur de 15 cm. L'épaisseur du substrat est de 10 cm. Le poids indicatif du complexe est de $133,6 \text{ kg.m}^{-2}$. La capacité maximale de rétention en eau est de $30,81 \text{ l.m}^{-2}$ pour le substrat seul et de 90 l.m^{-2} en ajoutant la capacité de rétention de la structure alvéolaire. La Fig. 4.3 décrit la composition de la parcelle Stock60.

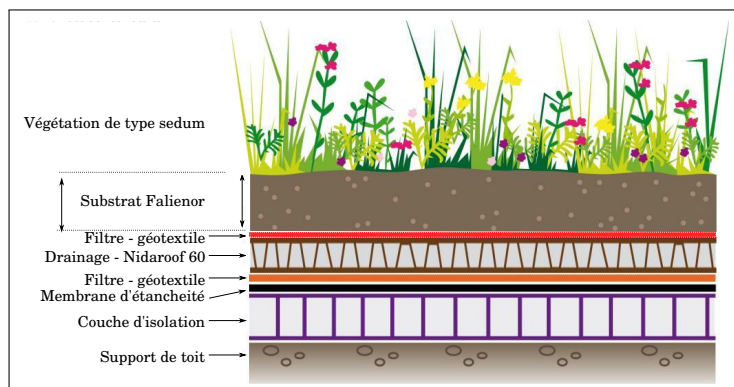


FIGURE 4.3 – Représentation en coupe de la toiture végétalisée (parcelle Stockage 60)

- La parcelle Stockage 40 mm (Stock40) étudiée possède une surface de 36 m^2 . Elle est quasiment similaire à la parcelle décrite précédemment avec la présence d'une structure alvéolaire (Nidaroo[®]40, NIDAPLAST). Cette dernière est mise en œuvre avec le même sedum d'une hauteur de 15 cm. L'épaisseur du substrat est de 10 cm. Le poids indicatif du complexe est alors de $110,3 \text{ kg.m}^{-2}$. La capacité maximale de rétention en eau est de $25,5 \text{ l.m}^{-2}$ pour le substrat seul et de $65,5 \text{ l.m}^{-2}$ en ajoutant la structure alvéolaire. La Fig. 4.4 présente la composition de la parcelle Stock40.

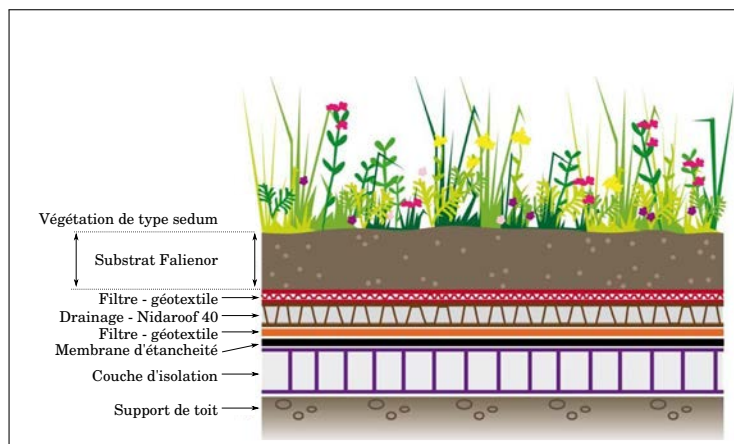


FIGURE 4.4 – Représentation en coupe de la toiture végétalisée (parcelle Stockage 40)

- La parcelle gravier (GR) possède une surface 64 m^2 . Elle est composée d'une seule couche de gravier d'une épaisseur de 5 cm et d'un poids indicatif à saturation de 130 kg.m^{-2} . La Fig. 4.5 présente la composition de la parcelle Gravier.

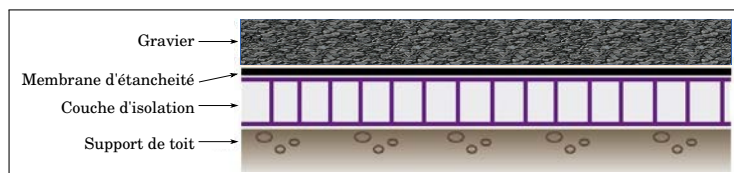


FIGURE 4.5 – Représentation en coupe de la toiture végétalisée (parcelle Gravier)

Ces structures sont conformes aux règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées édictées en 2007 par la CSFE³ en partenariat avec l'Adivet⁴, l'UNEP⁵ et le SNPPA⁶ (ADIVET, 2007). La nature et la provenance de chaque constituant des toitures est détaillée dans (Table 4.1).

4.2.2 Description du dispositif expérimental de laboratoire

Dans le but de faciliter l'analyse des performances hydrologiques à l'échelle *in situ* de la toiture végétalisée, un dispositif expérimental en laboratoire a été conçu afin de modéliser dans des conditions contrôlées les processus hydriques (précipitation, évacuation et évaporation) qui se produisent sur une toiture grandeur nature.

³Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité

⁴Association française des toitures et façades végétales

⁵Union nationale des entreprises du paysage

⁶Syndicat National du profilage des produits plats en acier

TABLE 4.1 – Caractéristiques des différentes couches des parcelles de la TV

Couche	Épaisseur (mm)	Nature	Caractéristiques techniques	Dénomination commerciale
Végétation classique	30 à 200	Sedum principalement	Sedum album, sedum spurium, sedum reflexum arux angelina, sedum sexangulare, sedum floriferum,	Végétoit
Substrat Classique	100	Tourbe, écorces, pouzzolane	60% pouzzolane 7/15, 20% pouzzolane 3/6, 10% tourbe blonde balte B1, 10% écorce de pin maritime ; densité apparente $851,1 \pm 23,4 \text{ kg.m}^{-3}$; porosité totale $67,9 \pm 0,9$ (%.vol) ; conductivité hydraulique à saturation $1,07.10^{-3} \pm 6,33.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$	Falienor - Terreaux de France, Falienor1
Filtre	1,7	Géotextile	polyester non-tissé 200 g.m^{-2} , conductivité hydraulique à saturation $= 3.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$	Siplast, Gravifiltre
Drainage (Parcelle Argile expansée)	50	Argile expansée	densité apparente $275 \pm 15\%$ kg.m^{-3} , conductivité thermique $< 0,11 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Saint-Gobain, Leca10
Drainage (Parcelle Stock60mm-Stock40mm)	40-60	Polypropylène	densité apparente 35 kg.m^{-3} , Taux de vide 95%, Résistance en compression vide 0,3 Mpa	Nidaplast, Stock60, Stock40
Étanchéité	3	Géotextile	armature en polyester non tissé (200 g.m^{-2}) paillettes d'ardoises, film thermo fusible	Soprema, Sopralène jardin
Pare vapeur	3	goudron	deux faces de pare vapeur protégées par un film thermo fusible armature en polyester non tissé et de bitume élastomère (180 g.m^{-2})	Soprema, Sopralène Flam 180
Complexe Isolant	60	mousse de poly-isocyanurate rigide	densité $> 30 \text{ kg.m}^{-3}$, parementé d'un revêtement aluminium (0,05mm)	RECTICIEL SAS, Powerline

Dispositif de Saturation/Drainage Le premier dispositif dénommé « Saturation/Drainage » (S/D) est représenté sur la Fig. 4.6. Ce dispositif est situé au LSE. Cette expérience est inspirée du principe des lysimètres. Ceux-ci sont classiquement utilisés pour estimer l'évapotranspiration d'un sol par pesée de l'eau percolée en fonction de la pluviométrie (De Backer *et al.*, 1983). Ce dispositif est fabriqué avec du plexiglass de 10 mm d'épaisseur, les caractéristiques géométriques sont $400 \times 400 \times 500$ (L $\times$ l $\times$ h, en [mm]). Les différentes couches du dispositif sont de haut en bas :

- le « simulateur de pluie » construit à l'aide d'un bac contenant une couche de 5 cm de sable (0,4 - 0,8 mm, Sibelco, Hostun, France) tamisé entre 200 μm et 350 μm , c'est la condition à la limite « haute »,
- la couche de substrat, d'une épaisseur de 140 mm. Ce substrat est fourni par la société Falienor, France,
- un film géotextile d'une épaisseur de 1,7 mm, qui sépare le substrat du support qui se trouve en dessous. Le géotextile a aussi une fonction de rétention des particules de substrat pour empêcher son lessivage,
- une structure alvéolaire d'une épaisseur de 60 mm qui est utilisée comme support de la couche de substrat,

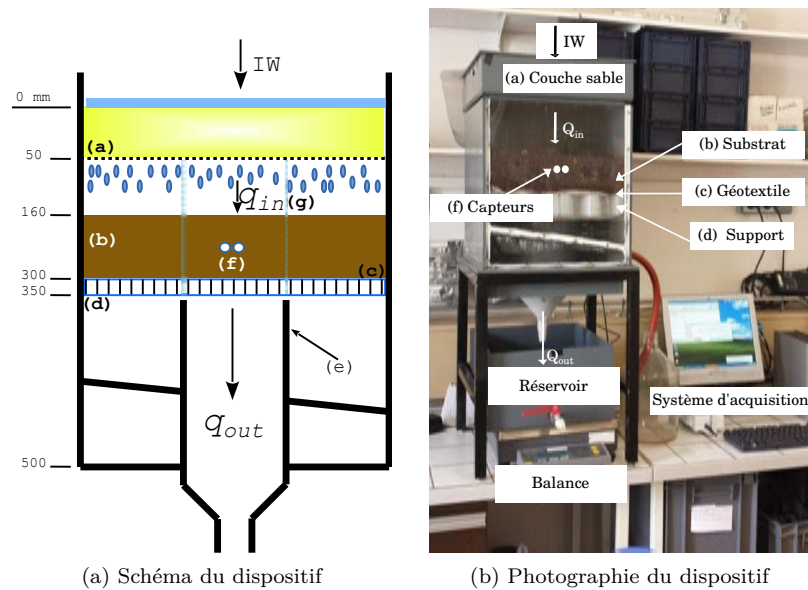


FIGURE 4.6 – Dispositif de saturation/drainage. (a) la couche de sable (homogénéisation de l'injection en eau à la surface du substrat), (b) la couche de substrat de 140 mm d'épaisseur, (c) la couche de géotextile, (d) la couche de support qui retient le substrat, (e) le collecteur, (f) les deux sondes de teneur en eau, placées à 50 mm et 125 mm par rapport à la surface du substrat et (g) le cylindre fictif pour le calcul du volume d'eau le traversant. IW la quantité d'eau injectée sur la couche de sable (simulateur de pluie), q_{in} et q_{out} sont respectivement les quantités entrantes et sortantes.

- un tube collecteur d'un diamètre de 200 mm de forme cylindrique au centre du dispositif afin de récupérer l'eau évacuée du substrat,
- un récipient pour la collecte des eaux évacuées du dispositif (voir Fig. 4.6).

Le mode opératoire est décrit en Annexe B.4. L'expérience de « Saturation/Drainage » utilise les techniques de mesure suivantes :

- une sonde de teneur en eau capacitive précédemment calibrée (Annexe C.2) pour le substrat étudié (fab : Decagon devices, 5TM). Les sondes ont été placées horizontalement pour valider la même teneur en eau au centre du dispositif et aux frontières latérales (phénomène de bord). Les spécifications du fabricant indiquent une gamme de mesure de 0 % à 100 % avec une précision de 2 %, compte-tenu du faible champ d'action de la sonde et vu la faible épaisseur du substrat (<15 cm), il ne nous pas semblé pertinent de la placer en position verticale,
- une balance connectée à un ordinateur (fab : Avery Weigh Tronix), utilisable dans le domaine : 0-25 kg avec une précision de 1 g.

Plusieurs auteurs ont étudié des dispositifs similaires sous l'influence de pluies réalistes (une intensité de pluie moyenne de 8 mm.h^{-1} et des précipitations totales de 17 mm sur 24 h) (Buccola et Spolek, 2011; Bond et Thompson, 2013). La Table 4.2 résume les instants où les quantités d'eau ont été injectées.

TABLE 4.2 – Caractéristiques hydrologiques des événements pluvieux et quantité d'eau sortante du dispositif expérimental saturation/drainage

Événement [min]	Pluviométrie [l.m^{-2}]	Quantité d'eau sortante [l.m^{-2}]
0	0	0
5	8	0
15	8	0
25	8	0
35	11	0
45	8	6
45 à 120	0	0

4.2.3 Description de la plateforme expérimentale du LRN à Tomblaine

La plateforme expérimentale « *in situ* » est localisée à Tomblaine (54), à l'Est de la ville de Nancy. Les parcelles ont été installées sur plusieurs bâtiments de mi-hauteur (≈ 6 m). Le climat sur le site expérimental est de type océanique dégradé à influence continentale marquée. Les précipitations moyennes sont de 763 mm par an, avec 31 jours par an de neige. La température moyenne est de 10°C avec une forte amplitude de variations entre l'été et l'hiver⁷.

Mesure des variables météorologiques La campagne expérimentale concernant la mesure des variables météorologiques a eu lieu du 01/07/2011 au 30/06/2014 sur la toiture du site. Deux stations météorologiques ont été installées. La première au niveau du complexe végétal à une hauteur de 20 cm au-dessous du sol pour la station météorologique compacte (Fig. 4.7). La seconde à une hauteur plus importante de (1,5 m), c'est la station météorologique de référence (Fig. 4.8). Les données micro-climatiques du site (température de l'air, le rayonnement incident de courtes et de grandes longueurs d'onde, humidité relative et vitesse du vent) sont mesurées et enregistrées avec un pas de temps de 15 min.

La station météorologique « basse » représentée sur la Fig. 4.7 enregistre quatre variables météorologiques : i) la vitesse de l'air par anémométrie, pour des valeurs comprises entre 0 et 60 m.s^{-1} avec une précision de $\pm 5\%$; ii) la direction du vent avec une précision de 1° ; iii) la température de l'air de -20 à 80°C avec une précision de $0,2^\circ\text{C}$; iv) l'humidité relative de l'air (de 0 à 100 %, avec une précision de $\pm 2\%$).

La pluviométrie est déterminée à l'aide d'un capteur radar Doppler 24 Ghz (Lufft, réf. R2S) (Fig. 4.9) qui peut évaluer la quantité et l'intensité de l'hydrométéore entre 0 à $55,56 \text{ m.s}^{-1}$ et ce pour une résolution allant jusqu'à $0,01 \text{ mm.m}^{-2}$. La station météorologique « haute » (Fig. 4.8) a été fabriquée en collaboration entre l'IFSTTAR et la société A3IP. Elle enregistre quatre variables météorologiques : i) la vitesse de l'air, comprise entre 0 et 60 m.s^{-1} avec une précision de $\pm 5\%$; ii) le rayonnement net à l'aide d'un pyranomètre solaire fabriqué par Davis Instruments (Le Vantage Pro2), les flux thermiques sont mesurés de 0 à 1800 W.m^{-2} avec une précision de 5 % et une dérive de $\pm 2\%$ par an ; iii) la température de l'air de -20 à 80°C avec une précision de $0,2^\circ\text{C}$; iv) l'humidité relative de l'air (de 0 à 100 %, avec une précision de 2 %).

En parallèle, un abonnement a été souscrit auprès de Météo France. Le point de mesure est situé à 200 m du laboratoire régional de Nancy et permet de collecter des données sur la vitesse du vent, la température, l'insolation, le rayonnement global ou encore une valeur d'évapotranspiration calculée à

⁷données météo-france de l'année 2012 pour le département Meurthe-et-Moselle

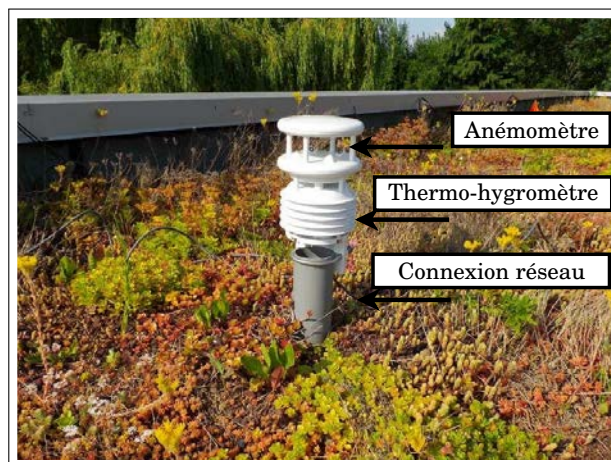


FIGURE 4.7 – Photographie de la station météorologique « basse » installée sur l'ensemble des parcelles de la toiture végétalisée.

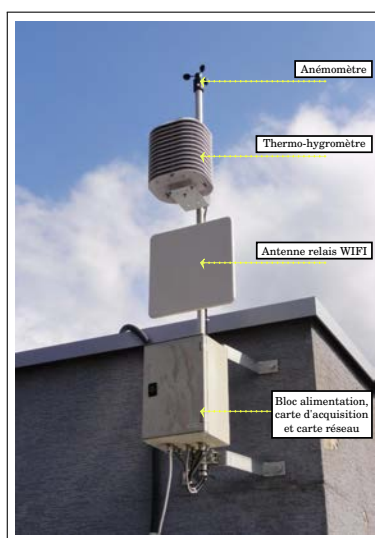


FIGURE 4.8 – Photographie de la station météorologique de référence installée sur le toit du Laboratoire Régional de Nancy.

partir d'un modèle météorologique. Certaines de ces données sont utilisées dans le cadre de ces travaux. En outre, des données pluviométriques locales sont également disponibles au pas de temps horaire. Afin de compléter le bilan thermique qui servira au calcul de l'effet évapotranspiratoire de la végétation, un capteur radiatif (CNR 4, Kipp & Zonen) pour la mesure du rayonnement incident grandes (GLO) et courtes longueurs d'ondes (CLO) ainsi que le rayonnement réfléchis grandes et courtes longueurs d'ondes par la toiture végétalisée a été installé (Fig. 4.10). Ce capteur comprend deux pyranomètres et deux pyrghéomètres. L'utilisation de ce capteur permet d'une part, de compléter le bilan thermique mais d'autre part de calculer l'albédo de la toiture par le rapport du flux radiatif incident sur le flux radiatif réfléchi. La toiture est par nature soumise à des conditions météorologiques différentes du fait de sa hauteur par rapport à la base du bâtiment (≈ 7 m). Afin de mesurer et de vérifier l'influence du vent sur la toiture végétalisée, une série de capteur a été installée à différentes hauteurs. D'abord à 2 m par rapport à la surface de la toiture végétalisée (Fig. 4.11). À 1,5 m représentée par la station météo de référence (Fig. 4.8) et à 0,2 m représentée par la station météorologique compacte (Fig. 4.7).



FIGURE 4.9 – Photographie du pluviomètre installé sur la toiture végétalisée.



FIGURE 4.10 – Photographie du radiomètre CNR4 installé sur le toit du Laboratoire Régional de Nancy pour la mesure du rayonnement incident et réfléchi.



FIGURE 4.11 – Photographie du capteur WS200-UMB installé sur le toit du Laboratoire Régional de Nancy pour la mesure de la vitesse et direction du vent à 2 m par rapport à la surface de la toiture végétalisée.

Mesure des variables internes à la toiture La mesure de la teneur en eau volumétrique est réalisée, pour chaque modalité, à l'aide de deux sondes TDR (Time Domain Reflectometry). Elles sont disposées à deux emplacements de la toiture – l'un proche de l'exutoire, l'autre proche du point haut – et placées à 6 cm de profondeur. Elles permettent une mesure de teneurs en eau comprises variant de 0 et 100 % avec une précision de 2 %. Les capteurs ont été calibrés sur un échantillon de substrat ; le détail de cette calibration est décrit en Annexe C.2. Deux autres sondes, celles-ci capacitatives, sont installées aux mêmes emplacements que les sondes TDR. Ces équii-tensiomètres (Decagon Devices) permettent la mesure du

potentiel matriciel du substrat à partir de la mesure de la permittivité électrique. Elles se distinguent par une plage de mesure allant de -10 kPa à -500 kPa avec une précision de 1 kPa (dans la gamme -10 à -100 kPa) et 4 kPa (dans la gamme -100 à -500 kPa) (Bouzoudja *et al.*, 2013). Des capteurs de

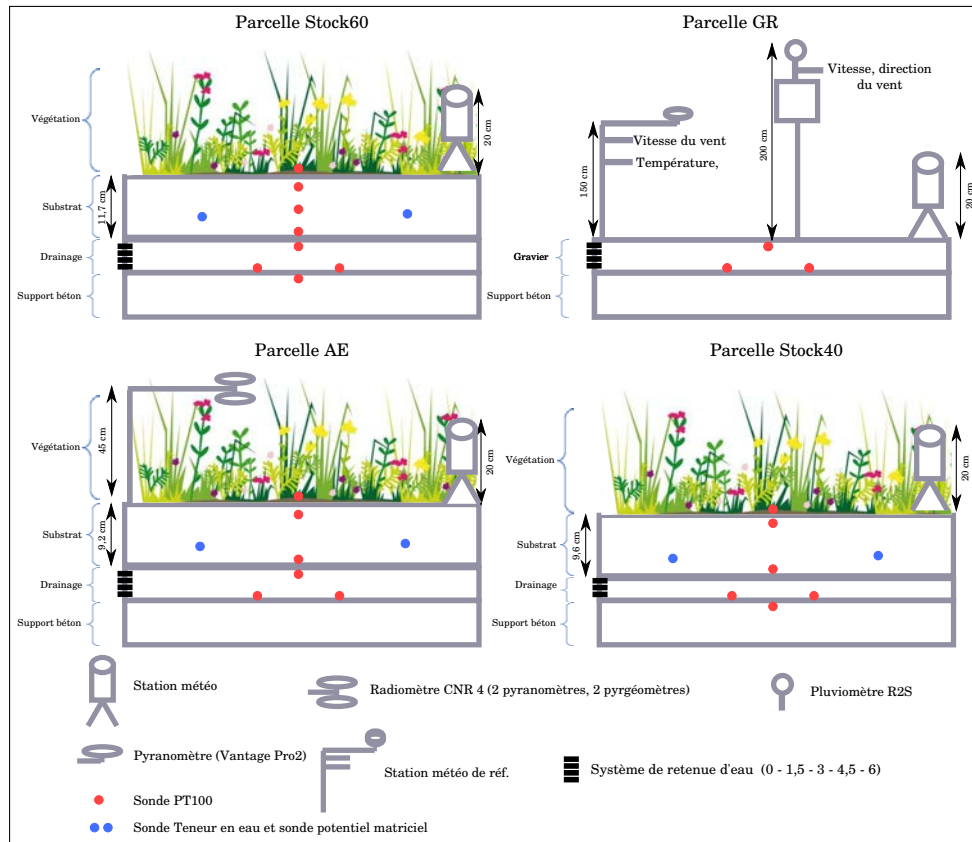


FIGURE 4.12 – Disposition des différents capteurs sur les différentes parcelles étudiées (Stock60, Stock40, AE et GR)

températures ont également été installés sur chaque modalité (Fig. 4.12). Les capteurs de températures sont des sondes platines de types PT100 classe A. Elles possèdent une gamme de mesure de -40 à 100 °C avec une précision de $0,4$ °C. Afin d'effectuer la mesure du profil de température sur les différentes couches des parcelles étudiées, une série de capteurs a été installée à différentes profondeurs. Selon la parcelle, ce nombre varie de 3 pour la parcelle GR à 8 pour la parcelle S60.

Les données de l'ensemble des capteurs (mesures internes et externes) sont acquises en continu sur un ordinateur portable au pas de temps régulier de 15 min. Les données sont enregistrées depuis juillet 2011. L'Annexe C décrit plus en détail le système d'acquisition, la calibration des sondes et leurs installations.

Afin de compléter le bilan hydrique des parcelles de toitures végétalisées – c'est-à-dire la mesure ou l'évaluation des flux et du stockage d'eau dans les toitures – chaque modalité est équipée d'un système débitmétrique à auget par bascule d'un volume de 3l qui permet de mesurer les débits sortants (Fig. 4.13). Dès que le volume d'eau de 3l est atteint, le réservoir bascule, actionnant un contact sur un interrupteur à lame souple. En comptant le nombre de basculements, et le temps entre chaque, nous obtenons un flux évacué. En complément du débitmètre à auget basculant, un système de retenue d'eau est présent sur la toiture. Il est constitué de différentes hauteurs qui peuvent être réglées à l'aide de bouchons (Fig. 4.14). Sur l'ensemble de la durée de l'étude, c'est-à-dire du 01/07/2011 au 30/06/2014, il

Il y a différentes périodes où le système de régulation de la hauteur d'eau a été utilisé. La Table 4.3 et Table 4.4 donnent la hauteur des bouchons et les périodes d'utilisation en nombre de jours et suivant les saisons des systèmes de régulation en eau. La Table 4.5 regroupe l'ensemble des caractéristiques des

TABLE 4.3 – Récapitulatif des périodes de régulation de la hauteur d'eau à l'exutoire sur la toiture végétalisée

Date (jj/mm/aaaa)	Durée (jours)	Hauteur (mm)
01/07/2011 au 08/08/2011	38	30
08/08/2011 au 28/10/2011	81	15
28/10/2011 au 14/12/2011	47	30
14/12/2011 au 21/12/2011	07	15
21/12/2011 au 18/02/2013	425	0
18/02/2013 au 02/01/2014	318	60
02/01/2014 au 30/06/2014	179	0

TABLE 4.4 – Récapitulatif des périodes de régulation de la hauteur d'eau à l'exutoire sur la toiture végétalisée. Les cases bleues représentent une hauteur de bouchons nulle, les cases vertes représentent une hauteur de bouchons à 15 mm, les cases rouges représentent une hauteur de bouchons à 30 mm, les cases jaunes représentent une hauteur de bouchons à 45 mm et les cases oranges représentent une hauteur de bouchons à 60 mm.

	Hauteur bouchons [mm]			
	2011	2012	2013	2014
printemps	0	0	60	0
été	30	0	60	0
automne	15	0	60	0
hiver	30	0	60	0



FIGURE 4.13 – Photographie du débitmètre à auget pour la mesure de la quantité d'eau sortante de chaque parcelle (Stock60, Stock40, AE et GR) à la base de chaque exutoire.

capteurs utilisés dans l'étude.

Détermination du profil de teneur en eau La détermination du comportement hydrique du substrat passe par la détermination du profil de teneur en eau sur l'ensemble de la couche de substrat.



FIGURE 4.14 – Régulation de la hauteur d'eau par système de bouchons.

TABLE 4.5 – Récapitulatif du matériel installé sur la toiture végétalisée

Nbre.	Variable	Type de capteur	Précision du capteur
24	Température (°C)	PT100, classe A	$\pm 0,2$ °C
6	Teneur en eau substrat (%.vol)	TDR - 5TM	± 2 %.vol
6	Pression matricielle (KPa)	équi-tensiomètres MPS-1	1 KPa à 4 KPa
4	Humidité relative air ext., HR (%)	Lufft WS501-UMB	± 2 %
6	Vitesse du vent, ω (m.s ⁻¹)	Lufft WS501-UMB, WS200-UMB	± 5 %
5	Direction du vent, γ (°)	Lufft WS501-UMB, WS200-UMB	± 3 °
2	Flux GLO radiatif incident (W.m ⁻²)	Kipp & Zonen - Le Vantage Pro2	± 5 %
2	Flux CLO radiatif réfléchi (W.m ⁻²)	Kipp & Zonen	± 3 %

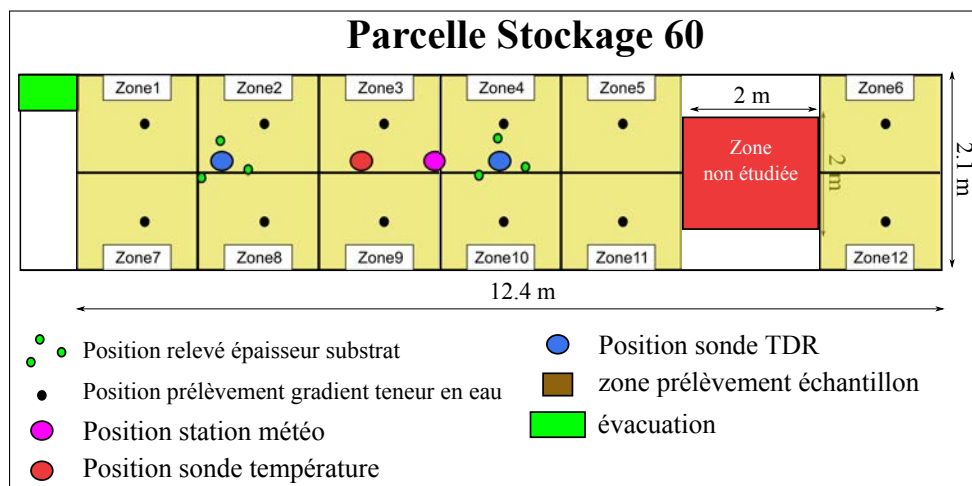


FIGURE 4.15 – Implantation des zones de prélèvement du substrat sur la parcelle Stock60 pour la détermination du profil de teneur en eau.

Afin de déterminer le profil de teneur en eau (conditions *in situ*), un prélèvement a été effectué de

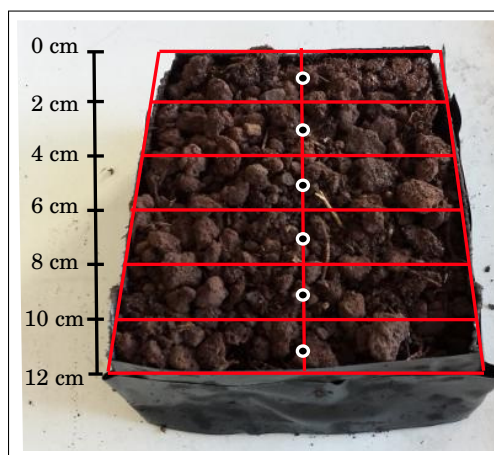


FIGURE 4.16 – Coupe du substrat de la parcelle Stock60 présentant les sous couches pour la détermination du profil de teneur en eau.

12 échantillons d'une masse allant de 1,5 à 2 kg. Pour garantir des conditions opératoires optimales, c'est-à-dire pour ne pas avoir l'ensemble du profil saturé ou à un niveau de sécheresse avancé ; les conditions climatiques suivantes ont été choisies : i) une température pas trop élevée ($14,7^{\circ}\text{C}$), ii) un ensoleillement qui favorise l'évaporation de l'eau, iii) une période de précipitation antérieure pour garantir la présence d'eau dans le substrat. La Fig. 4.15 montre le découpage qui a été effectué pour le prélèvement des échantillons de substrat pour la détermination du profil de teneur en eau. Une mesure d'humidité est réalisée sur chaque sous-échantillon d'épaisseur de 2 cm (Fig. 4.16). Ces sous-échantillons sont suffisamment épais et répartis pour représenter l'humidité le long du profil (Fig. 4.16). La teneur en eau volumique a été déterminée par séchage des sous-échantillons de substrat à l'étuve à 105°C pendant 24 h.

Distribution et développement des racines L'observation de l'enracinement repose sur la méthode de cartographie *in situ*, notamment décrite par Tardieu et Manichon (1986). Elle consiste à repérer la position des racines sur des plans verticaux et horizontaux (Fig. 4.17) coupant le volume enraciné d'une surface délimitée et localisée (Huot, 2013). Pour évaluer le profil racinaire dans le substrat de notre TV, trois prélèvements ont été effectués le 06 juin 2014, en tranchées (deux pour la parcelle Stock60 et une sur la parcelle Stock40) de 50 cm de long sur 11,7 cm de profondeur pour la parcelle Stock60 et de 9,7 cm de profondeur pour la parcelle Stock40. L'objectif est d'estimer la densité et la profondeur d'enracinement sur l'ensemble de la toiture où la végétation recouvrait toute la surface au moment de la mesure.

La tranchée a été réalisée au moyen d'une plaque en acier pour conserver le profil racinaire et la structure du substrat lors de l'excavation. La cartographie de la distribution spatiale racinaire a été effectuée à l'aide d'une grille de 50×20 cm de maille carré $0,5 \times 0,5$ cm fixée contre le profil. Pour chaque maille, la présence était notée lors de l'observation. Des critères ont été définis : i) la présence de racines est représentée par une coloration de la case - ii) l'absence de racines est précisée par une case blanche, iii) la présence de racines est notée par une case verte.



FIGURE 4.17 – Photographie du profil racinaire de la parcelle Stock40 de la toiture végétalisée réalisée le 06/06/2014

4.3 Résultats et discussion

4.3.1 Évolution de la géométrie des TV à l'échelle du bâtiment

Hauteur de substrat À l'installation de la toiture, l'épaisseur théorique (constructeur) du substrat était de 10 cm pour toutes les parcelles. Cette valeur théorique, qui n'a pas été mesurée immédiatement après l'installation des TV est probablement erronée. En effet, la géométrie de la toiture sans TV n'est pas totalement uniforme. De ce fait, lors du nivellement des TV en juillet 2011 certaines zones pouvaient présenter des hauteurs de substrat différentes. Deux ans après l'installation, nous avons mesuré des hauteurs moyenne de 9, 10 et 12 cm respectivement pour les parcelles AE, Stock40 et Stock60.

Initialement, les sondes ont été installées au 2/3 de la profondeur du substrat de chaque modalité (en supposant une épaisseur initiale de 10 cm). Vu l'évolution constatée de l'épaisseur de ce dernier, la position des sondes a dû être modifiée. Nous faisons l'hypothèse que cette position est restée constante sur une année. Il est difficile de faire une vérification de la position exacte des sondes sans perturber l'environnement proche de ces dernières (présence de racines des plantes).

Hauteur de la végétation Le développement de la végétation sur les différentes modalités a été rapide au cours de la période d'étude (2011 à 2014) comme le montre la Fig. 4.18. Le recouvrement atteint 60 % en août 2011. Le recouvrement complet survient en août 2012. Le recouvrement et la hauteur de la végétation permettent d'évaluer l'évapotranspiration. La mesure de la hauteur de végétation réalisée en février 2014 (30 mois) après le début de l'étude est de $7,0 \pm 1,5$ cm. En période froide, les sedums se développent peu, voire pas du tout. C'est en période chaude (juillet) que la hauteur peut atteindre une moyenne de 20 cm (Schwager, 2014).

Densité racinaire Afin d'évaluer le développement de la végétation et son effet potentiel sur le transfert hydrique du substrat S_{30} , un profil racinaire est déterminé pour ce substrat. La Fig. 4.19 représente ce profil racinaire moyen pour trois prélèvements où deux sous-couches peuvent être aisément distinguées. La première sous-couche (0 à 6,5 cm) contient une grande quantité de racines avec une épaisseur plus large ($48,9 \pm 7,3$ %). À l'opposé, la densité racinaire est plus petite ($12,1 \pm 5,1$ %) dans la deuxième sous-couche (6,5 à 13 cm), l'épaisseur des racines y est plus fine.

Les trois répliquats donnent globalement le même développement racinaire. La Fig. 4.19c montre que le troisième répliquat a une densité racinaire entre 0 et 5 cm plus importante (100 %) que les deux premiers respectivement de 82 et 90 %. Les racines n'ont pas colonisé l'ensemble de la couche du substrat



FIGURE 4.18 – Représentation du développement de la végétation au cours de la période d'étude 2011-2012 extraite des parcelles du CEREMA (Laboratoire Régional de Nancy). (a) photographie de la modalité AE prise en août 2011 avec un taux de recouvrement de 60 %. (b) photographie de la modalité AE prise en juillet 2012 avec un taux de recouvrement de 100 %.

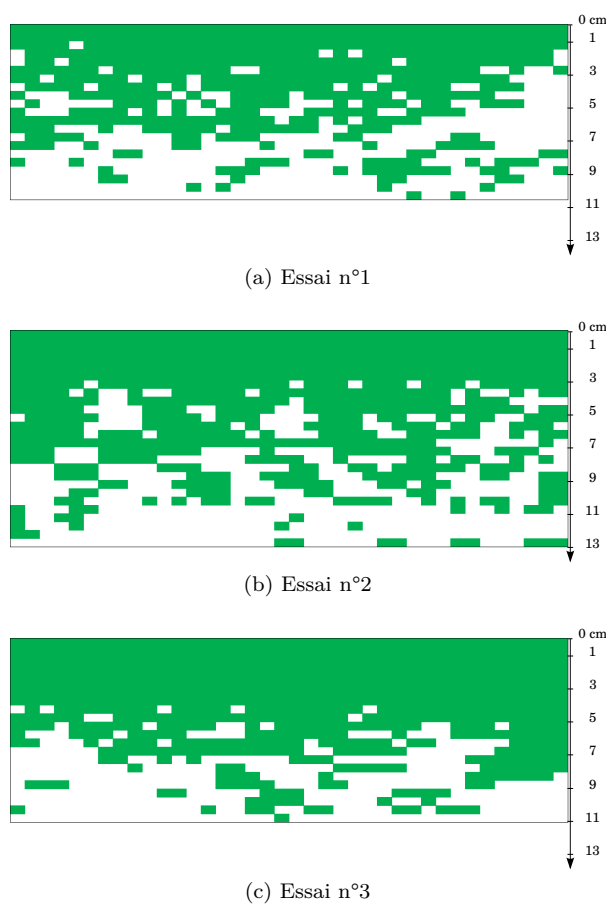


FIGURE 4.19 – Distribution du profil racinaire pour le substrat S_{30} extrait des parcelles du CEREMA (Laboratoire Régional de Nancy) pour une épaisseur de 13 cm. Les cases vertes désignent la présence de racines, a) essai réalisé sur la parcelle Stock60, b) essai réalisée sur la parcelle Stock40 et c) essai réalisé sur la parcelle Stock60

du fait de leur aptitude à se développer horizontalement (Sayed, 2001). À l'installation des différentes

modalités, la végétation a été disposée en micro-mottes de façon aléatoire, cela peut expliquer qu'entre les différents réplicats, il n'y a pas le même taux d'enracinement, il faut rappeler que la végétation présente est composée de cinq variétés de sedum (album, sporium, reflexum, sexangulare, floriferum).

Deux rôles sont généralement reconnus aux racines d'un végétal : elles ont les fonctions d'absorption et de transport de l'eau et des éléments minéraux vers les parties aériennes et les organes de réserve (Russel, 1961). Il faut y ajouter les fonctions de synthèse et de transport de métabolites organiques. D'autre part, leur développement intervient dans l'évolution des propriétés du sol et plus particulièrement de sa structure et de sa teneur en matière organique (Deffontaine, 1964). Bonzon et Picard (1969) expliquent que l'amélioration des caractéristiques physiques ou hydriques est liée au développement du système racinaire. D'où l'importance de la connaissance du développement racinaire d'un couvert végétal dans le sol.

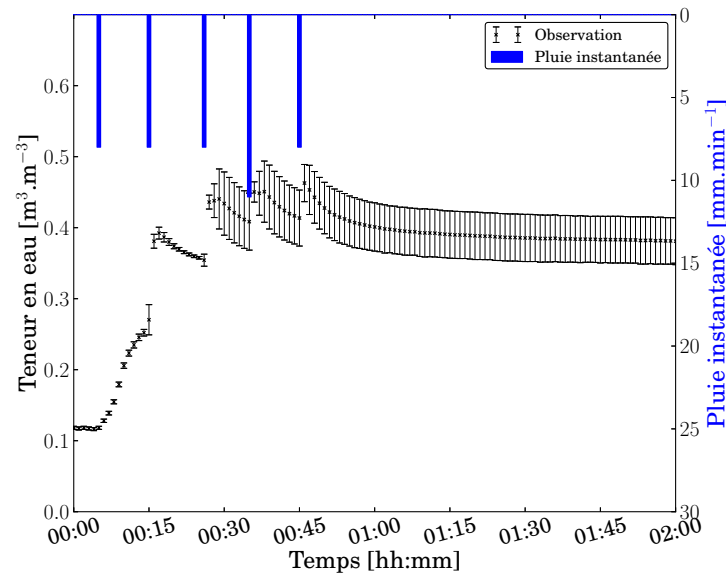
4.3.2 Étude hydrodynamique à l'échelle du laboratoire

L'analyse des différentes couches de la toiture végétalisée (substrat, géotextile et système de drainage) dans le précédent chapitre a montré que ces matériaux ont des caractéristiques physiques et hydriques marquées par une forte capacité de rétention en eau, en condition non saturée, et un drainage rapide en condition saturée. L'objectif de ce travail est de caractériser le comportement dynamique d'une toiture végétalisée en laboratoire avec des conditions climatiques contrôlées, à l'aide d'un dispositif expérimental (expérience de saturation/drainage décrite dans le § 4.2.2). Cette expérience s'effectue au moyen du suivi du flux hydrique traversant les couches de la TV et de la teneur en eau à l'intérieur du substrat.

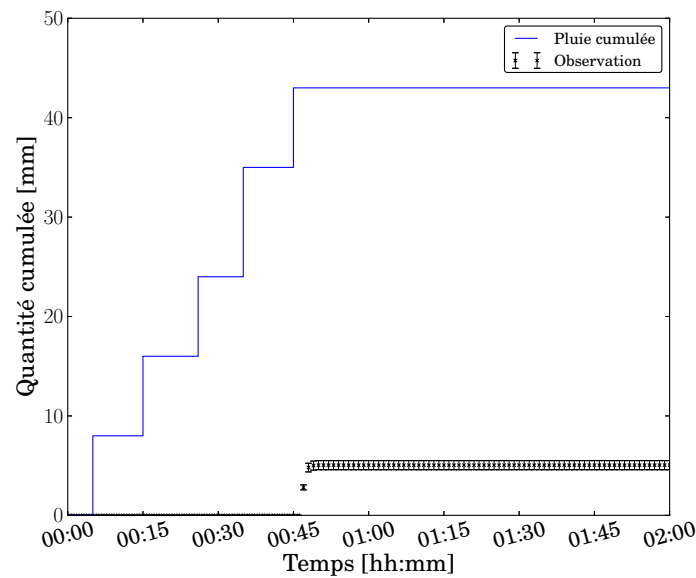
Sur substrat initial (t_0) - expériences et interprétation Le comportement hydrodynamique de la toiture végétalisée au cours de l'expérience saturation/drainage est présenté sur la Fig. 4.20. L'évolution de la teneur en eau dans le substrat en fonction de la quantité de pluie reçue par le substrat est indiquée sur la Fig. 4.20a.

Durant l'expérience de saturation/drainage, plusieurs injections d'eau ont été appliquées sur la toiture végétalisée (quantité équivalente à 43 mm) sur une petite période (1 h). Dans la réalité, cette pluviométrie représente une pluie relativement massive. Néanmoins, il faut souligner que l'objectif de cette expérience n'est pas d'évaluer ou de simuler le comportement d'une toiture végétalisée sous des conditions réalistes mais d'analyser le transfert hydrique dans un milieu poreux à différents états d'humidité caractéristique.

La teneur en eau dans le substrat varie de $0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ au début de l'expérience pour atteindre une valeur de $0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ à la fin de l'expérience. L'évolution de la teneur en eau dans le substrat augmente progressivement durant les premiers instants de l'expérience entre 0 et 16 min (phase de saturation) où la teneur en eau du substrat augmente pour atteindre $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Une deuxième phase est relevée entre 16 et 46 min (phase saturation-drainage) : la teneur en eau augmente rapidement après chaque injection d'eau et décroît lentement ensuite. La valeur maximale mesurée de teneur en eau est de $0,46 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Cette valeur peut être assimilée à la teneur en eau à saturation du substrat (θ_s) déterminée dans les résultats des propriétés hydriques du substrat (§ 3.2.4). Une dernière phase, entre 46 et 120 min, caractérisée par le drainage du substrat est visible et un plateau est atteint 30 min après la dernière injection d'eau ($0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). 11,62 % de l'eau injectée a été évacuée durant la totalité de l'expérience. Le drainage survient lorsque la partie basse du substrat devient complètement saturée en eau (voir Fig. 4.20).



(a) Teneur en eau



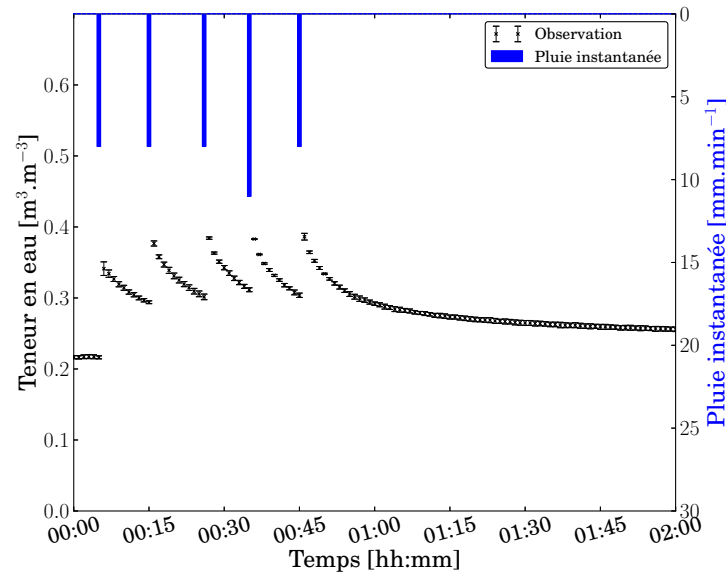
(b) Quantité d'eau entrante et sortante cumulée

FIGURE 4.20 – Comportement hydrodynamique pour l'expérience saturation/drainage pour le substrat S_0 ; intensité de pluie (barre), quantité de pluie cumulée (ligne bleue), mesure de la teneur en eau et quantité d'eau sortante (barre d'erreur et x noire)

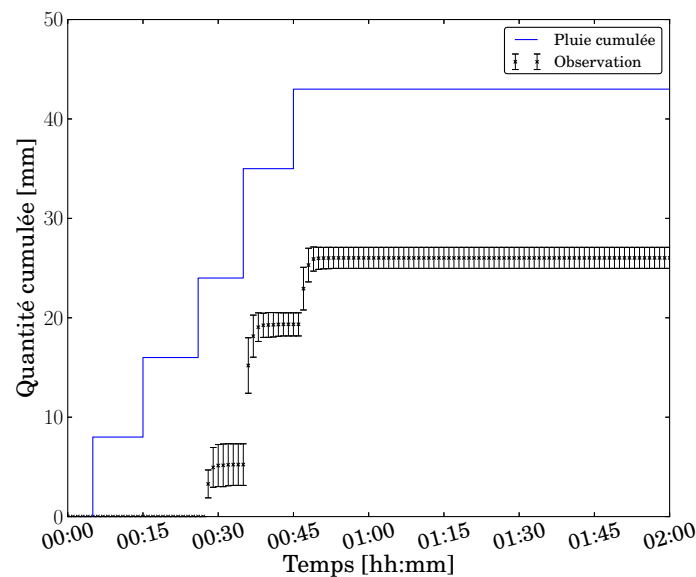
Le nombre de trois répétition apporte du poids à la reproductibilité de l'expérience surtout entre 0 et 30 min avec un écart type de 0,4 %.vol. Cet écart augmente à 4,5 %.vol à partir de 45 min (Fig. 4.20).

À l'issue de l'expérience, la capacité de rétention CR est de $86,1 \pm 1,5$ % (6 mm=13,9 % drainé). Cette quantité est globalement similaire à celle tirée des travaux de Buccola et Spolek (2011). Ceux-ci trouvent pour des quantités de précipitations similaires (intensité de pluie de 48 mm.h^{-1}) une capacité de rétention en eau dans le substrat (épaisseur de 14 cm) de 55 à 65 %. Ils indiquent aussi que la rétention augmente lorsque le sol est initialement sec. La valeur de teneur en eau initiale n'est pas précisée dans leur étude

mais confirme notre hypothèse : la teneur en eau initiale dans notre cas ($0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) influence la quantité d'eau retenue au cours de l'expérience. L'expérience de saturation/drainage révèle l'existence d'un flux hydrique retardé dans le temps t_{ER} de 45 min. Ce flux est conditionné principalement par l'intensité des précipitations et l'épaisseur du substrat. Palla *et al.* (2009) ont démontré qu'il y a une relation proportionnelle entre l'épaisseur du substrat et la quantité d'eau drainée.



(a) Teneur en eau



(b) Quantité d'eau entrante et sortante cumulée

FIGURE 4.21 – Comportement hydrodynamique pour l'expérience saturation/drainage pour le substrat S_{30} ; intensité de pluie (barre), quantité de pluie cumulée (ligne bleue), mesure de la teneur en eau et quantité d'eau sortante (barre d'erreur et x noire)

Sur substrat évolué (t_{30}) - expériences et interprétation La Fig. 4.21 représente l'évolution de la teneur en eau et la quantité d'eau sortante pour l'expérience de saturation/drainage pour le substrat

S_{30} . La teneur en eau mesurée augmente en fonction de l'injection d'eau, de $0,21 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ au début de l'expérience jusqu'à $0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ à la fin de celle-ci. Nous distinguons trois périodes : i) une période de saturation rapide (0 à 5 min), ii) une période d'humidification et de drainage rapide (5 à 46 min) et iii) une période de drainage lent (46 à 120 min). Au cours de la première période, la teneur en eau mesurée croît rapidement pour atteindre $0,34 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Par la suite, une évolution similaire est observée au cours de la seconde période, à savoir une humidification rapide suivi d'un drainage lui aussi rapide. La valeur maximale atteinte lors de cette période est de $0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (cinquième injection), cette valeur est plus faible que pour le substrat S_0 (Fig. 4.20a). Enfin, lors de la dernière période, la teneur en eau décroît pour atteindre un palier 75 min après la dernière injection ($0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Ce plateau ou palier a une valeur plus faible que celle trouvée au cours de l'expérience avec le substrat S_0 . L'eau commence à être évacuée après la troisième injection (Fig. 4.21b). Deux paliers ont été mesurés pour atteindre une valeur maximale de 26 mm. Il apparaît une capacité de rétention CR moindre de 39,5 %. L'effet retard a lui aussi diminué ($t_{ER}=21$ min). Cette baisse est liée d'une part à la présence de la végétation qui modifie la structure de la couche de substrat (architecture porale) en favorisant des passages préférentiels.

4.3.3 Étude hydrodynamique à l'échelle du bâtiment

Présentation des phases de suivi La campagne de monitoring des TV du LRN a commencé en juillet 2011 avec le début de ce travail de thèse ; ces acquisitions sont toujours en cours. La Fig. 4.22 montre l'évolution des caractéristiques météorologiques (température de l'air) et l'intensité des précipitations durant les quatre phases du suivi.

Entre 2011 et 2014, la pluviométrie annuelle oscille entre 641 et 873 mm, l'année 2011 se révèle être la plus sèche par rapport aux autres années. Ces précipitations sont plus importantes entre mai et octobre de chaque année. Cette campagne de mesure a été divisée en deux périodes, qui se distinguent par la présence ou non du système de retenue d'eau. Chacune est sub-divisée en deux phases.

La première phase correspond à l'installation des différentes parcelles. Elle s'étale sur 173 jours du 01/07/2011 au 21/12/2011. Durant cette phase, le système de retenue d'eau (Fig. 4.14) a été placé (hauteur maximale de l'eau retenue égale à 30 mm).

La seconde phase a débuté du 01/01/2012 au 18/02/2013 pour 415 jours d'analyse. Elle est marquée par un système de retenue d'eau à un niveau nul. La Fig. 4.22 montre une oscillation de la température entre -5 et 25°C , la température moyenne annuelle est de $10,8^\circ\text{C}$, soit plus faible de $0,8^\circ\text{C}$ par rapport à 2011. Cette température oscille entre des valeurs extrêmes supérieures ($37,2^\circ\text{C}$) observées le 19/08/2012 et inférieures ($-15,3^\circ\text{C}$) observées le 07/02/2012). Dans le même contexte, en août 2012, la température est supérieure à 25°C durant quinze jours consécutifs (entre le 12/08/2012 et le 25/08/2012). Aussi, la période la plus froide (température inférieure à 0°C) se situe en février (entre le 01/02/2012 et le 12/02/2012). Durant la deuxième phase de la campagne d'acquisition, il y a eu 122 jours cumulés de précipitations (intensité supérieure à $1 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$). 162,7 mm sont tombées en mai, dont 99 mm le 21/05/2012. Cet événement, considéré comme exceptionnel est certes intéressant mais ne fera pas l'objet d'investigations dans ce document. En été (juin 2012, il y a eu 6 jours de pluie entre le 02/06/2012 et le 07/06/2012), on relève 26,6 mm d'eau précipitée. Ce même maximum est aussi atteint en hiver (décembre entre 13/12/2012 et le 18/12/2012).

La troisième phase a commencé du 18/02/2013 au 02/01/2014 pour 318 jours d'acquisition. Durant cette phase, le système de retenue d'eau a été placé à son plus haut niveau respectivement 40, 60, 50 et 50 mm pour les modalités Stock40, Stock60, AE et GR. Durant cette phase, il y a eu 872 mm de

précipitation. Cette quantité d'eau précipitée est plus intense en mai 2013 avec 108 mm et en octobre 2013 avec 120 mm. Il y a eu 132 jours sur l'ensemble de l'année où l'intensité des précipitations est supérieure à 1 mm dont 53 jours de pluie consécutifs (Fig. 4.22). L'année 2013 a connu plusieurs jours avec des événements pluvieux dont l'intensité a dépassé 5 et 10 mm.j⁻¹. Ce nombre d'occurrence est respectivement de 31 jours (entre mai et novembre) et 12 jours (septembre et novembre). Par ailleurs, la Fig. 4.22 montre pour l'année 2013 une température de l'air extérieure annuelle moyenne de 10,4 °C quasi similaire à l'année 2012.

De même, les données expérimentales de température de l'air extérieur enregistrées montrent des pics importants, notamment en juillet et en août avec une température maximale respectivement de 27,6 et 25,1 °C. Il y a eu 15 jours (du 13 au 27/07/2013) où la température a dépassé 20 °C et 5 jours (du 01 au 05/08/2013) où la température a dépassé 25 °C. À l'opposé, pour les basses températures (température inférieure à 0 °C), les mois les plus froids sont logiquement en janvier, février, mars et décembre 2013 avec un nombre respectif de jours sous 0 °C de 16, 19, 17 et 14. Dans le même contexte il n'y a eu qu'en janvier et février, avec respectivement 5 et 3 jours, où la température était inférieure à zéro consécutivement.

Enfin, la quatrième et dernière phase a commencé du 01/01/2014 au 30/06/2014 pour 179 jours d'acquisition sans stockage (bouchons enlevés). Durant les six mois de cette phase, on recense une température moyenne de l'air équivalente aux années précédentes (10,6 °C), avec un maximum atteint en juin (25,2 °C) et une température minimale de 1,32 °C en mars. Il y a eu respectivement 4 et 8 jours consécutifs où la température a dépassé les 25 °C en mai et en juin. Au cours de cette année et dans le même contexte, il y a eu 29 jours où la température est inférieure à 0 °C. Par rapport aux phases précédentes où le nombre de jours pour la même période (de janvier à mars) est en moyenne de 44 (Fig. 4.22).

En résumé, lors de la première et la troisième phase, les parcelles sont en configuration « stockage », alors que dans la deuxième et la quatrième phase, les modalités sont en configuration « drainage ». La température annuelle moyenne sur l'ensemble des phases est 11,2 °C avec des températures extrêmes recensées minimales de -15,3 °C (durant la journée du 14/02/2013) et maximale de 37,2 °C (durant la journée du 19/08/2012).

Dans la suite, nous décrivons le bilan hydrique à l'échelle hebdomadaire et saisonnière, ainsi que le comportement hydrique intrinsèque du substrat de chaque modalité.

Bilan hydrique à l'échelle hebdomadaire - quantité d'eau sortante Pour illustrer les résultats de suivi au cours des 4 années d'expérimentations, le choix a été fait de présenter tout d'abord des « zooms » à l'échelle de la semaine sur des périodes climatiques contrastées (une période estivale et une période automnale).

Première phase La première phase du monitoring a débuté en août (du 24 au 31) et octobre 2011 (du 19 au 26), juste après l'installation des divers systèmes d'acquisition. Durant cette phase, il est tombé respectivement 26,2 et 28,9 mm d'eau de pluie. Aussi, seule quelques événements d'eau drainés hors de la toiture ont pu être constatés sur les différentes parcelles. Cela est dû à une température de l'air élevée au cours de cette phase. Au cours de cette phase, seul la modalité AE a permis d'évacuer l'eau de pluie, les autres parcelles n'ont rien évacué. Ainsi, nous nous intéressons uniquement à la modalité AE pour illustrer la capacité de rétention et l'effet retard. En effet, par définition, la CR est égale à 100 % pour

les modalités Stock40 et Stock60.

La Fig. 4.23 donne l'évolution de la quantité de l'eau sortante pour les deux dates du 24 au 31 août 2011 et 19 au 26 octobre 2011 pour la modalité AE. Cette figure montre quelques événements pluvieux variant de 4 à 8 mm.h⁻¹ en période chaude et jusqu'à 3 mm.h⁻¹ en période froide. Ces événements ont permis de relarguer une quantité d'eau avec un effet retard t_{ER} de 29 h en période chaude et 9 h en période froide. La capacité de rétention CR calculée est de 55,22 % en période chaude (août 2011) et 42,62 % en froide (octobre 2011).

Ce résultat signifie que la parcelle est saturée en eau à certains moments, du fait de la présence du système de retenue d'eau. Les parcelles Stock60 et Stock40 n'ont pas le même comportement que la parcelle AE du fait de la présence d'importantes lames d'eau (20 mm pour la parcelle Stock60 et 30 mm pour la parcelle Stock40). Ces quantités d'eau sont retenues et de ce fait non comptabilisées par le débitmètre à auget.

Deuxième phase La seconde phase de la campagne de suivi a été réalisée du 01/01/2012 au 18/02/2013. Le volume d'eau retenu est calculé uniquement pour les événements pluvieux dont les hauteurs sont supérieures à 6 mm. Dans cette configuration « stockage », il est à noter que l'eau en excès n'est pas naturellement évacuée par la couche de drainage. Néanmoins, si l'intégralité de la toiture est saturée en eau, il est possible qu'il y ait une évacuation par débordement. En période froide (lorsque la température de l'air extérieur ne dépasse pas 11 °C), la capacité de rétention pour une TV équipée d'une structure drainante en billes d'argile (modalité AE) varie entre 3 et 40 %. En période chaude, cette capacité de rétention atteint 61,56 % (du 19 au 26/07/2012). L'effet retard varie quant à lui de 8 à 38 h en période froide et est de 48 h en période chaude (du 19 au 26/07/2014). Ces valeurs sont à prendre avec précaution, car lors de la rénovation et de l'installation des TV (février 2011), il a été constaté la présence de flaques d'eau sur l'ensemble du toit. Ces dernières peuvent stocker une hauteur d'eau pouvant atteindre 15 mm, ce qui entraîne une diminution de la quantité d'eau évacuée et mesurée par le débitmètre à auget.

En se basant sur cette analyse préliminaire, il est évident que le système TV est capable de réduire sensiblement la formation de ruissellement due aux pluies d'orage.

Troisième phase La troisième phase de la campagne d'acquisition des données hydriques sur la toiture végétalisée a commencé en février 2013, après la mise en place des systèmes de retenue d'eau à leur niveau maximal (équivalent à l'épaisseur de chaque couche de drainage, 6 cm pour la parcelle Stock60, 5 cm pour les parcelles AE et GR et enfin, 4 cm pour la parcelle Stock40).

À l'issue de la campagne de mesure, les différentes modalités (AE, Stock60, Stock40, et GR) ont retenu respectivement 64,5 %, 97 %, 61,7 % et 93 % d'eau de pluie.

La Fig. 4.26 montre le drainage de l'eau de pluie à travers les parcelles de la TV, même avec la présence des systèmes de retenue. Au cours de cette période, la parcelle AE a rejeté une quantité d'eau d'une valeur de 25,3 mm avec un pic d'intensité d'eau drainée de 0,9 mm.h⁻¹ pour 25,7 mm de précipitation et une intensité de 2 mm.h⁻¹ (Fig. 4.26b).

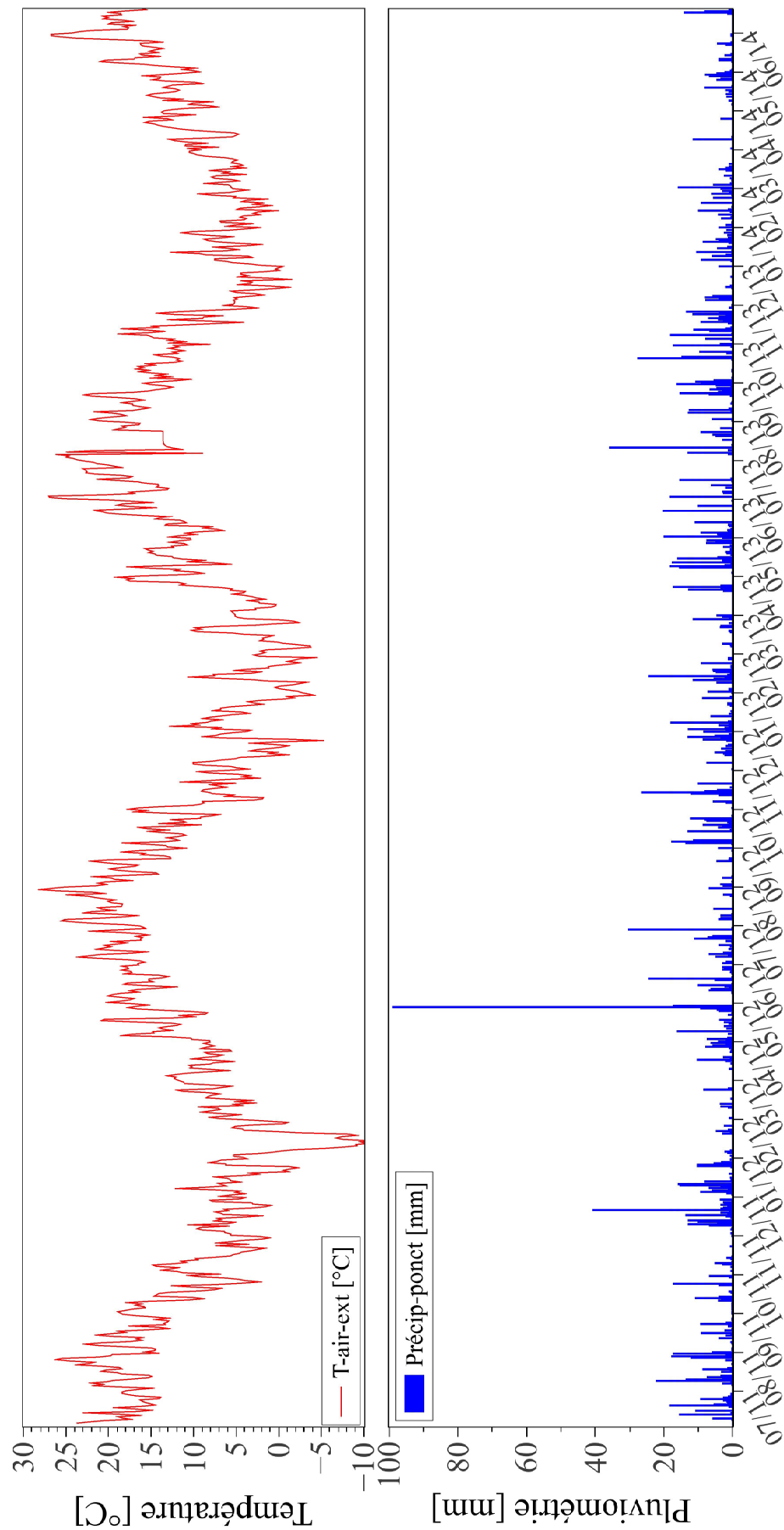


FIGURE 4.22 – Évolution dans le temps des conditions climatiques sur les parcelles Stock60, Stock40, AE et GR pour la période de mesure du 02 juillet 2011 au 30 juin 2014.

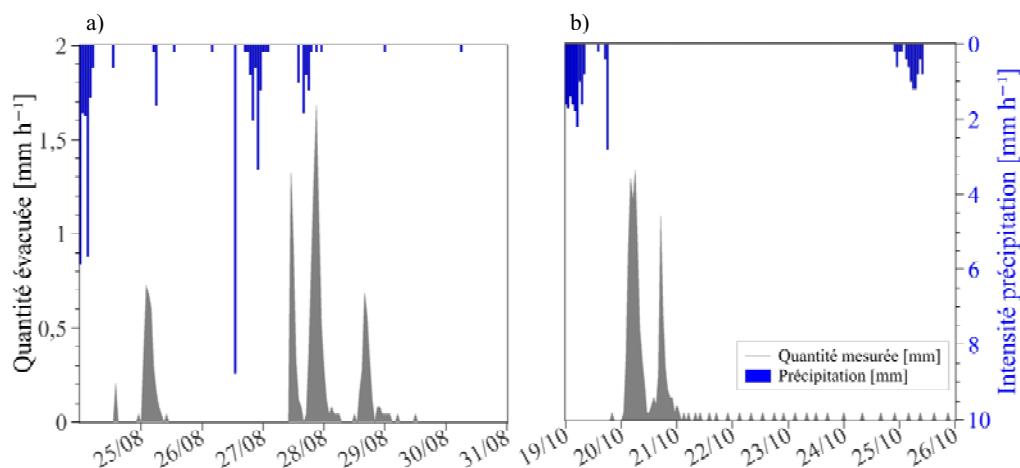


FIGURE 4.23 – Hyétoqramme et quantités d'eau drainées (aire grise, qui représente la quantité d'eau mesurée évacuée) pour la parcelle Argile expansé AE : a) événements des 24-31/08/2011, b) 19-26/10/2011)

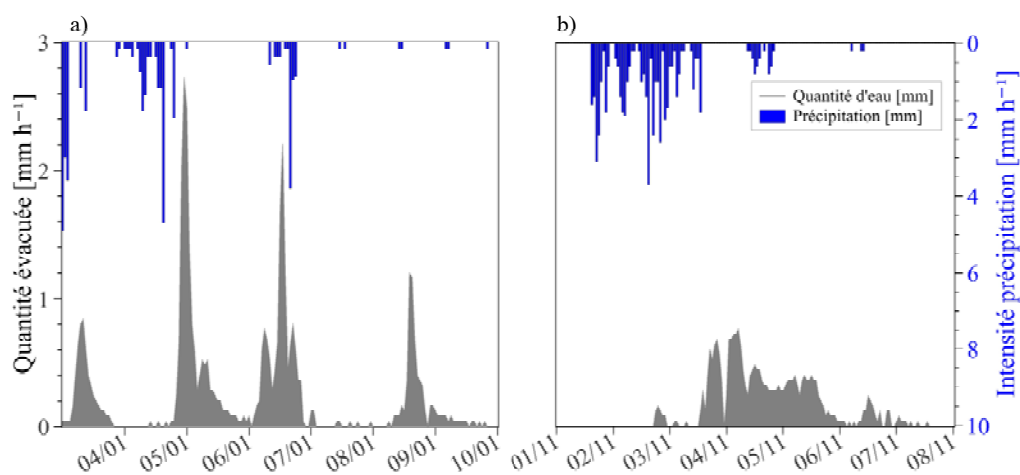


FIGURE 4.24 – Hyétoqramme et quantités d'eau drainées (aire grise, qui représente la quantité d'eau mesurée évacuée) pour la modalité AE : a) événements des 03-10/01/2012, b) 01-08/11/2012)

En période froide, entre le 18 et 25/11/2013, la capacité de rétention est de 2% pour une pluviométrie totale de 25,7mm. Cette capacité augmente entre 19 et 26/05/2013 pour atteindre 40,6%. Cette augmentation est due à des températures un peu plus élevées ($>15^{\circ}\text{C}$) et des précipitations moins importantes qui, du fait de la forte capacité de rétention du substrat favorisent le stockage de l'eau. En période chaude, la quantité d'eau rejetée est minime voire inexistante, même en présence d'une intensité de pluie moyenne de 13,1 mm par jour (considérée comme pluie forte).

Les performances des toitures végétalisées en configuration stockage s'avèrent être bonnes avec un effet retard en période froide de 22 h (événements automne-hiver) et de 12 h en période chaude (printemps). Cette valeur dépend de deux facteurs. Le premier est en lien avec les conditions météorologiques et le second facteur est l'intervalle de temps entre chaque précipitation (période de sécheresse). Durant la période automne-hiver, le temps entre les événements pluvieux est réduit, de ce fait, la capacité de rétention des TV est basse. Certes, ces deux facteurs influencent le bilan hydrique de la TV et donc la quantité d'eau évacuée, mais c'est la teneur en eau dans le substrat qui influence le plus la quantité

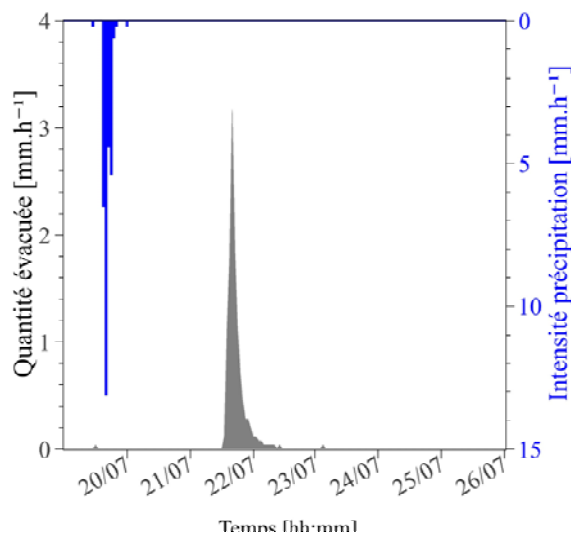


FIGURE 4.25 – Hyétoqramme et quantités d'eau drainées (aire grise, qui représente la quantité d'eau mesurée évacuée) pour la parcelle Argile expansé (AE) pour la période du 19 au 26 juillet 2012

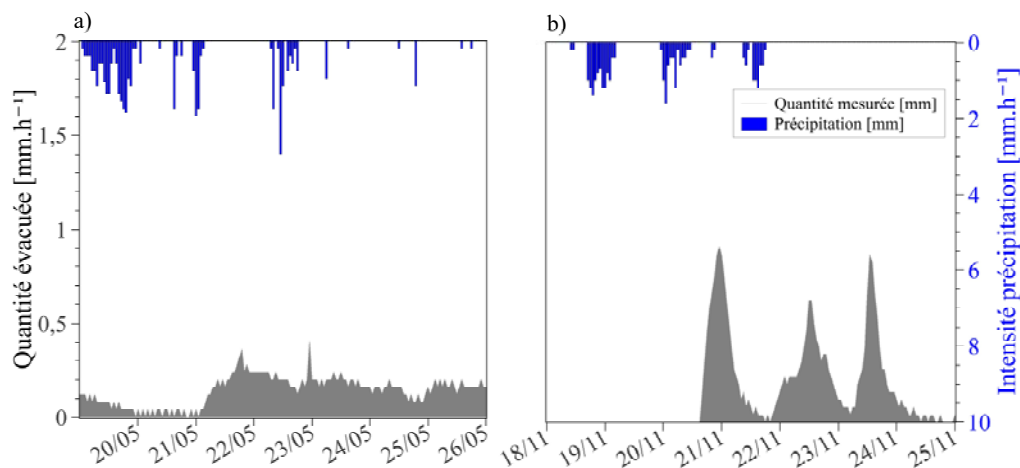


FIGURE 4.26 – Hyétoqramme et quantités d'eau drainées (aire grise, qui représente la quantité d'eau mesurée évacuée) pour la parcelle Argile expansé (AE) pour : (a) la période du 19 au 26 mai 2013 et (b) la période du 18 au 25 novembre 2013

d'eau sortante. L'importance de ce facteur est discutée dans la suite de ce document.

Quatrième phase La quatrième et dernière phase du monitoring a débuté en janvier 2014 jusqu'au 30 juin 2014. Durant cette phase, il y a eu 48 événements de pluie de plus de 1 mm (218 mm de précipitation). Seuls deux événements ont franchi la barre des 10 mm de pluie, en février (le 13/02/2014 avec 13,9 mm) et en juin (le 28/06/2014 avec 21,1 mm). Durant les mois de janvier, mai et juin, il y a eu uniquement douze événements pluvieux dont l'intensité de précipitation journalière est supérieure à 5 mm.j⁻¹.

Durant cette phase, quelques événements d'eau évacuée ont pu être constatés sur les modalités. Les différents événements pluvieux ont généré un faible drainage de l'eau de pluie pour les différentes modalités. À titre de comparaison, la parcelle Stock60 a évacué 1,7 mm du 08 au 14/02/2014 alors que la parcelle Stock40 en a évacué (26,5 mm) par rapport aux 29,3 mm d'eau précipitées. Durant cette phase, la quantité d'eau précipitée totale (218,9 mm) était inférieure aux précipitations des phases précédentes

en 2013 et 2012 pour la même période (01/01 au 30/06) respectivement de 402,8 et 420,1 mm. Ceci explique les faibles quantités d'eau évacuées.

TABLE 4.6 – Évolution des performances hydriques des différentes modalités (AE, Stock60, Stock40 et GR). Valeurs calculées sur la base de périodes d'une semaine chaude et froide (janvier, mai, juillet, août, octobre et novembre).

	CR [%]	t_{ER} [h]
2011	42,6 - 55,2	9 - 29
2012	40,1 - 61,5	8 - 48
2013	19,4 - 40,6	12 - 22
2014	62,1 - 78,8	3 - 48

La Table 4.6 montre l'évolution des performances hydriques de la TV en configuration stockante (2011 et 2013) et en configuration drainante (2012 et 2014). La gamme de variation est plus importante en configuration « stockage ». Les valeurs basses de t_{ER} sont plus faibles qu'en configuration « drainage », alors que les valeurs hautes sont nettement plus élevées. Cette variation est probablement due au développement de la végétation entre 2011 et 2013, ce qui a entraîné la modification de la structure du substrat notamment par la présence de racines. En situation drainante, on constate le phénomène inverse, à savoir, une augmentation de la capacité de rétention et une légère augmentation de la plage de l'effet retard. Au cours de cette période, la végétation influence aussi la structure du substrat. Par comparaison avec la période stockante où l'eau est directement évacuée, en situation drainante, cette quantité d'eau transite un certain moment dans la couche drainante. Ce constat est justifié par une augmentation de l'effet retard.

Bilan hydrique à l'échelle saisonnière La Fig. 4.27 montre que la quantité d'eau collectée durant la première phase de la campagne de mesure (01/07/2011 au 21/12/2011) est faible par rapport à la quantité d'eau précipitée pour les différentes parcelles. L'intensité de pluie la plus intense se situe début décembre.

Sur l'ensemble de l'année 2012, il y a eu 122 événements pluvieux, les parcelles AE, Stock60, GR et Stock40 ont évacué respectivement 16 %, 15 %, 13 % et 3 % d'eau de pluie (Fig. 4.27).

Sur l'ensemble de la phase d'acquisition, les parcelles AE et Stock40 ont évacué respectivement 32,8 % et 75,9 % de la pluie abattue entre le 01/01/2014 et 30/06/2014. Cette différence notable est due à la présence des flaques d'eau qui font varier la quantité d'eau évacuée. Les autres parcelles (Stock60 et GR) ont évacué respectivement 1 % et 3 % (Fig. 4.27). La Table 4.7 reprend sur l'ensemble des saisons les quantités d'eau évacuées.

TABLE 4.7 – Bilan hydrique à l'échelle saisonnière des différentes parcelles AE, Stock60, Stock40 et GR. Les cases bleues représentent les périodes de stockage et les cases blanches représentent les périodes de drainage. (-) désigne les périodes non étudiées en 2011 (entre janvier et juin) et en 2014 (entre juillet et décembre).

	Pluviométrie [mm]				Drainage [mm]															
	2011	2012	2013	2014	2011				2012				2013				2014			
					GR	AE	Stock40	Stock60	GR	AE	Stock40	Stock60	GR	AE	Stock40	Stock60	GR	AE	Stock40	Stock60
printemps	-	238	234	74	-	-	-	-	37	5	1	10	16	48	75	3	2	45	6	1
été	264	156	190	-	18	18	0	1	4	14	4	40	4	12	9	1	-	-	-	-
automne	99	141	209	-	4	21	0	1	17	35	1	1	18	184	84	2	-	-	-	-
hiver	230	202	151	111	39	111	9	23	48	77	5	6	17	64	4	7	5	3	15	3

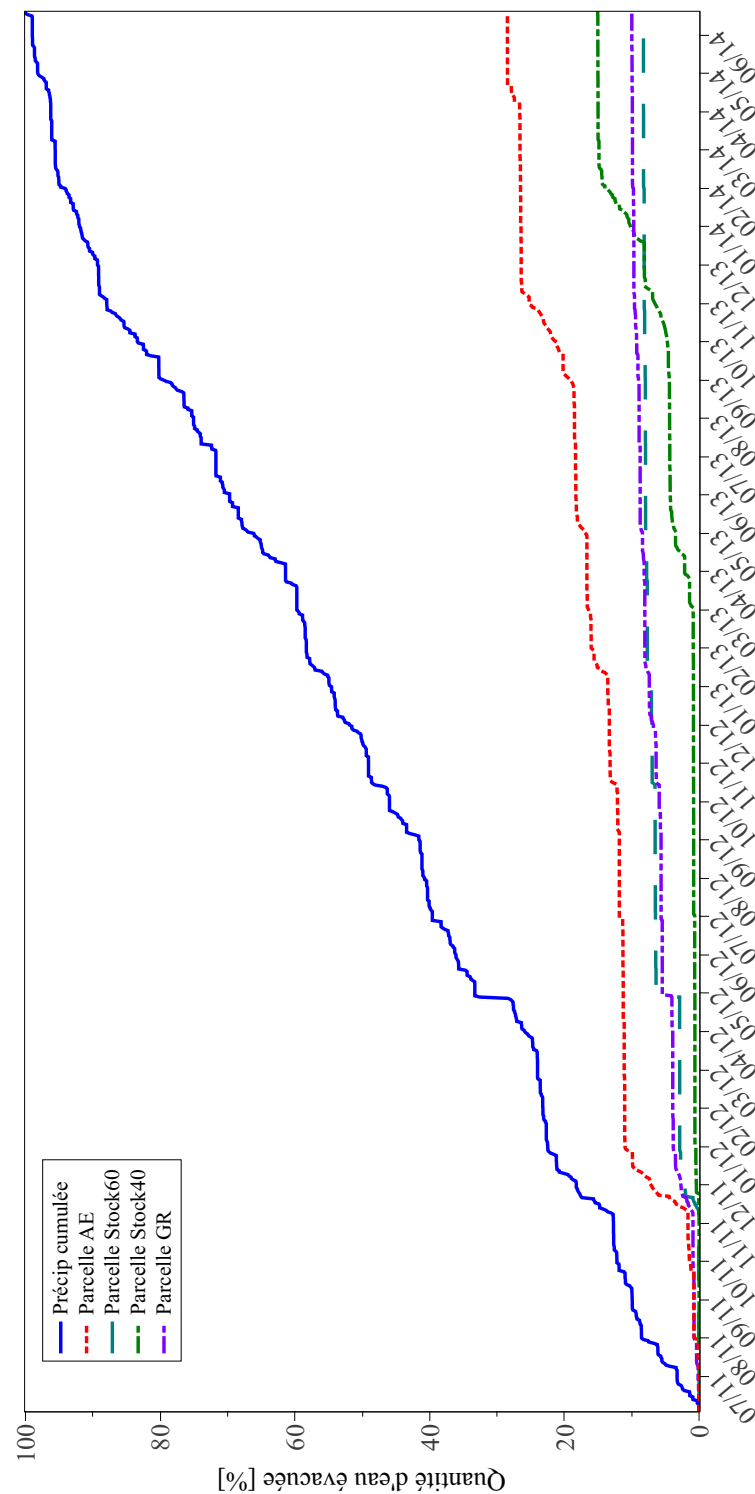


FIGURE 4.27 – Évolution dans le temps des quantités d'eau évacuées pour les parcelles Stock60, Stock40, AE et GR sur la période de mesure du 02 juillet 2011 au 30 juin 2014.

La Table 4.8 montre la capacité de rétention de chaque parcelle sur l'ensemble de la période d'étude. Ces résultats sont comparés en fonction des saisons. On constate une augmentation de capacité de

TABLE 4.8 – Capacité de rétention à l'échelle saisonnière des différentes parcelles AE, Stock60, Stock40 et GR. Les cases bleues représentent les périodes de stockage et les cases blanches représentent les périodes de drainage. (-) désigne les périodes non étudiées en 2011 (entre janvier et juin) et en 2014 (entre juillet et décembre).

	Capacité de rétention [%]															
	2011				2012				2013				2014			
	GR	AE	Stock40	Stock60	GR	AE	Stock40	Stock60	GR	AE	Stock40	Stock60	GR	AE	Stock40	Stock60
printemps	-	-	-	-	84	97	99	95	93	79	67	98	97	39	91	98
été	93	93	100	99	97	91	97	74	97	92	94	99	-	-	-	-
automne	95	78	100	99	87	75	99	99	91	11	59	99	-	-	-	-
hiver	83	51	96	90	76	61	97	97	88	57	97	95	95	97	86	97

rétention par rapport à l'échelle hebdomadaire (Table 4.6). Cette capacité de rétention est plus importante en été et au printemps (67 à 100 %) qu'en hiver et en automne (51 à 100 %). Cette capacité de rétention est plus importante avec un drainant synthétique (modalités Stock40 et Stock60).

Comportement hydrodynamique La campagne d'acquisition de la teneur en eau mesurée par les sondes TDR a commencé en juillet 2011. Comme le montre la Fig. 4.28, l'épaisseur totale des parcelles est différente du fait de la constitution des parcelles (épaisseur de la couche de drainage) et du vieillissement de ces dernières. Les parcelles sont classées suivant l'épaisseur totale croissante : i) parcelle GR, ii) AE, iii) Stock40 et iv) Stock60.

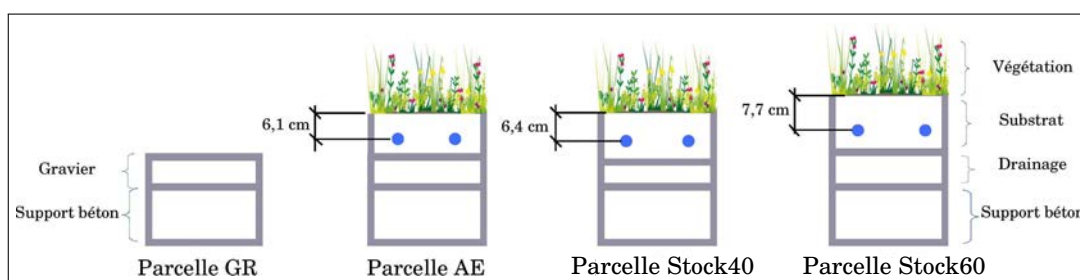


FIGURE 4.28 – Schéma du positionnement des sondes TDR pour les différentes parcelles Stock60, AE, Stock40 et GR

Nous comparons le comportement hydrique (évolution de la teneur en eau) des différentes parcelles (voir Fig. 4.30 à 4.34) en configuration stockage (phases 1 et 3) et configuration drainage (phases 2 et 4). Nous considérons les mêmes dates pour l'ensemble des phases. Pour cela, deux périodes sont choisies, l'une froide (mois de janvier) et l'autre chaude (mois de juin). Dans le même temps, les périodes sont choisies en fonction de l'intensité de précipitation quotidienne (5 mm.j^{-1}) pour étudier la capacité de stockage (quantité d'eau retenue) et l'effet retard. Plusieurs auteurs (Hilten *et al.*, 2008; Palla *et al.*, 2009; Berthier *et al.*, 2010; de Munck *et al.*, 2013) fixent l'intensité minimale de précipitation lorsque les TV commencent à évacuer l'eau, à $0,5 \text{ mm.j}^{-1}$.

Afin d'être représentatif de la surface de chaque modalité, nous utilisons la valeur moyenne des deux sondes dans l'interprétation des résultats. La Fig. 4.29 montre des valeurs constantes des tensiomètres autour de 0,89 m pour les différentes modalités (Stock40, Stock60 et AE), ce qui correspond à un potentiel de pression de pF de 1,94. Cette mesure n'est pas assez fine pour atteindre le point de saturation ($h=0$). Lors de périodes sèches, le potentiel de pression varie entre 8 m et 30 m, ce qui correspond à une plage de pF 2,9 à pF 3,47. Ici aussi, le point de flétrissement n'est pas atteint. Dans la suite, la donnée du potentiel de pression ne sera pas prise en compte. La Fig. 4.30a montre l'évolution de la teneur en eau

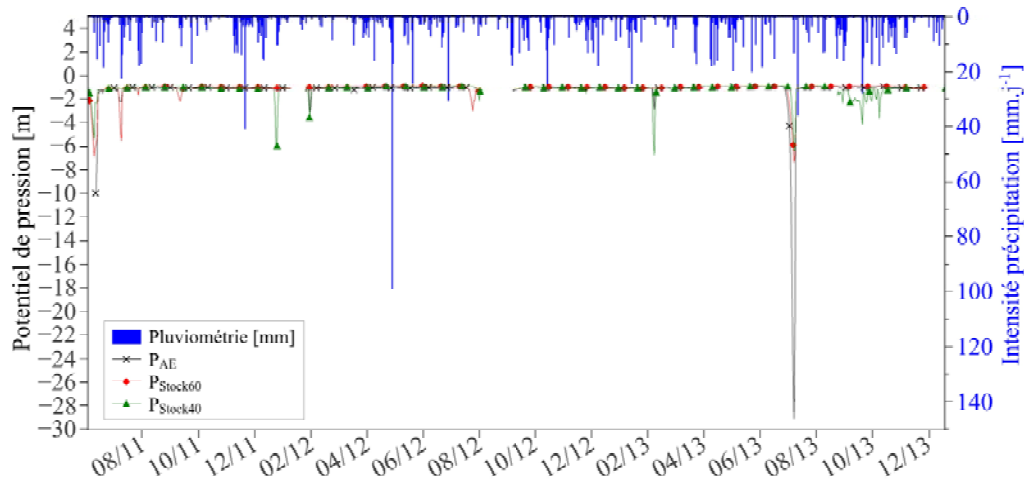


FIGURE 4.29 – Comparaison de l'évolution dans le temps du potentiel de pression mesurée - 2011/2013 pour les différentes modalités Stock60, AE et Stock40 entre 02/07/2011 et le 31/12/2013

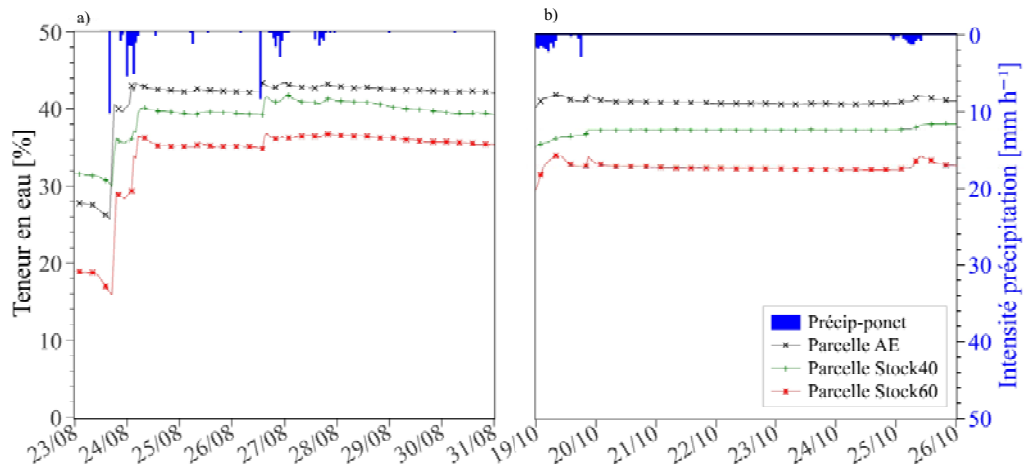


FIGURE 4.30 – Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée - « phase une » pour les différentes modalités Stock60, AE et Stock40 durant les périodes du 02 au 30/08/2011 et du 19 au 25/10/2011

pour les différentes modalités à deux périodes distinctes, à savoir une longue période chaude (du 23 au 31 août 2011) pour observer les différentes influences du climat sur l'évolution de la mesure de la teneur en eau et une courte période froide (du 19 au 26 octobre 2011). La mesure de teneur en eau à cette période reste constante avec une température de l'air extérieure plus faible et des échanges par évapotranspiration négligeables.

En comparant le comportement hydrique des modalités (Fig. 4.30) pour la première phase (configuration stockage), quelques différences apparaissent en particulier, les valeurs maximales de teneur en eau entre les trois modalités ne sont pas les mêmes pour les deux périodes (du 23 au 31/08/2011 et du 19 au 26/10/2011), il y a un écart en terme de teneur en eau de 8 % vol. Sur la Fig. 4.30, du 23/08 au 24/08, période qui correspond à une absence de pluie, il est observé une décroissance de la teneur en eau mesurée au sein du substrat. Cette baisse pour les trois modalités s'explique d'une part, par un prélèvement intense à cette saison par les plantes et d'autre part, par des écoulements gravitaires vers le bas de la TV dus à la baisse du potentiel de pression. Les variations de faibles amplitudes semblent être le résultat

des conditions micro-climatiques qui provoquent des phénomènes d'évaporation ou de condensation à l'interface atmosphère-substrat. Les premières pluies du 24/08 entraînent une augmentation rapide de l'humidité. Au cours de cet événement pluvieux qui dure moins d'une journée, des pics de teneur en eau sont observés pour les différentes parcelles AE, Stock60 et Stock40 au plus fort de la pluie. Il sont respectivement de 43,7 ; 35,8 et 40,3 %.vol, jusqu'à la pluie suivante. Il y a eu 3 jours sans pluie entre le 24/08 et le 27/08, durant cette longue absence de pluie, il est observé une zone plateau au sein du substrat des modalités AE, Stock60 et Stock40. Le plateau s'explique par une température moyenne de l'air extérieure peu élevée (22 °C) et une évapotranspiration peu importante ($ETP=3 \text{ mm.j}^{-1}$).

La Fig. 4.30b montre l'évolution de la teneur en eau dans le substrat des parcelles AE, Stock60 et Stock40 pour la période du 19 au 26/10/2011, durant cette période, il y a eu deux événements pluvieux de 17,1 mm (19-20/10/2011) et 7,6 mm le 25/10/2011. On observe un plateau de l'humidité au sein du substrat des différentes parcelles. Les valeurs maximales sont similaires aux valeurs rencontrées dans la Fig. 4.30a.

Il est assez complexe de décrire ces résultats de monitoring en termes de propriétés hydriques du substrat et en particulier de valeurs d'humidités caractéristiques pour cette phase. Il est néanmoins possible de déduire que la teneur en eau à saturation (θ_S) du matériau est comprise entre 35,8 et 43,7 %.vol. Par ailleurs, la conductivité hydraulique à saturation semble très élevée expliquant le faible temps de réponse aux événements pluvieux. Il n'est pas évident d'estimer la proportion d'eau capillaire et d'eau gravitaire.

Le suivi durant la deuxième phase du monitoring (01/01/2012 au 31/12/2012) donne d'autres informations sur le fonctionnement hydrique de la TV (Fig. 4.31) et (Fig. 4.32). Il est possible de faire un constat pour les trois sous-périodes : i) du 03/01 au 10/01, ii) du 19/07 au 26/07 et iii) 01/11 au 08/11. Les sondes TDR ont mesuré une teneur en eau constante et élevée, qui est quasiment similaire pour les parcelles AE et Stock40 (42 %.vol) alors qu'elle est de 36 %.vol pour la parcelle Stock60 (Fig. 4.31). L'écart constaté précédemment est le même (6 à 8 %.vol). La deuxième sous-période se caractérise par une pluviométrie régulière et rapprochée avec une intensité qui ne dépasse pas les $10,2 \text{ mm.j}^{-1}$, une température de l'air extérieure moyenne assez faible de 8,3 °C, les teneurs en eau des parcelles AE, Stock60 et Stock40 forment chacune un plateau avec des niveaux différents par rapport à la précédente sous-période respectivement de 40,9 ; 32,0 et 36,4 %.vol. La teneur en eau mesurée par les sondes TDR évolue suivant des épisodes de faibles oscillations en fonction des événements pluvieux sans pour autant atteindre la même valeur. L'intensité de l'augmentation de la teneur en eau est de 2 à 3,5 %.vol pour les trois parcelles durant les deux périodes (03/01 au 10/01 et 01/11 au 08/11). Cette augmentation est à chaque fois proportionnelle à l'intensité de la pluie cumulée. La troisième sous-période se caractérise par des événements pluvieux plus rares et moins intenses, des températures plus importantes que lors des deux précédentes sous-périodes (21,4 °C) et des conditions favorables à de l'évapotranspiration. Cette sous-période se caractérise par une variation de l'humidité dans le substrat beaucoup plus marquée. En effet, par rapport à la période froide, les zones de plateau sont beaucoup moins fréquentes et la teneur en eau mesurée par les sondes TDR évolue suivant des épisodes de forte décroissance, écoulement gravitaire, évapotranspiration, fort prélèvement par les racines des plantes puis une croissance rapide lorsqu'une pluie intervient. L'intensité de l'augmentation de la teneur en eau de 13,6 à 24,1 %.vol est proportionnelle à l'intensité de la pluie cumulée de 3,5 mm (Fig. 4.32).

La Fig. 4.33 montre l'évolution de la mesure de la teneur en eau au sein du substrat pour la troisième phase (Parcelle AE, Stock60 et Stock40). L'analyse du comportement hydrique des parcelles étudiées

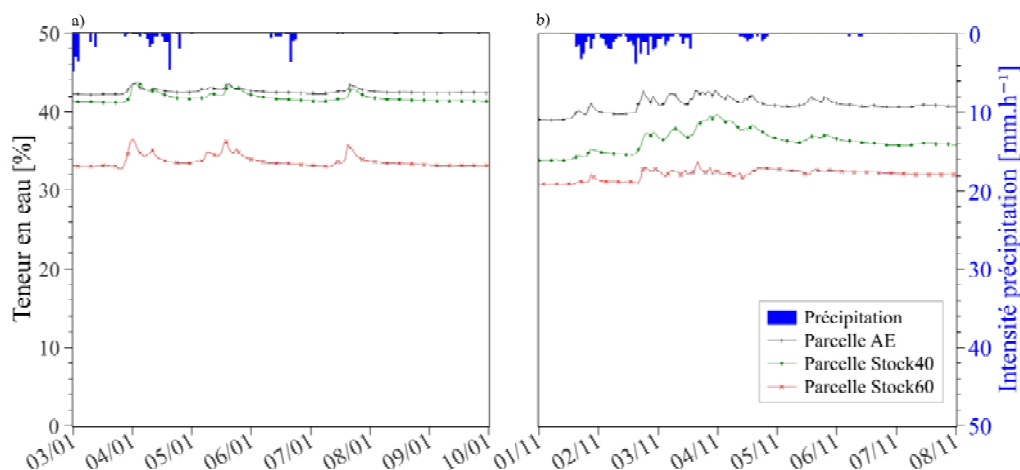


FIGURE 4.31 – Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée – « phase deux » pour les différentes parcelles Stock60, AE et Stock40 pour : (a) la période du 03 au 10/01/2012, (b) la période du 01 au 08/11/2012

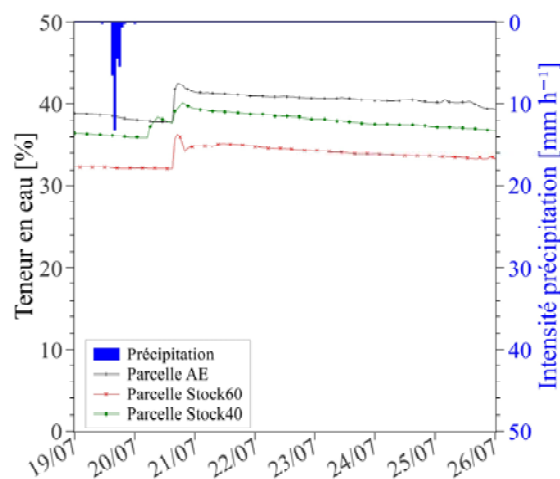


FIGURE 4.32 – Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée – « phase deux » pour les différentes parcelles Stock60, AE et Stock40 pour la période du 19 au 26/07/2012

pour la troisième phase se fonde sur l'étude de deux périodes contrastées : i) chaude du 19 au 26 mai 2013 (Fig. 4.33), ii) froide du 18 au 25 novembre 2013 (Fig. 4.33).

L'analyse de la teneur en eau dans le substrat montre un zone de plateau différente pour les trois modalités AE, Stock40 et Stock60 respectivement de 42,7 ; 42,3 et 31,5 % vol. Ce plateau est dû à : i) des conditions météorologiques douces (température et hygrométrie), qui favorisent l'activité de la végétation, ii) de faibles mais régulières précipitations qui sont stockées dans le substrat du fait de sa forte porosité.

La dernière phase du monitoring (2014) présentée par la Fig. 4.34 montre l'évolution dans le temps de la mesure de la teneur en eau pour une période froide du 01/01 au 07/01 (Fig. 4.34a) et une période chaude du 05/06 au 12/06 (Fig. 4.34b).

La première période (Fig. 4.34a) se distingue par des valeurs très hautes de teneur en eau volumique, ce qui correspond à de très faibles quantités d'eau évapotranspirées et donc à la présence d'eau sous forme liquide. Cette période se caractérise par des pluies faibles (intensité de 4 mm.h^{-1}) mais régulières,

une température de l'air extérieure journalière faible de 5,1 °C.

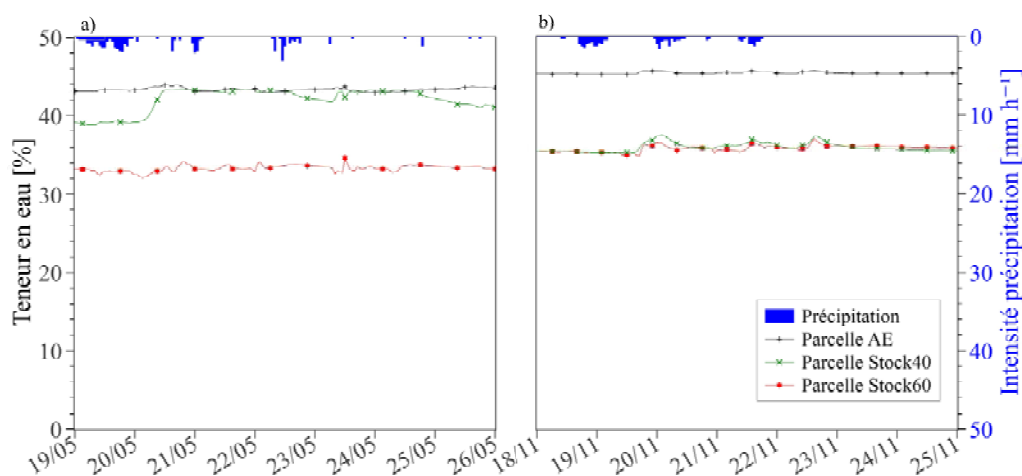


FIGURE 4.33 – Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée – « phase trois » pour les différentes parcelles Stock60, AE et Stock40 pour la période du 19 au 26/05/2013 et du 18 au 25/11/2013

Durant la période froide (18 au 25/11), la réponse des sondes indique des teneurs en eau constantes (zone de plateau) caractérisée par une intensité de pluie faible (2 mm.h^{-1}) (Fig. 4.33b). En observant les conditions météorologiques (températures de 3,4 °C), la plante n'est pas en mesure de capter l'eau présente dans le sol pour l'évacuer par évapotranspiration. De ce fait, la mesure révèle une teneur en eau élevée pour les parcelles AE, Stock60 et Stock40 respectivement de 45,2 ; 35,7 et 35,9 % vol.

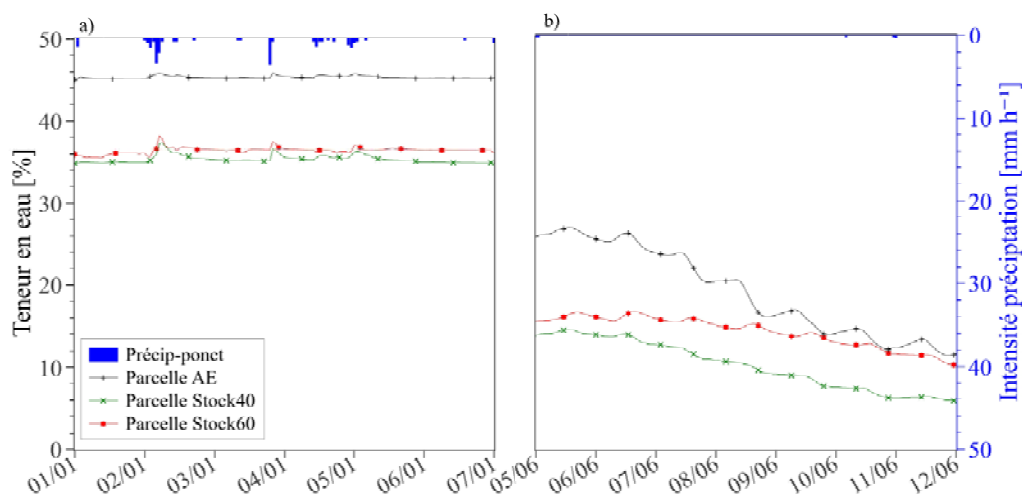


FIGURE 4.34 – Comparaison de l'évolution dans le temps de la teneur en eau mesurée – « phase quatre » pour les différentes parcelles Stock60, AE et Stock40 pour la période du 01 au 07/01/2014 et du 05/06 au 12/06/2014

Les valeurs respectives des teneurs en eau pour les parcelles AE, Stock60 et Stock40 sont de 45,2 ; 36,1 et 35,0 % vol. La deuxième période (Fig. 4.34b) se distingue par une pluviométrie inexistante et une température extérieure moyenne journalière de 16,6 °C. La teneur en eau mesurée par les sondes TDR des différentes parcelles montre une variation décroissante lors de périodes de sécheresse. La décroissance est plus marquée pour la parcelle AE que pour les parcelles Stock60 et Stock40.

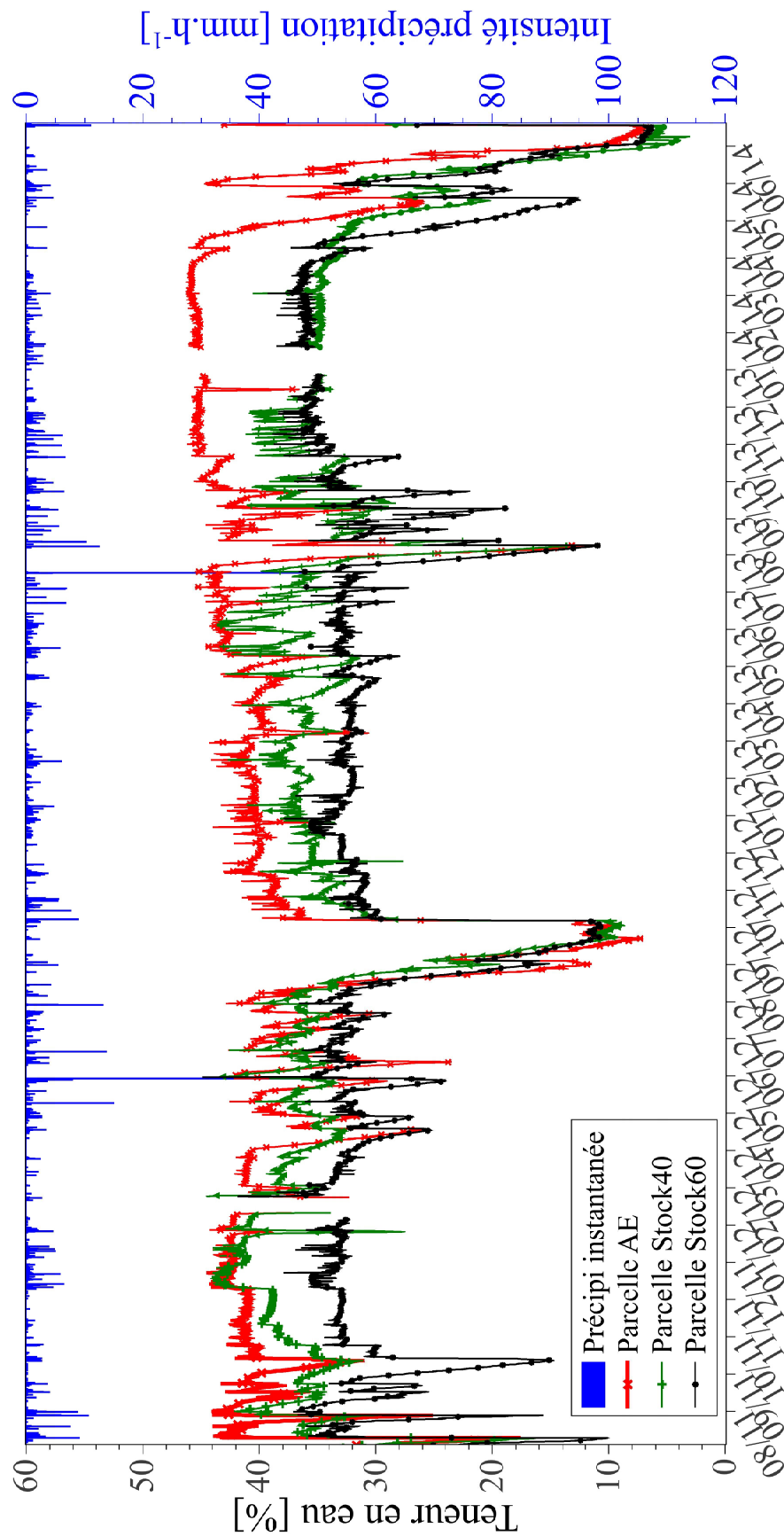


FIGURE 4.35 – Évolution dans le temps de la teneur en eau pour les parcelles Stock60, Stock40, AE et GR sur la période de mesure du 02 juillet 2011 au 30 juin 2014.

Cette différence peut être causée par : i) une évapotranspiration réelle plus importante pour la parcelle AE par rapport aux deux autres parcelles, ii) l'environnement autour des sondes peut être différent (présence de pouzzolane, matière organique ou racines des plantes).

Le suivi de la teneur en eau au sein du substrat des différentes modalités (AE, Stock40 et Stock60) est représenté sur la Fig. 4.35. Un même motif se répète sur toute la durée du suivi, entre 2011 et 2014. Il est constitué de quatre phases : i) proche de la saturation d'octobre à février ; ii) assèchement progressif de mars à mai ; iii) plateau à une valeur assez faible d'humidité (valeur moyenne de 9,8 %) ; iv) augmentation progressive de la teneur en eau. La première phase qui se caractérise par des valeurs très faibles de teneur en eau correspond à des températures élevées et donc aucune présence d'eau dans le substrat. La seconde phase évoquée correspond à des périodes froides où l'évapotranspiration est très faible et les températures ne dépassent pas 10 °C. Le plateau atteint par les différentes modalités (AE, Stock40 et Stock60) est respectivement 44,1 ; 43,8 et 37,7. Ce plateau évolue au cours de la période d'étude pour atteindre en 2014 : 46,2 ; 40,4 et 39,6. La troisième phase – début du printemps – se caractérise par des événements pluvieux plus rares mais plus intenses, des températures extérieures ponctuellement élevées, une évapotranspiration significative et des variations d'humidités dans le substrat beaucoup plus fortes. En effet, les phases de plateau sont beaucoup plus rares et la teneur en eau mesurée par les sondes TDR évolue suivant des épisodes de forte décroissance (écoulement gravitaire, évapotranspiration, fort prélèvement par les racines des plantes), puis de croissance rapide lorsqu'une pluie intervient. L'intensité de l'augmentation de la teneur en eau est sensiblement variable d'une modalité à une autre. Cette intensité diminue entre 2011 et 2014 : de 4 à 9 % en 2011, 5 à 9 en 2013 et 3 à 6 %. Il est à noter que les observations effectuées précédemment (Table 4.10) sur l'existence de teneur en eau à saturation θ_S comme valeur maximale d'humidité atteinte se confirment. En effet, quelque soit l'intensité de la pluie, la teneur en eau volumique ne dépasse pas une valeur maximale de 46 %. Ce pendant, cette valeur n'est pas la même entre les différentes modalités et cette valeur semble avoir évolué au cours du temps. En effet, alors qu'en 2011, la teneur en eau atteignait 44,45 %, au cours de l'année 2012, elle diminue à 43,59 % pour augmenter en 2013 et 2014 respectivement à 45,31 et 46,17 %. Plusieurs hypothèses peuvent être émises : i) phénomènes de submersion au cours des périodes froides conduisant à des valeurs supérieures à la capacité d'absorption du substrat correspondant à θ_S , ii) évolution des propriétés hydriques du substrat à la suite des périodes de gel, du tassement et colonisation des racines, qui conduisent à une évolution de l'architecture porale du substrat.

4.4 Conclusion partielle

4.4.1 Caractéristiques hydriques

Ce volet expérimental de notre étude nous a tout d'abord permis de confirmer et d'approfondir les résultats des caractérisations menées dans le chapitre précédent. Ainsi, le substrat des toitures permet en effet un écoulement de l'eau très rapide, comme en attestent les augmentations des teneurs en eau ou les évacuations (lorsque le milieu est saturé en eau) quelques minutes ou heures après un épisode pluvieux significatif (simulé au laboratoire ou observé à l'échelle du bâtiment). La forte capacité de rétention en eau du substrat a également été démontrée comme l'atteste les valeurs d'humidité volumique élevées mesurées « à l'équilibre » (*i.e.* sans précipitation et avec une évaporation limitée) comprises entre 35 et 45%. Néanmoins les suivis réalisés nous ont également permis d'aller plus loin. En effet, la constitution

même des toitures végétalisées, en particulier la superposition substrat/géotextile/couche de drainage, leur confère un fonctionnement hydrique spécifique. En effet, les flux d'eau à travers le géotextile vers la couche de drainage se font dans un milieu proche des conditions atmosphériques (en particulier pour les modalités équipées des couches de stockage). Ce brutal changement entraîne une condition aux limites très spécifique puisque le potentiel de pression au niveau de cette interface doit être nul (c'est-à-dire que le substrat et le géotextile sont saturés en eau) pour qu'il y ait écoulement. De cette manière, le substrat – dont la porosité est, comme précédemment évoqué, très élevée – est capable de stocker et de retenir une lame d'eau dans sa partie inférieure. Cette condition qui existe dans certains dispositifs expérimentaux, comme les lysimètres (Séré *et al.*, 2012) et que l'on retrouve dans ce Technosol urbain n'a, à priori, pas d'équivalent dans les sols naturels et engendre une hydrodynamique spécifique à la toiture végétalisée. Comme évoqué, ce phénomène qui semble exister lorsque la TV est équipée d'une couche de drainage constituée de billes d'argiles est encore accentué par la présence de la structure de stockage dont le taux de vide est de 95 %.

4.4.2 Performances

Les expérimentations au laboratoire et à l'échelle du bâtiment nous ont également permis de mesurer les performances hydriques réelles des TV qui découlent directement des caractéristiques évoquées ci-dessus. Deux indicateurs ont été retenus : la capacité de stockage d'un événement pluvieux majeur et l'effet retard. Néanmoins, avant de rappeler ici les résultats obtenus, il est important de noter que ces performances dépendent très fortement des conditions initiales d'humidité de la TV et en particulier du substrat. C'est ce qui a pu être démontré à l'échelle du laboratoire, lors de successions rapprochées de forts événements pluvieux, puisque l'écoulement ne débutait qu'après que le substrat ait atteint un certain niveau de teneur en eau. En effet, comme d'autres auteurs l'ont indiqué, lorsqu'une TV est initialement proche de la saturation, ses performances de rétention ou d'effet tampon en sont fortement réduites (Palla *et al.*, 2009, 2012; Berretta *et al.*, 2014). En climat lorrain par exemple, les capacités de stockage des TV sont globalement différentes en périodes estivale et hivernale. La Table 4.9 résume ainsi les performances maximales relevées sur chacune des trois modalités de TV.

TABLE 4.9 – Performances maximales relevées sur chacune des trois modalités (AE, Stock60, Stock40) de TV entre 2011 et 2014.

	Rétention [%]				Effet retard [h]			
	Avec bouchons		Sans bouchons		Avec bouchons		Sans bouchons	
	Hiver	été	hiver	été	hiver	été	hiver	été
AE	39	64	24	82	5	24	3	48
Stock40	69	94	94	96	6	19	7	24
Stock60	74	83	93	98	4	17	8	30

Ces performances peuvent même être significativement contrastées par un contrôle de la hauteur d'eau sur la TV. En effet, la mise en place de bouchons a permis d'atteindre 94 % de rétention en eau, alors que la configuration sans bouchons a permis d'atteindre 98 %. ce qui est logique, lorsque le système de drainage est rempli d'eau, les précipitations suivantes sont immédiatement évacuées sans passer par la couche de drainage.

Ceci étant, au-delà de ces valeurs maximales mesurées ponctuellement, il est apparu par ce suivi à l'échelle du bâtiment que ces performances étaient très variables dans le temps. En effet, de très

fortes variations ont été mesurées – dans des conditions similaires en termes de présence/absence de bouchons – d'une année sur l'autre. De même, sur des laps de temps plus courts et pour des événements pluvieux d'intensité comparable, les quantités d'eau évacuées mesurées à l'échelle du bâtiment ont pu être très différente (Mentens *et al.*, 2006; Palla *et al.*, 2008; Hilten *et al.*, 2008). Il est complexe, à ce stade, d'expliquer cette variabilité qui peut s'expliquer aussi bien par : i) le fonctionnement hydrique propre à chaque modalité de TV, ii) la topographie de la toiture sur laquelle repose les TV, iii) que par des erreurs de mesure des débits évacués.

4.4.3 Évolution des TV

Cette étude nous a également permis de confirmer l'évolution du substrat des toitures végétalisées. En effet, en s'appuyant sur les résultats du chapitre 3, il apparaît bel et bien que le substrat s'est tassé au cours des trois années de suivi. D'autres résultats obtenus sur le même dispositif ont d'ailleurs montré une migration des particules fines au sein du substrat (Schwager *et al.*, 2014). Par ailleurs, le développement de la végétation s'est traduit par un très fort enracinement des sedums, en particulier dans la couche supérieure (0–7 cm) où tout l'espace poral est colonisé par des racines. Comme cela a été constaté, un des résultats majeurs obtenu ici est la démonstration que ces modifications de l'organisation physique de la phase solide du substrat des TV entraînent une évolution de l'hydrodynamique du système. Ceci est en particulier visible au laboratoire où le comportement hydrique du substrat neuf (S_0) est très différent de celui qui est observé sur le substrat vieilli (S_{30}). Ceci constitue de même, un élément supplémentaire qui pourrait expliquer les variations des performances au cours du temps des TV à l'échelle du bâtiment.

TABLE 4.10 – Évolution de la teneur en eau maximale entre 2011 et 2014 pour les différentes parcelles AE, Stock60, Stock40 et GR.

	Teneur en eau maximale (%.vol)			
Parcelle	2011	2012	2013	2014
AE	43,8	43,9	45,9	46,0
Stock60	37,9	44,6	38,6	39,0
Stock40	43,8	44,4	43,3	40,3

Un autre aspect montrant l'évolution des TV est la teneur en eau maximale mesurée par les sondes TDR au cours de l'étude (2011 à 2014). En effet, la Table 4.10 montre que les trois parcelles (AE, Stock40 et Stock60) ont des valeurs maximales différentes. Ces valeurs varient de manière croissante pour la parcelle AE, de manière décroissante pour la parcelle Stock40, alors qu'elles ont un comportement variable pour la parcelle Stock60.

Simulation de l'hydrodynamique d'une TV

Sommaire

5.1	Introduction	98
5.2	Simulation numérique	98
5.2.1	Description du modèle	98
5.2.2	Étude de sensibilité	102
5.2.3	Optimisation des paramètres	103
5.2.4	Fiabilité des résultats	104
5.3	Résultats et discussion	105
5.3.1	Influence des paramètres hydriques sur la modélisation à l'échelle du laboratoire	105
5.3.2	Simulation des constituants de la toiture végétalisée à l'échelle du laboratoire	108
5.3.3	Simulation des constituants de la toiture végétalisée à l'échelle du bâtiment	113
5.4	Conclusion partielle	122

*« Les ordinateurs sont inutiles : ils ne donnent que
des réponses. »*

Pablo PICASSO

5.1 Introduction

La modélisation mathématique des transferts hydriques dans les milieux poreux implique la résolution d'équations différentielles, souvent non linéaires (équation de Richards), dont l'utilisation peut s'avérer être complexe. Par ailleurs, pour modéliser de tels systèmes, il faut aussi définir précisément les conditions aux limites et initiale qui caractérisent le problème considéré. L'objet de ce chapitre est d'apporter des éléments concernant la modélisation et la simulation numérique de milieux poreux complexes tels que les toitures végétalisées.

À l'origine de cette démarche, se pose le constat suivant : le suivi, au cours du temps, du comportement d'une toiture végétalisée (teneur en eau, débits d'eau stockés et relargués, ...) à l'aide des techniques instrumentales ne permet pas d'approches prédictive du fonctionnement de la TV. Recourir à un modèle physique capable de décrire ces mécanismes est donc une nécessité pour assurer leur promotion et les dimensionner au mieux. Comme cela a été évoqué dans le chapitre 2, l'équation de Richards associée au modèle de van Genuchten-Mualem constitue la base physique de cette étude. Étant donné la complexité des matériaux étudiés et des transferts, une solution analytique à notre problématique n'existe pas. La simulation numérique constitue l'alternative de résolution des équations.

Par ailleurs, les méthodes numériques offrent la liberté de traiter différents « cas pratiques » en modulant les propriétés des milieux ainsi que les conditions initiales et aux limites. Dans cette étude, nous n'avons pas développé d'outil numérique propre. Nous avons utilisé un outil de simulation déjà utilisé par d'autres auteurs pour leurs travaux sur les TV (HYDRUS-1D). Il permet de modéliser le transport de l'eau dans un milieu à saturation variable, en géométrie unidimensionnelle. Il permet également de simuler des problèmes stationnaires et transitoires. Ce programme a été développé par (Šimůnek *et al.*, 1998)¹. HYDRUS-1D possède une interface graphique et son codage est réalisé en Fortran.

Dans ce chapitre, après avoir brièvement décrit la technique de résolution, le programme HYDRUS-1D, nous présentons plusieurs résultats de simulation correspondant aux expériences en laboratoire et au suivi *in situ* de différentes TV.

5.2 Simulation numérique

5.2.1 Description du modèle

Plusieurs méthodes numériques ont été développées au cours du siècle dernier pour discrétiser et résoudre les équations aux dérivées partielles. Parmi les techniques les plus connues, on peut citer : les volumes finis, les différences finies et les éléments finis. De nombreux ouvrages décrivent de façon détaillée toutes ces techniques de discrétisation (Humbert, 1984; Lions *et al.*, 2001). L'approche la plus classique consiste à discrétiser spatialement le milieu étudié (Fig. 5.1) pour établir un système d'équations linéaires à partir des grandeurs d'intérêt affectées aux points discrétisés (Neuman et Bresler, 1974).

Origine de la méthode Les premières utilisations de la méthode des différences finies remontent aux années cinquante avec les débuts de l'informatique (Argyris et Kelsey, 1967). La terminologie “différences finies” est issue de la décomposition du domaine étudié selon un maillage sous forme de cellules régulières ou non. Un exemple de maillage, tel que l'on peut le définir dans HYDRUS-1D est proposé sur la figure Fig. 5.2.

¹U.S. Salinity Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Research Service

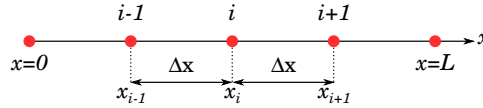


FIGURE 5.1 – Schéma descriptif de la discrétisation en différences finies en géométrie unidimensionnelle. La variable x_i est liée aux variables suivante x_{i+1} et précédente x_{i-1} par le pas spatial de discrétisation i .

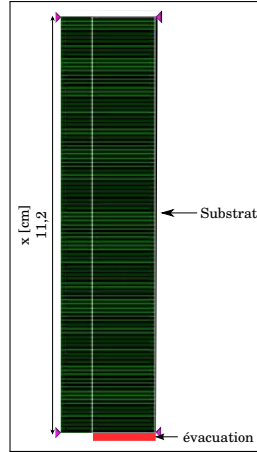


FIGURE 5.2 – Schéma du maillage d'une couche de substrat sous HYDRUS-1D.

Principe de la résolution numérique Le problème étudié est abordé dans le cas d'une géométrie 1D, étant donné la nature de la structure hétérogène étudiée. En effet, les dimensions du système (dimensions de la toiture végétalisée) sont assez grandes pour négliger les effets des bords. L'Eq. 2.10, décrite dans le chapitre 2, donnant les variations de la teneur en eau ne dépend donc que d'une seule variable d'espace x selon la direction verticale ascendante. L'équation de Richards qui décrit le transfert dans un milieu 1D devient :

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right] - S \quad (5.1)$$

Où θ est la teneur en eau, h est la pression matricielle et K la conductivité hydraulique. La résolution de l'Eq. 5.1 en régime instationnaire nécessite la connaissance d'une condition initiale et de deux conditions aux limites. En outre, il faut un modèle de fermeture pour relier la teneur en eau à la pression matricielle. Usuellement, la condition initiale est donnée sur la pression matricielle dans le milieu, on écrit :

$$h(x, t) = h_0(x) \quad , t = t_0 \quad (5.2)$$

Où $h_0(x)$ est la pression matricielle en fonction de la profondeur x à t_0 .

Pour le problème considéré, les conditions aux frontières inférieure et supérieure sont différentes. Pour la face inférieure, on suppose dans un premier temps que la pression matricielle est constante et égale à 0 tout au long de la simulation (conditions seepage face) :

$$h(x, t) = h_0(t) = 0 \quad , x = L \quad (5.3)$$

Cette condition a un impact sur le transfert d'eau en limitant le flux vers le bas (Boufadel *et al.*, 2011). Vu la complexité de l'interface substrat–géotextile, il n'est pas aisé d'identifier la condition limite basse

adéquate, pour se faire nous nous sommes inspiré de différents auteurs qui ont utilisé cette condition dans leurs modélisations (Hilten *et al.*, 2008; Lawrence *et al.*, 2008; Palla *et al.*, 2009; Kasmin et Stovin, 2010; Palla *et al.*, 2012; de Munck *et al.*, 2013; Bond et Thompson, 2013). Une analyse de sensibilité de la condition limite basse pourrait apporter plus d'informations. Cette condition implique que le milieu est saturé à la limite basse. La face supérieure du milieu est assujettie à une condition à la limite de type *Neumann*. Elle permet de représenter les flux d'eau entrant ou sortant. Selon le formalisme employé par Šimůnek *et al.* (2008), la condition à la surface peut s'exprimer directement à partir du flux entrant (précipitation) et du flux sortant (évapotranspiration) ou encore à l'aide de la pression matricielle. Elle s'écrit sous la forme :

$$q_{en} = P - ETP = \left| -K(h) \frac{\partial h}{\partial x} - K(h) \right|, x = L \quad (5.4)$$

avec

$$h_{min} \leq h \leq h_{max}, x = L \quad (5.5)$$

Selon que le flux à la face supérieure est entrant ou sortant, P sera la quantité d'eau infiltrée (précipitation) et ETP sera la flux d'eau sortant ou évapotranspiré [$L.T^{-1}$]. h_{min} ou h_{max} sont respectivement la pression matricielle minimale et maximale à la surface du sol [L]. La pression h_{max} est soit nulle (milieu saturé en surface) soit positive si une fine lame d'eau est présente à la surface du sol lors d'événements pluvieux intenses. La valeur de h_{min} est estimée (Eq. 5.6) à partir de la condition d'équilibre entre la quantité d'eau présente dans le sol et la quantité de vapeur présente dans l'atmosphère (Feddes *et al.*, 1974).

$$h_{min} = \frac{RT}{Mg} \ln(H_r) \quad (5.6)$$

où M est la masse molaire de l'eau ($0,018 \text{ kg.mol}^{-1}$), g est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$), R est la constante des gaz parfait ($8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et H_r et l'humidité relative de l'air [%].

Dans la pratique, pour le problème qui nous intéresse, ce type de condition à la limite peut à la fois être imposé sur la face supérieure (précipitation) ou inférieure (drainage). Si la condition de type Neumann est spécifiée à la limite basse, les coefficients sont obtenus par discrétisation de la loi de Darcy (Eq. 2.7) :

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} - K \quad (5.7)$$

Par ailleurs, si l'on applique la condition de type Neumann à la face supérieure pour modéliser les précipitations, la formulation précédente (Loi de Darcy), n'est pas toujours stable. C'est notamment le cas quand le flux d'eau entrant varie énormément au cours du temps. Il est alors recommandé de procéder à un bilan massique à cette frontière.

La résolution du système d'équations linéaires (Eq. E.8) peut être envisagée avec plusieurs techniques, comme la décomposition LU, les méthodes de gradient conjugués ou encore la méthode de Gauss-Jordan (méthode du pivot) (Šimůnek, 2006). Cette méthode est utilisée par HYDRUS-1D car elle est bien adaptée à la résolution matricielle de l'équation de Richards (Šimůnek *et al.*, 2008). Plus de détails sur cette méthode sont donnés dans différents ouvrages de référence (Gilli, 2006; Sarraf *et al.*, 2012; Atasoya *et al.*, 2012). Ils ne font pas l'objet de développement dans ce travail dans la mesure où le logiciel utilisé n'a pas été modifié pour les calculs réalisés dans la suite de cette étude.

Calcul de l'évapotranspiration Il existe différentes méthodes d'évaluation de ce flux : expérimentales, théoriques et introduites dans des modèles.

Nous avons pu voir que l'évapotranspiration, qui est le phénomène couplé de l'évaporation de l'eau et de la transpiration des plantes, dépend du bilan d'énergie et du bilan hydrique. Il existe plusieurs façons de décliner quantitativement l'évapotranspiration : potentielle (qui repose sur des hypothèses de couvert végétal, d'alimentation hydrique...) et réelle.

L'intérêt de connaître l'évapotranspiration est de pouvoir évaluer le besoin en eau d'une culture. C'est dans cette idée que la majeure partie des méthodes ont été développées. L'évapotranspiration s'estime par la résolution du bilan hydrique et du bilan d'énergie afin d'améliorer l'évaluation du comportement hydrique sur la toiture végétalisée.

L'évaluation de l'évapotranspiration peut découler de méthodes expérimentales (Ouldboukhité *et al.*, 2012), mais les applications sont souvent compliquées et ne sont pas adaptées à n'importe quelle végétation.

L'évapotranspiration est déterminée dans le logiciel en se basant sur la formule de Penman-Monteith combinant les travaux de Penman (1948) et poursuivi par Monteith (1965). La formule de Penman-Monteith est basée sur des méthodes utilisant l'approche aérodynamique (résistance aérodynamique) et l'approche végétale (résistance du couvert végétal) avec le bilan énergétique. Cela permet d'éliminer la détermination de la température de surface. Ramier (2005) montre que les méthodes qui se basent sur le bilan énergétique semblent fournir de meilleurs résultats, même si par moment, elles fournissent une valeur de quantité d'eau évapotranspirée alors que le sol est sec.

Afin d'intégrer le calcul de l'évapotranspiration dans la simulation, nous avons considéré une hauteur de végétation basée sur le relevé fait à t_{30} mois de 7,5 cm, une résistance stomatique de 150 s.m^{-1} utilisée par de Munck *et al.* (2013), un indice de surface foliaire (LAI) de 3 mesuré par Doya *et al.* (2011), un albédo dans les courtes et grandes longueurs d'ondes de 0,154 (Doya *et al.*, 2011). Ouldboukhité *et al.* (2012) ont mesuré un coefficient cultural k_c de 0,75.

Le détail de ce calcul est présenté en Annexe D.

Introduction de l'hystérèse Le programme HYDRUS-1D intègre le phénomène d'hystérèse en utilisant le modèle empirique de Kool et Parker (1987) qui est une variante du modèle de Scott *et al.* (1983) décrit dans le chapitre 2, qui tient compte de l'air emprisonné dans les pores du substrat. Les courbes de rétention (humectation et dessiccation) sont issues du modèle de van Genuchten (1980). Elles utilisent différents set de paramètres, à la fois pour la phase de dessiccation (θ_r^d , θ_S^d , α^d , n^d) et pour la phase d'humectation (θ_r^h , θ_S^h , α^h , n^h). Dans ces équations, d et h indiquent respectivement le drainage et l'humidification. Dans nos simulations les principales hypothèses faites sont :

$$\theta_r^d = \theta_r^h = \theta_r \quad (5.8)$$

et

$$n^d = n^h = n \quad (5.9)$$

De plus

$$\theta_S^d = \theta_S^h = \theta_S \quad (5.10)$$

Aussi, la conductivité hydraulique à saturation est identique pour les deux phases (dessiccation et humectation) (Kool et Parker, 1987) :

$$K_S^d = K_S^h \quad (5.11)$$

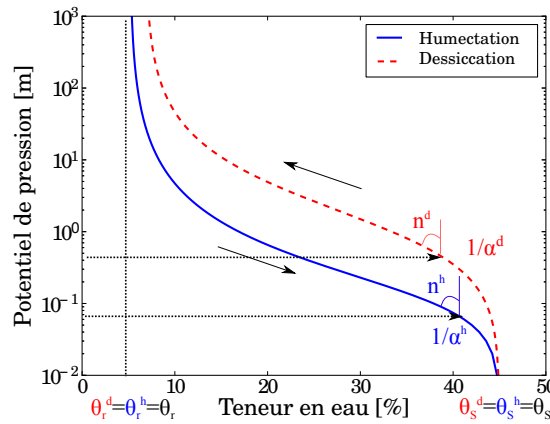


FIGURE 5.3 – Représentation des hypothèses de l'effet d'hystérèse, courbe de dessiccation (ligne rouge discontinue), courbe d'humectation (ligne continue bleue)

Enfin, première approximation, vu le nombre de paramètres du modèle et le manque de données sur la caractérisation du phénomène d'hystérèse, nous faisons l'hypothèse sur le paramètre α (Kool et Parker, 1987; Nielsen et Luckner, 1992) :

$$\alpha^h = 2 \cdot \alpha^d \quad (5.12)$$

Nous avons choisi de considérer les équations 5.8 à 5.11, c'est-à-dire les paramètres (θ_s , K_s , n) identiques dans une première approche, d'une part, pour limiter le nombre de paramètres hydriques à optimiser. D'autre part, cette hypothèse a une légère influence sur l'amélioration des performances du modèle. Dans la plupart des études, les deux teneurs en eau à saturation θ_s^d et θ_s^h (Hopmans et Dane, 1986) sont différentes à cause de l'air emprisonné lors de la phase de ré-humidification (Abbasi *et al.*, 2012). L'Eq. 5.12 est basée sur l'approximation de Kool et Parker (1987). La Fig. 5.3 résume les hypothèses de travail.

5.2.2 Étude de sensibilité

Précédemment, nous avons présenté les principes de la discrétisation et de la résolution de l'équation de Richards caractérisant le transfert hydrique dans le substrat. Par ailleurs, dans le chapitre 3, nous avons utilisé plusieurs méthodes de laboratoire pour caractériser les propriétés des différentes couches de la toiture végétalisée, dont le substrat. À l'issue de cette démarche, nous avons pu déterminer un set de paramètres hydriques et physiques utilisable dans les diverses simulations. Avant de présenter les résultats de simulation, il est utile de connaître l'influence des paramètres (données d'entrée du modèle) sur le comportement hydrique de la toiture. En effet, van Genuchten (1980), Chiu *et al.* (2012) ont démontré qu'une faible variation des paramètres α et n , pouvait avoir un impact conséquent sur l'allure de la courbe de saturation et donc sur les résultats obtenus par simulation numérique (voir Fig. 2.11).

Afin d'évaluer l'importance des paramètres du modèle proposé, nous avons réalisé une analyse de sensibilité (AS) uniquement sur le substrat à l'état initial S_0 . Cette analyse n'a pas été réalisée pour le substrat à l'état évolué S_{30} du fait d'un trop grand nombre de paramètres hydriques des deux sous-couches. L'objectif de l'AS est de déterminer l'effet des variables d'entrée du modèle telles que (θ_r , θ_s , α , n , K_s) sur les variables de sortie du modèle : teneur en eau (θ) et quantité d'eau sortante Q_{out} . L'AS est un outil très précieux car elle permet d'analyser l'influence des différentes variables sur la précision du

modèle (Saltelli *et al.*, 2008). Elle permet également d'étudier les éventuelles interactions (dépendances ou corrélations) entre les paramètres hydriques (θ_r , θ_s , α , n , K_s). D'un point de vue mathématique, la démarche suivie consiste à faire varier chaque paramètre noté p_l séparément. On peut ainsi exprimer l'indice de sensibilité s_{p_l} par rapport à une variable de sortie X par une dérivée partielle (Lenhart *et al.*, 2002; Yao *et al.*, 2003)

$$s_{p_l} = p_l \frac{\partial X}{\partial p_l} \quad (5.13)$$

La sensibilité s_{p_l} possède la même dimension que la variable observée (X). En pratique, la formule de dérivation (Eq. 5.13) est calculée par un schéma aux différences finies centrées en perturbant seulement un seul paramètre p_l par rapport au set de paramètre $\vec{p}_{ref}$ (θ_r , θ_s , α , n , K_s). On écrit alors :

$$s_{p_l} \approx p_l \left[\frac{X(t, \vec{p}_{ref} + \varepsilon \vec{e}_l) - X(t, \vec{p}_{ref} - \varepsilon \vec{e}_l)}{2\varepsilon} \right] \quad (5.14)$$

où ε est la variation relative locale du paramètre, qui doit être "suffisamment petite" pour permettre l'analyse de sensibilité. Dans les calculs, on pose $\varepsilon=0,03$ (Séré *et al.*, 2012). Si la variation de ε est suffisamment petite, l'erreur liée au développement de Taylor au premier ordre est plus faible (Magenet *et al.*, 2008). En comparant les différents indices s_{p_l} calculés, nous pouvons hiérarchiser les paramètres suivant leur degré d'influence sur les sorties du modèle.

Un indice de sensibilité nul signifie que le paramètre n'est pas sensible et qu'il n'influence pas la variable X , plus la valeur de l'indice est élevée, plus son influence l'est aussi.

Pour compléter l'analyse de sensibilité et déterminer les interactions entre les paramètres hydriques, le coefficient de corrélation $R(p_i, p_j)$ entre deux paramètres p_i et p_j (faisant référence aux paramètres hydriques) est calculé en utilisant l'expression (Gunzburger et Magenet, 2014) :

$$R(p_i, p_j) = \frac{\overline{s_{p_i} s_{p_j}} - \overline{s_{p_i}} \overline{s_{p_j}}}{\sqrt{\left(\overline{s_{p_i}^2} - \overline{s_{p_i}}^2\right) - \left(\overline{s_{p_j}^2} - \overline{s_{p_j}}^2\right)}} \quad (5.15)$$

où le symbole noté $\bar{s}$ est la valeur moyenne de la quantité s sur l'ensemble des pas de temps. Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés à la section (§ 5.3.1) l'analyse de sensibilité est orientée vers les paramètres hydrodynamiques. Les conditions aux limites, en particulier la condition limite inférieure jouent certes un rôle non négligeable sur le comportement hydrodynamique et les transferts hydriques. La condition limite supérieure (précipitation) est une donnée d'entrée du modèle. Nous avons aussi considéré l'évapotranspiration comme donnée d'entrée du modèle, même si un calage du modèle en fonction de l'évapotranspiration aurait été le bienvenu. Un projet de Recherche va porter sur le calage du modèle hydrodynamique en fonction de l'évapotranspiration (Projet TERRACES²).

5.2.3 Optimisation des paramètres

Pour améliorer la correspondance entre calculs et mesures de référence, il est possible de procéder à l'optimisation des sets de données d'entrée à l'aide d'un module d'inversion du logiciel HYDRUS-1D. Le fonctionnement de cet outil est classique, il est basé sur la minimisation d'une fonction objectif Φ qui représente la différence entre les valeurs observées et les valeurs calculées. L'optimisation se fait avec un algorithme de Marquardt (1963). Lors du processus de minimisation, l'estimation des paramètres est

²Toitures végétalisées pour RafRaichir les Ambiances climatiques urbaines

améliorée par une méthode itérative jusqu'à ce que la fonction Φ atteigne la précision voulue.

L'objectif de la modélisation inverse est d'estimer les paramètres d'un modèle à partir d'observations détaillées des variables de ce dernier. Cette approche est possible si le modèle qui caractérise ce système est parfaitement défini (Vanclooster et Bielders, 2004). Cette démarche stipule que les variables sont supposées connues, ceci s'avère parfois être un inconvénient par rapport à des méthodes directes, qui supposent des paramètres hydriques connus pour décrire les variables du modèle (Vereecken *et al.*, 1997).

Les variables considérées ici sont les densités de flux d'eau et les teneurs en eau du substrat à différentes profondeurs. Les paramètres sont les données hydriques décrivant la relation $h(\theta)$. Le modèle de transfert est l'équation de Richards, sous sa forme différentielle en écoulement unidimensionnel instationnaire. La fonction objectif prend la forme suivante :

$$\Phi(b, q) = \sum_{j=1}^{m_q} v_j \sum_{i=1}^{n_{qj}} w_{i,j} [q_j^*(x, t_i) - q_j(x, t_i, b)]^2 \quad (5.16)$$

où q_j^* est la grandeur observée et q_j est la grandeur simulée. Pour les calculs que nous avons menés, ces deux variables sont la teneur en eau dans le substrat et le débit d'eau sortant cumulé. Les facteurs de pondération v_j et $w_{i,j}$ sont respectivement associés à un set de mesure et à un point de mesure (importance dans la fonction objective pour l'optimisation). m_q représente le nombre d'ensembles de mesures (teneur en eau et quantité d'eau mesurée), n_{qj} est le nombre de mesures (Šimůnek *et al.*, 2005). Nous avons pris la valeur de 1 pour les deux facteurs de pondération associés aux grandeurs teneur en eau et débit d'eau sortant cumulés, afin de ne pas biaiser les calculs et favoriser une des grandeurs de l'identification.

Un set de paramètres est considéré comme la solution optimale lorsque l'erreur (erreur des moindres carrés) entre les valeurs simulées et les valeurs réelles est inférieure à 1 % (Hwang et Powers, 2003). Des études similaires s'appuient sur ce critère pour vérifier l'unicité de l'inversion (Šimůnek et van Genuchten, 1996; Inoue *et al.*, 1998; Hwang et Powers, 2003). En outre, cette approche offre une information en ce qui concerne les paramètres hydriques optimisés (intervalle de confiance et coefficients de corrélations (Ngo *et al.*, 2013)). En résumé cette méthode est très efficace et est couramment mise en œuvre en sciences du sol et en hydrologie (van Genuchten, 1981; Kool *et al.*, 1985). Il est cependant à noter que cette approche de résolution mathématique est à appliquer avec une certaine prudence, en veillant en particulier à conserver un sens physique aux paramètres issus de l'optimisation. Ainsi, certains choix, qui seront explicités ultérieurement, ont été appliqués aussi bien sur les paramètres à optimiser que sur les gammes de valeurs de ces paramètres.

5.2.4 Fiabilité des résultats

Pour évaluer l'adéquation entre le résultat des simulations et les fonctions objectifs, provenant des données expérimentales présentées dans le chapitre 4, deux indicateurs ont été utilisés.

Le coefficient de *Nash-Sutcliffe* (NSE) (Nash et Sutcliffe, 1970) est employé pour quantifier la qualité du modèle reproduisant les valeurs observées des quantités d'eau sortantes. Cet index peut varier de $-\infty$ à 1. Lorsque $NSE=1$, la simulation reproduit parfaitement les données expérimentales. Quand ce dernier est égale à 0, la précision de la simulation est du même ordre de grandeur que les mesures. Enfin, une valeur de NSE inférieure à zéro indique que la simulation n'est pas bonne (Hingray *et al.*, 2009). Le

coefficient NSE est défini comme :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs,i} - x_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{obs,i} - \bar{x}_{obs})^2} \quad (5.17)$$

Avec x_{obs} et x_{sim} qui sont respectivement les valeurs observées et simulées à un temps donné i et $\bar{x}_{obs}$ la valeur moyenne des valeurs observés.

Un second indicateur a été utilisé pour évaluer les simulations des teneurs en eau : l'erreur des moindres carrés normalisée (nRMSD). Il est fréquemment utilisé pour comparer l'écart avec les valeurs mesurées. C'est un coefficient adimensionnel. Plus le coefficient nRMSD est proche de zéro, meilleure est la simulation. Il s'écrit :

$$nRMSD(x_{sim}, x_{obs}) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{sim,i} - x_{obs,i})^2}{n}}}{x_{obs}^{max} - x_{obs}^{min}} \quad (5.18)$$

5.3 Résultats et discussion

5.3.1 Influence des paramètres hydriques sur la modélisation à l'échelle du laboratoire

Avant de détailler les simulations numériques, nous avons eu recours à l'analyse de sensibilité décrite dans le § 5.2.2. Cette méthode nous permet dans une première approche, de définir les paramètres hydriques qui influencent le plus le comportement hydrodynamique, pour réduire et limiter le nombre de paramètres à optimiser. Nous avons pour cela utilisé différents sets de paramètres hydriques (résultats du chapitre 3, Table 3.6). La Fig. 5.4 montre l'influence des différents paramètres hydriques (θ_r , θ_s , α , n , K_s) par rapport aux variables teneur en eau (θ) et quantité d'eau sortante cumulée (Q_{out}). Cette étude de sensibilité est faite sur la base de l'expérience de Saturation/Drainage pour les substrat S_0 . Nous observons deux périodes : i) la première entre 0 et 40 min qui correspond à la période de saturation/désaturation (phases d'injections de l'eau) et la seconde entre 40 min et 180 min, qui correspond à la période de drainage. Au cours de la première période (Fig. 5.4a), il est possible de noter que les quatre paramètres θ_r , θ_s , n et α ont un indice de sensibilité important pour la variable θ entre 15 et 35 min, ce qui correspond aux périodes d'injection d'eau. Les indices de sensibilité des autres paramètres, spécifiques de la courbe de conductivité hydraulique $K(h)$, sont négligeables en comparaison avec les premiers, cela est dû à une macro-porosité importante du substrat, qui favorise le drainage de l'eau. Au cours de la seconde période (40 à 180 min), la sensibilité n'évolue pas (indice de sensibilité allant de 10^{-1} à 10^1) avec une tendance plus importante pour le paramètre α par rapport aux autres paramètres hydriques (θ_r , θ_s et n) (ordre de grandeur deux fois plus important). Cette phase correspond à la période de drainage. En résumé, même après la fin des injections, les paramètres hydriques continuent d'influencer le transfert hydrique dans le substrat.

Un constat différent est fait pour la variable Q_{out} (Fig. 5.4b), entre 0 et 40 min, aucun des paramètres hydriques n'influence le transfert d'eau, ce qui est logique puisqu'il n'y a pas encore d'eau évacuée. Par contre, au cours de la seconde période (40 à 180 min), nous observons que les paramètres hydriques (θ_r , θ_s , α et n) influencent la variable Q_{out} (indice de sensibilité de l'ordre de 10^3). Les paramètres

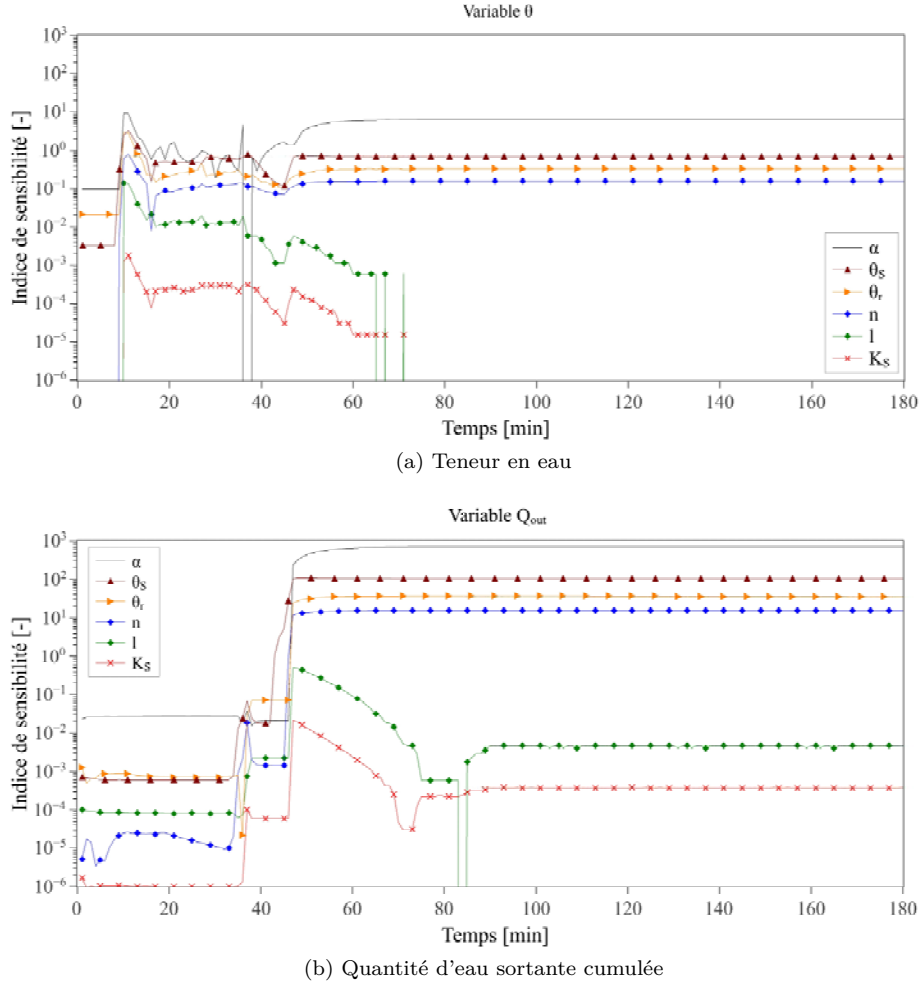


FIGURE 5.4 – Représentation de la sensibilité des paramètres hydriques (θ_r , θ_s , α , n , K_s) sur les variables : (a) teneur en eau (θ) et (b) la quantité d'eau sortante cumulée (Q_{out}) pour le substrat S_0

spécifiques la courbe $K(h)$, à savoir la conductivité hydraulique à saturation K_S et la tortuosité l ne sont pas sensibles du fait d'un drainage trop rapide, comme le montre la Fig. 5.5

La Table 5.1 résume qualitativement l'influence de chaque paramètre sur les deux variables que sont la teneur en eau et la quantité d'eau sortante cumulée. Il ressort de cette analyse que deux paramètres hydriques (θ_s et α) influencent grandement le transfert hydrique.

TABLE 5.1 – Influence des paramètres hydriques sur les variables étudiées (θ et Q_{out}). + indique une forte influence par rapport à la variable et – indique une faible voire aucune influence par rapport à la variable considérée

	θ_r	θ_s	α	n	K_S	l
θ	+	+	+	+	–	–
Q_{out}	+	+	+	+	–	–

L'objectif est de diminuer le nombre de paramètres hydriques pour se rapprocher de la solution optimale et déterminer le meilleur set de paramètres hydriques du modèle. Les résultats de l'analyse des corrélations entre les différents paramètres hydriques du modèle sont représentés dans la Table 5.2. Il apparaît que pour la variable *teneur en eau* θ , les paramètres θ_r , θ_s , n , K_S et l sont très corrélés. Ils ne

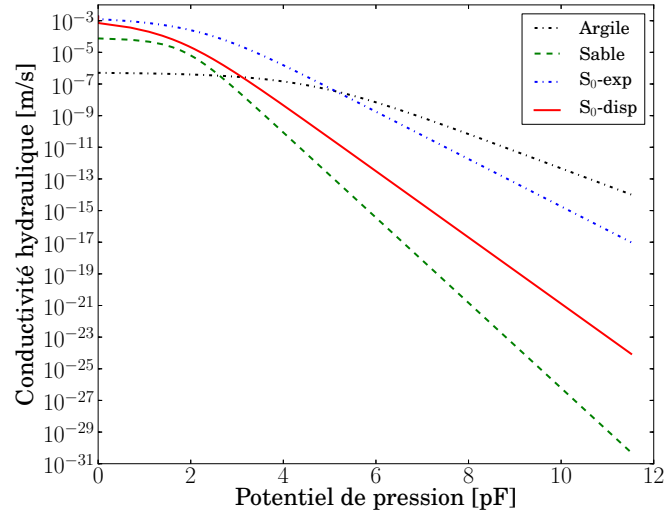


FIGURE 5.5 – Représentation de la courbe de conductivité hydraulique selon le modèle de Mualem (1976), sol argileux (ligne noire discontinue), sol sableux (ligne discontinue verte), substrat S_0 -disp (ligne continue rouge) et substrat S_0 -exp (ligne mixte bleue)

peuvent être déterminés indépendamment les uns les autres. Ceci est tout particulièrement vrai pour les couples (θ_S, n) et (K_S, l) qui sont eux aussi fortement corrélés. Les paramètres hydriques les plus sensibles listés dans la Table 5.1 (e.g. θ_S, α), sont au contraire décorrélés. Ils seront alors optimisés de manière privilégiée et éventuellement conjointement.

Pour la variable *quantité d'eau sortante* (Q_{out}), ce ne sont pas les mêmes paramètres hydriques qui sont corrélés. Les couples (θ_r, θ_S) ; (θ_r, α) ; (K_S, l) et (α, n) sont fortement corrélés (0,99). L'analyse de sensibilité indique que les paramètres hydriques sensibles sont le paramètre α, n, θ_r et θ_S . Ainsi, en se basant sur les corrélations et l'analyse de sensibilité, nous obtenons un set de paramètres hydriques en optimisant uniquement les paramètres α et θ_S pour être aussi cohérent avec l'optimisation par rapport à la variable θ .

TABLE 5.2 – Corrélation des paramètres hydriques par rapport aux variables étudiées (θ et Q_{out}). Une corrélation supérieure à 0,8 est considérée comme forte par rapport à la variable en question

	Variable θ							Variable Q_{out}					
	θ_r	θ_S	α	n	K_S	l		θ_r	θ_S	α	n	K_S	l
θ_r	1						θ_r	1					
θ_S	0,92	1					θ_S	0,99	1				
α	0,36	0,48	1				α	0,99	0,48	1			
n	0,94	0,98	0,54	1			n	1	1	0,99	1		
K_S	0,8	0,73	0,22	0,69	1		K_S	0,11	0,21	0,01	0,13	1	
l	0,9	0,77	0,06	0,76	0,96	1	l	0,1	0,2	0,02	0,12	0,99	1

Teneur en eau à saturation et résiduelle L'analyse de sensibilité montre que la teneur en eau θ est influencée par la teneur en eau à saturation lors des périodes d'injection. Aussi, il y a une forte corrélation entre les deux teneurs en eau "résiduelle" et à "saturation" concernant la variable "quantité d'eau sortante cumulée" Q_{out} . La teneur en eau à saturation peut être considérée en première approche

comme un indicateur des transferts d'eau dans le substrat

Paramètre α Les corrélations du paramètre α sont très fortes avec les autres paramètres θ_r , θ_S et n pour la variable Q_{out} et elles sont plus faibles pour la variable θ . L'optimisation du paramètre α s'avère difficile par rapport à la variable Q_{out} en raison d'une relation de non linéarité avec le paramètre n (Eq. 2.12).

Paramètre n Le paramètre n est corrélé à θ_r , θ_S et α pour la variable Q_{out} et seulement à θ_r , θ_S pour la variable θ . Ceci étant, pour les deux variables, ce paramètre n'est pas très sensible comme nous avons pu le constater sur la Table 5.1.

Conductivité hydraulique à saturation K_S La conductivité hydraulique à saturation est initialement déterminée par la méthode de la charge constante. L'influence de ce paramètre sur les deux variables se révèle minime (Table 5.1). La modification de K_S impacte modérément la teneur en eau dans le substrat et encore moins le débit sortant Q_{out} .

Paramètre l Le paramètre l définit la forme de la courbe de conductivité hydraulique. Il est aussi lié à la tortuosité du milieu poreux. Initialement, ce terme était fixé à 0,5 (Mualem, 1976). Récemment, différents auteurs suggèrent de modifier ce paramètre en vue d'améliorer l'efficacité de leurs modèles (Schaap et Leij, 2000; Hwang et Powers, 2003; Séré *et al.*, 2012). Le paramètre l est corrélé avec l'ensemble des autres paramètres hormis α . Le paramètre tortuosité est souvent utilisé comme lien entre la structure porale d'un sol et la perméabilité macroscopique (conductivité hydraulique à saturation) (Guo, 2012).

Nous avons identifié l'influence des différents paramètres hydriques vis-à-vis des variables hydriques (teneur en eau et quantité d'eau sortante) et leurs corrélations respectives pour le modèle de van Genuchten (1980). L'analyse de sensibilité révèle que ce sont les paramètres α , θ_S qui influencent le plus le comportement hydrique du modèle. Le paramètre θ_r est peu sensible et aucune validation expérimentale n'est réellement possible. La gamme de variation du paramètre θ_S est fondée sur les mesures du fournisseur et celles réalisées au LSE. Il n'y a pas de mesures pour estimer la gamme de variation du paramètre α , de ce fait l'optimisation de ce dernier se base sur les données bibliographiques.

5.3.2 Simulation des constituants de la toiture végétalisée à l'échelle du laboratoire

Deux sets de paramètres hydriques ont été utilisés pour la simulation du comportement hydrique du substrat (voir Table 5.3). Le premier set avec la référence « exp », qui désigne les paramètres hydriques obtenus par la méthode d'évaporation (Table 3.6) et le second set avec la référence « disp », qui correspond aux paramètres dérivant de la méthode d'optimisation. L'écart entre les valeurs optimisées et expérimentales est variable ; il est particulièrement important pour le paramètre α (115,8 %).

Les deux simulations des teneurs en eau S_0 -exp (ligne discontinue) et S_0 -disp (ligne discontinue avec point) (Fig. 5.6a) augmentent d'une valeur de $0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jusqu'à respectivement $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ et $0,37 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ à la fin de l'expérience. Trois périodes sont distinguées : i) période de saturation intense (entre 0 et 16 min), ii) période d'humectation-drainage interne (entre 16 et 45 min) et iii) période d'humectation-drainage-évacuation lent (entre 45 et 120 min). La teneur en eau simulée reproduit correctement les valeurs observées jusqu'à 16 min. Ensuite, l'ensemble de la dynamique (augmentation

TABLE 5.3 – Paramètres hydriques de van Genuchten pour le substrat S_0 ; données mesurées et optimisées sur la base de la teneur en eau et des débits sortants cumulés.

Paramètres	Unité	Mesure Ku-pf	Optimisation HYDRUS-1D	Écart [%]
		S_0 -exp	S_0 -disp	
θ_r	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$	0,05	$0,08 \pm 0,03$	+62,50
θ_s	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$	0,45	$0,51 \pm 0,05$	+10,10
α	m^{-1}	8,02	$17,32 \pm 2,48$	+115,80
n	-	1,58	1,58	0
K_s	mm.s^{-1}	2,16	$1,83 \pm 0,7$	-18,03
l	-	0,5	$2,87 \pm 0,9$	+17,42

rapide et diminution lente) est globalement sous-estimée. Le même décalage subsiste jusqu'à la fin de l'expérience (16 à 120 min). Le set S_0 -disp présente un meilleur résultat que le set S_0 -exp. Ceci est illustré par un meilleur nRMSD (0,08 comparé à 0,13). La valeur maximale de teneur en eau atteinte par les deux sets S_0 -disp et S_0 -exp est proche ($0,43 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$). Le set de paramètres optimisés simule bien la quantité d'eau sortante cumulée (4,7 mm) en comparaison avec la quantité d'eau sortantes mesurées (5,1 mm), même si la dynamique du processus n'est pas entièrement retrouvée. En revanche, les paramètres initiaux (S_0 -exp) conduisent à une surestimation modérée des quantités d'eau évacuées. La fiabilité des deux simulations est démontrée à l'aide du coefficient de Nash (NSE) : il est respectivement de 0,89 pour le set S_0 -exp et de 0,91 pour le set S_0 -disp.

Ces résultats obtenus sur le substrat S_0 sont globalement satisfaisants. Ils permettent d'entreprendre une prédiction de l'évolution des performances hydriques du substrat à l'état évolué *in situ* S_{30} .

Vieillessement Comme ceci a été démontré dans le chapitre 4, le développement de la végétation s'est traduit par un très fort enracinement des sedums, en particulier dans la couche supérieure (0-7 cm) où tout l'espace poral est colonisé par des racines. Dans la suite de l'étude, nous testerons ainsi une hypothèse de différenciation en deux sous horizons (sous couches), qui sont désignés par S_{30} -haut (0 - 7 cm) et S_{30} -bas (7-13 cm).

Ainsi deux scénarios distincts d'optimisation ont été utilisés. Le premier (S_{30} -disp) est évalué en considérant une seule couche de substrat, le second en sub-divisant la couche de substrat en deux sous-couches, ce qui correspond à deux sets de paramètres distincts (S_{30} -haut-disp et S_{30} -bas-disp) (Table 5.4).

TABLE 5.4 – Paramètres hydriques de van Genuchten pour le substrat S_{30} ; données optimisées.

Matériau	θ_r ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	θ_s ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	α (m^{-1})	n (-)	K_s (mm.s^{-1})	l (-)
S_{30} -disp	0,05	0,49	13,4	3,47	2,25	8,72
S_{30} -haut-disp	0,05	0,39	14,96	2,04	2,16	0,5
S_{30} -bas-disp	0,05	0,49	56,9	1,31	2,16	0,5

La Fig. 5.7 compare les simulations obtenues pour les deux scénarios, avec les données observées de l'évolution de la teneur en eau dans le substrat S_{30} et la quantité d'eau sortante cumulée. L'évolution de la teneur en eau peut à nouveau être découpée en trois phases, similaires à l'expérimentation précédente : i) de 0 à 10 min, ii) de 10 à 45 min et iii) de 45 min à 2 h. Le comportement général est le même que pour S_0 (Fig. 5.6). Le set S_0 -disp obtenu précédemment simule de manière très médiocre la dynamique de

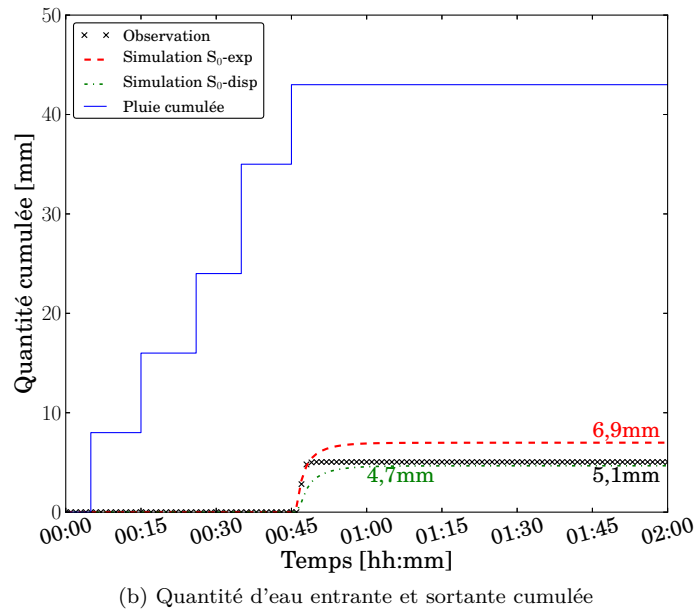
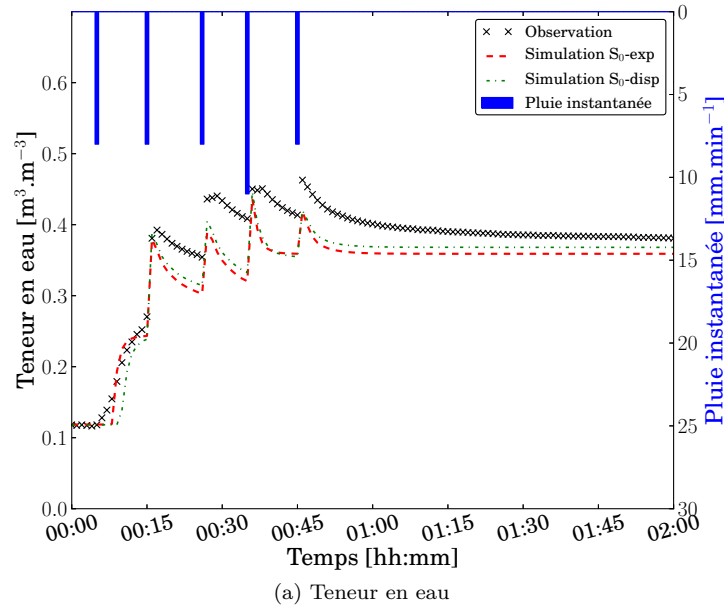
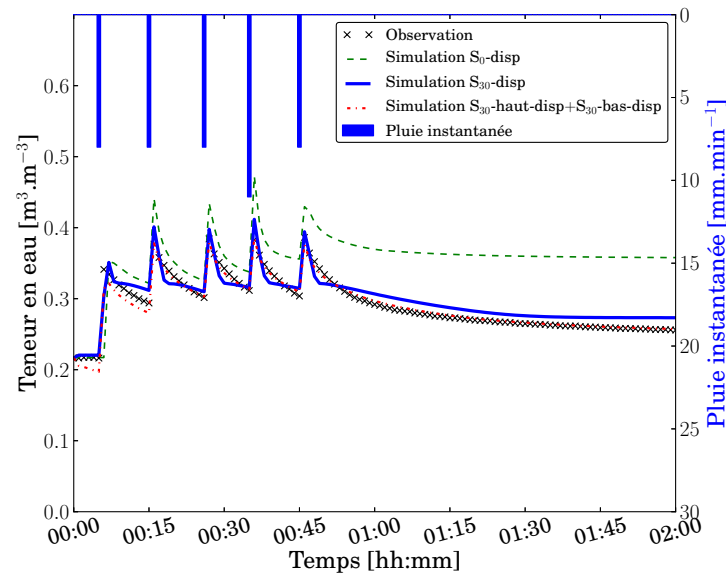
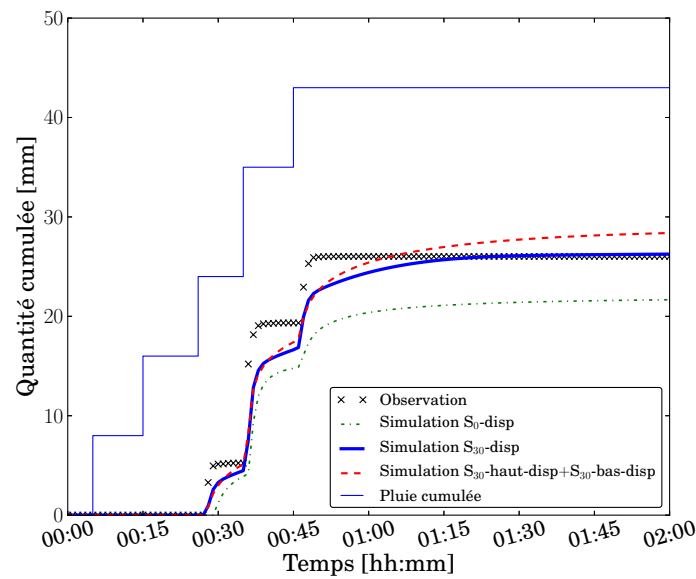


FIGURE 5.6 – Simulation du comportement hydrodynamique pour l'expérience saturation/drainage ; intensité de pluie (barre), quantité de pluie cumulée (ligne bleue), mesure de la teneur en eau et quantité d'eau sortante (croix noire), simulation de la teneur en eau et la quantité d'eau sortante avec set de paramètre S_0 -exp (ligne discontinue rouge) et simulation de la teneur en eau et de la quantité d'eau sortante avec le set optimisé S_0 -disp (ligne discontinue verte)

teneur en eau ($nRMSD=0,55$), ainsi que la quantité d'eau évacuée ($NSE=0,53$). Ce résultat est cohérent avec l'évolution des propriétés physiques mesurées dans le chapitre 3. Au contraire, la teneur en eau simulée après optimisation pour les deux scénarios est globalement satisfaisante, en particulier lorsque le système à deux sous-couches est considéré ($nRMSD<0,06$). Par ailleurs, le scénario mono-couche reproduit mieux les quantités d'eau évacuées (26,3 mm ; $NSE=0,98$) que celui des deux sous-couches



(a) Teneur en eau



(b) Quantité d'eau entrante et sortante cumulée

FIGURE 5.7 – Simulation du comportement hydrodynamique pour l'expérience saturation/drainage avec le substrat vieilli S_{30} ; intensité de pluie (barre), quantité de pluie cumulée (ligne bleue fine), mesure de la teneur en eau et quantité d'eau sortante (croix noire), simulation du comportement du substrat en utilisant les paramètres hydriques optimisés pour une seule couche de substrat à l'état « initial » S_0 -disp (ligne verte discontinue), simulation du comportement du substrat en utilisant les paramètres hydriques optimisés pour une seule couche de substrat « évolué » S_{30} -disp (ligne bleue épaisse), simulation du comportement du substrat en utilisant les paramètres hydriques optimisés pour deux couches de substrat « évolué » S_{30} -haut-disp+ S_{30} -bas-disp

(28,3 mm, NSE=0,95).

Pour compléter l'étude sur l'évaluation des paramètres du substrat et son vieillissement, la distribution des tailles de pores pour les différents sets de paramètres du substrat (S_0 -disp, S_{30} -haut-disp, S_{30} -bas-disp) a été obtenue en utilisant l'équation de Laplace (Eq. 3.5) et le résultat est présenté dans la Fig. 5.8.

Dans tous les cas, le rayon équivalent de la majorité des pores est inférieur à $1000\text{ }\mu\text{m}$. L'optimisation conduite en considérant deux sous-couches indiquerait une évolution de l'architecture porale. En surface du substrat, une augmentation de l'abondance des pores de rayon entre 100 et $1000\text{ }\mu\text{m}$ serait observé, alors que celle-ci diminueraient en profondeur. En parallèle, les pores les plus fins disparaîtraient de la surface pour être plus abondants en profondeur. Cette différenciation pourrait s'expliquer par une migration verticale vers le bas des particules les plus fines – stoppés au niveau du géotextile – du substrat au cours du temps. Ce phénomène issu de la modélisation est d'ailleurs en accord avec les observations conduites par Schwager *et al.* (2014) sur le même dispositif. Une autre hypothèse consiste à attribuer cette augmentation de la taille des pores à l'effet mécanique des racines – très présentes en surface du substrat – qui élargirait les pores existants.

La composition organique du substrat lui confère un caractère hydrophobe. Nieber (1996) a montré que l'hydrophobicité crée un flux instable traduit par des chemins préférentiels. Ces derniers modifient la distribution des pores en favorisant la formation de macro-pores. Cette hypothèse est vérifiée sur la Fig. 5.8. La distribution montre une hétérogénéité avec une distribution plus importante en bas du substrat après 30 mois ($237,1\text{ }\mu\text{m}$) par rapport à la surface ($210,3\text{ }\mu\text{m}$).

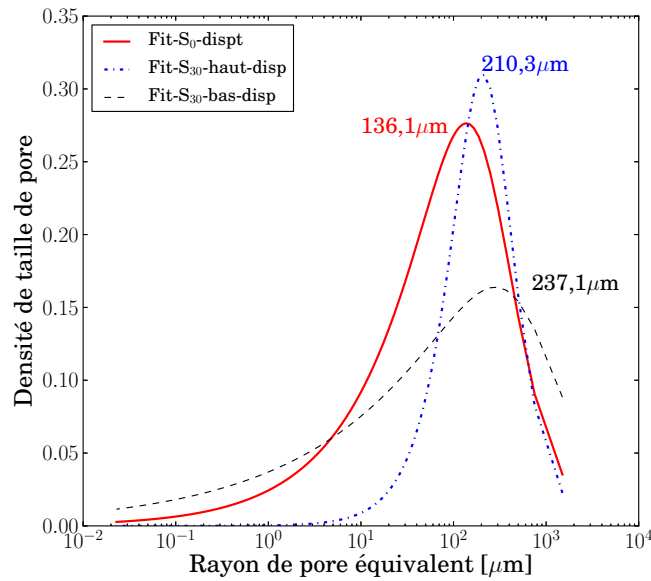


FIGURE 5.8 – Distributions des tailles de pores pour le set S_0 -disp (ligne épaisse noire), S_{30} -haut-disp (ligne discontinue grise) et S_{30} -bas-disp (ligne mixte bleue)

Afin de représenter la fonction objective (Eq. 5.16), nous avons utilisé le couple (θ_S, α) en se basant d'une part, sur l'analyse de sensibilité des paramètres sur les deux variables de sortie θ (teneur en eau) et Q_{out} (quantité d'eau sortante cumulée) et d'autre part, sur les différentes corrélations entre les paramètres hydriques. En effet, θ_S et α sont les plus sensibles (voir Table 5.1) et θ_r , n et K_S sont fortement corrélés avec θ_S et α (voir Table 5.2).

La Fig. 5.9 montre l'évolution de la fonction objective (Φ) sur l'espace paramétrique θ_S variant de $0,35$ à $0,55\text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ et α variant de 6 à 16 m^{-1} . Le minimum de la fonction objective se situe dans la zone de teneur en eau à saturation (θ_S) comprise entre $0,49$ et $0,51\text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ et le paramètre α compris entre 13 et 15 m^{-1} . Ces résultats permettent de conclure sur l'unicité du set de paramètres issues de

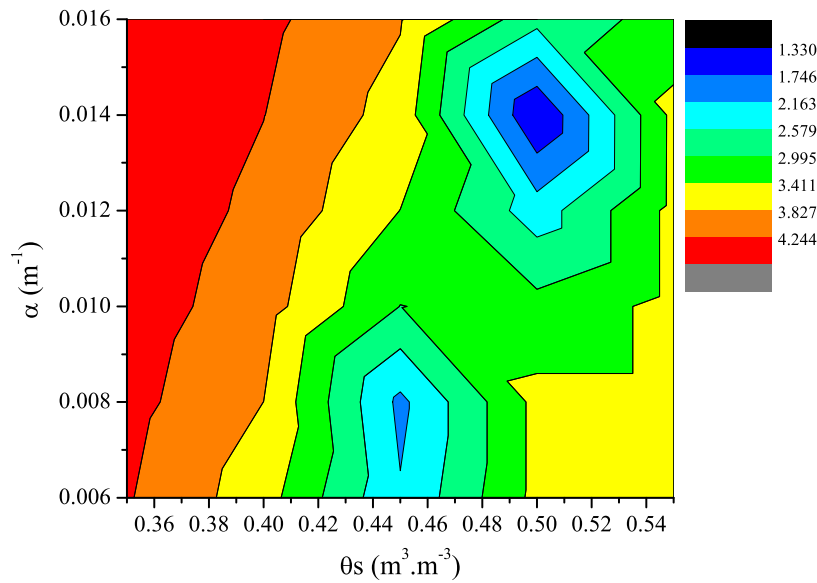


FIGURE 5.9 – Représentation de la fonction objective $\log(\Phi)$ qui en fonction du couple de paramètres (θ_s, α) sur les variables de teneur en eau (θ) et la quantité d'eau sortante cumulée (Q_{out}) pour le substrat S_0

l'optimisation S_0 -disp et S_{30} -disp.

5.3.3 Simulation des constituants de la toiture végétalisée à l'échelle du bâtiment

Nous avons utilisé pour la modélisation directe du comportement hydrique à l'échelle du bâtiment les deux sets de paramètres hydriques issus des simulations à l'échelle du laboratoire : S_0 -disp, utilisé pour la simulation de la phase « une » (01/07 au 31/12/2014) et S_{30} -disp pour la simulation de la phase « quatre » (01/01 au 30/06/2014).

Nous nous intéressons aux phases « une » et « quatre » pour vérifier l'applicabilité des paramètres hydriques déterminés en laboratoire à une échelle « réelle » plus grande. De ce fait, les phases « deux » et « trois » ne font pas l'objet d'une simulation. Les données des parcelles AE et Stock40 seront utilisées car un fort doute demeure sur les valeurs de la teneur en eau de parcelle Stock60.

Dans l'ensemble de cette section, nous avons utilisé le phénomène d'hystérèse en se basant sur les hypothèses précédemment décrites. La Fig. 5.10 compare l'évolution de la mesure de teneur en eau pour la parcelle Stock40 (ligne continue verte, symbole +), la parcelle AE (ligne continue noire, symbole ×) avec les simulations (lignes tiretées).

Sur le mois d'août 2011 (Fig. 5.10a), quatre périodes peuvent être distinguées : i) période de dessiccation rapide et intense (01 au 06/08), ii) période de réhumectation (06 au 15/08), iii) période de dessiccation plus lente et moins intense (15 au 24/08) et iv) nouvelle période de réhumectation (24/08 au 31/08). Globalement, la simulation reproduit les grandes tendances de l'hydrodynamique de la parcelle Stock40, mais surestime les valeurs de la teneur en eau en moyenne de 4 % et au maximum de 20 %. En revanche, ces valeurs sont globalement sous-estimées pour la parcelle AE (de l'ordre de 5 %). Lors des périodes sèches (01/08 au 05/08), les valeurs atteintes par la simulation sont respectivement de 29,2

et 30,5 % alors que les valeurs observées sont respectivement de 20,7 et 19,2 %. Lors d'un événement pluvieux, la simulation sous-estime la valeur maximale de teneur en eau (40,3 %) pour la parcelle AE (42,7 %) le 26/08. Par contre, la valeur simulée est similaire à la valeur mesurée pour la parcelle Stock40 (40,5 %) le 26/08.

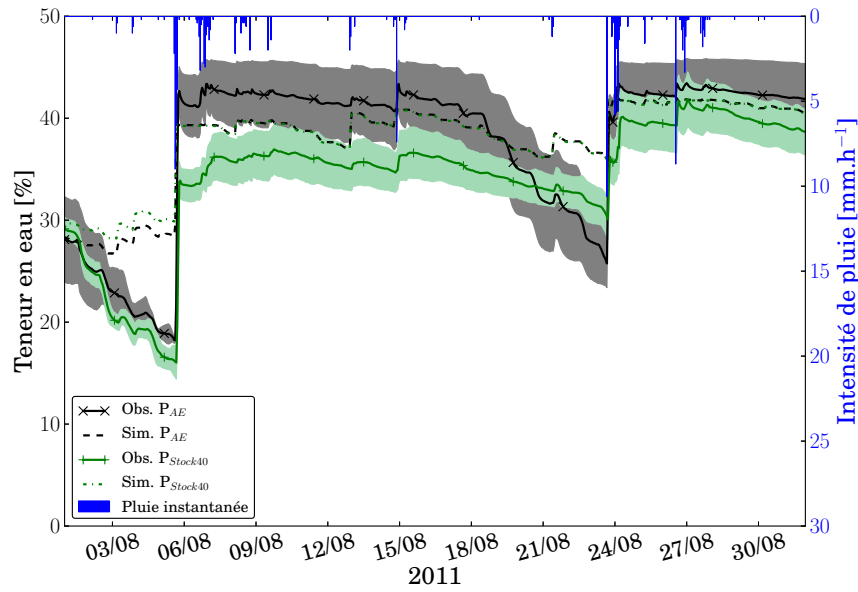
Le set S_0 -disp utilisé pour la simulation de la teneur en eau pour les parcelles AE et Stock40 reproduit imparfaitement les mesures, puisque le nRMSD est de 0,19 pour la parcelle Stock40 et de 0,15 pour la parcelle AE. Ces valeurs s'expliquent en particulier par le décalage lors des épisodes sec.

Au cours de la période froide représentée pour le mois de novembre 2011 sur la Fig. 5.10b, les deux parcelles présentent une teneur en eau quasi constante, avec simplement de faibles oscillations. La simulation a reproduit globalement ce palier pour les deux modalités (respectivement 41,5 % et 41,1 %, pour des valeurs mesurées de 42 et 39 %). En allant dans le détail, il apparaît qu'au début de la période (01/11 au 05/11), la simulation de la teneur en eau a une allure décroissante qui n'est pas observée dans la réalité. Celle-ci est probablement due à une surestimation de l'évapotranspiration. Pour cette période, les valeurs de nRMSD sont de 0,31 et 0,82 pour les parcelles Stock40 et AE.

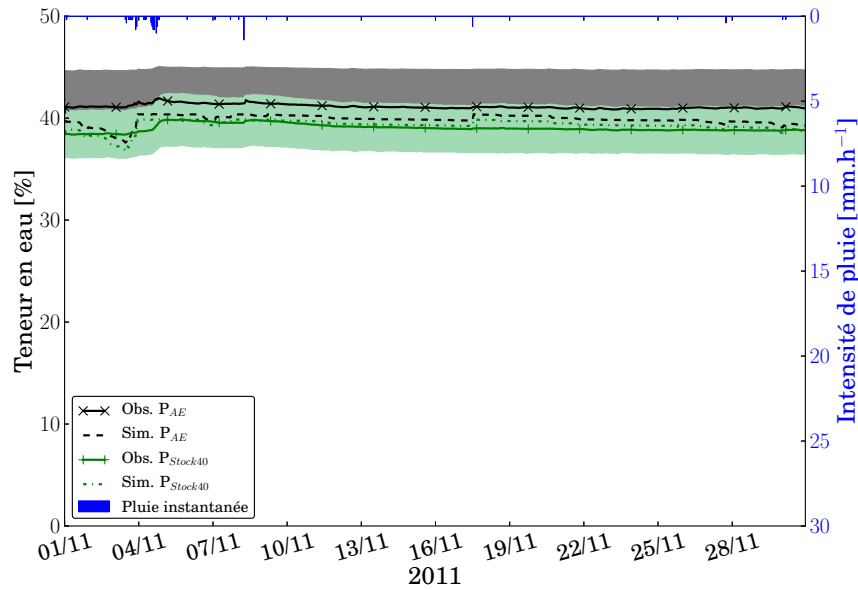
Pour les deux périodes considérées, l'hydrodynamique fine des deux modalités à l'échelle du bâtiment n'a pas pu être simulée à l'aide du set S_0 -disp, même si la modélisation permet de reproduire les grands événements avec une précision satisfaisante. Plusieurs hypothèses peuvent être proposées. En premier lieu, il y a une incertitude sur l'épaisseur de départ du substrat qui n'avait pas été mesurée finement au niveau des sondes, mais simplement donnée par l'entreprise chargée de la mise en place. En effet, lors de l'installation de la TV, l'épaisseur théorique était de 10 cm. De plus, les travaux en laboratoire qui ont permis d'obtenir le set S_0 -disp ont été réalisés sur un échantillon de substrat quarté et homogénéisé ; les propriétés du substrat présent dans l'environnement direct des sondes des parcelles peuvent être significativement différentes (granulométrie, abondance relative des constituants, agencement des particules). Enfin, les conditions microclimatiques (précipitations et variation de la température extérieure de l'air) peuvent varier à l'échelle de la toiture et entraîner des variations locales impactant le comportement hydrique.

Nous avons aussi testé le modèle avec le set de paramètres S_0 -exp présenté dans la Table 5.3. Ce set de paramètres hydriques n'a pas donné de résultats plus satisfaisants en termes de simulation. Il n'est pas exposé dans ce document mais à titre d'exemple, pour la "phase une" (2011), le nRMSD pour les différentes parcelles AE et Stock40 est de 0,61 pour les deux parcelles. Cette valeur est supérieure à celle trouvée avec le set S_0 -disp.

L'évolution des mesures et des simulations de la teneur en eau des parcelles AE et Stock40 pour la phase « quatre » (2014) est présentée dans la Fig. 5.11. Nous avons utilisé le set de paramètres S_{30} -disp. Ce set de paramètres représente la version optimisée du substrat à l'état « évolué » après 30 mois (voir Table 5.4). La Fig. 5.11a qui correspond à un mois chaud montre trois phases distinctes : i) période d'humectation-dessiccation lente (01 au 12/05), ii) saturation (12 au 15/05) et iii) dessiccation lente et intense (15 au 30/05). Pour cette période, les simulations effectuées avec le set S_{30} -disp sont contrastées. Parfois, la dynamique de teneur en eau est bien représentée (essentiellement sur la phase 1 et dans une moindre mesure pour la phase 2 de la modalité AE), mais l'écart peut aussi être très significatif (plus de 15 % d'écart entre la mesure et la simulation pour la modalité Stock40 lors de la phase 2 et 3). Les valeurs de nRMSD qui en résultent sont de 0,53 et 0,30 respectivement pour les parcelles Stock40 et AE. Ces valeurs sont supérieures à celles trouvées pour la même période chaude en 2011.



(a) Été 2011



(b) Hiver 2011

FIGURE 5.10 – Simulation de la teneur en eau pour la “phase une” – été-hiver 2011 en utilisant le set de paramètres (S_0 -disp), intensité de pluie (barre bleue) ordonnée droite, mesure de la teneur en eau de la parcelle AE (ligne continue noire, $\times$), mesure de la teneur en eau de la parcelle Stock40 (ligne continue verte, $+$), simulation de la teneur en eau de la parcelle AE en utilisant le set de paramètres hydriques (S_0 -disp) (ligne discontinue noire), simulation de la teneur en eau de la parcelle Stock40 en utilisant le set de paramètres hydriques (S_0 -disp) (ligne mixte verte)

La Fig. 5.11b donne l'évolution de la teneur en eau simulée et mesurée pour les deux parcelles AE et Stock40 en période froide. Le premier constat qui peut être fait est l'écart significatif entre les deux mesures de teneur en eau des modalités AE et Stock40 ($\approx 10\%$). Logiquement, malgré les teneurs en eau initiales différentes, nous pouvons d'ores et déjà conjecturer que les simulations avec un même set

de paramètres (S_{30} -disp) ne permettront pas de représenter cette différence. La simulation surestime la teneur en eau pour la parcelle Stock40 et la sous-estime pour la parcelle AE. Les valeurs maximales des teneurs en eau simulées des parcelles AE et Stock40 sont quasiment identiques (respectivement de 47 et 46 %), alors qu'il n'en est rien sur les valeurs mesurées (respectivement 45,6 et 36,3 %). De même, certains micro-événements sont simulés sans être observés (décroissance entre le 01/01 et le 03/01) ou à l'inverse sont sous-estimés par rapport à la réalité (e.g. pics de teneur en eau le 27/01). Dans le premier cas, cette décroissance simulée peut s'expliquer par une condition initiale de teneur en eau qui ne reflète pas la réalité (malgré différents essais). En effet, ne disposant que d'une valeur ponctuelle de teneur en eau, la distribution de celle-ci au début de la simulation est estimée. Les valeurs de nRMSD sont respectivement de 2,3 et 3,6 pour les modalités Stock40 et AE. Ces dernières erreurs sont élevées, malgré des valeurs de teneurs en eau simulées globalement analogues pour la modalité AE, mais ceci s'explique par un fort décalage dans le temps entre les simulations et les valeurs mesurées.

Ces résultats médiocres peuvent s'expliquer par différents facteurs : i) une variation irrégulière des données d'entrée (épaisseur du substrat de 9 cm pour la parcelle AE et 10 cm pour la parcelle Stock40) qui peut favoriser la rétention en eau supplémentaire dans le cas de la parcelle Stock40. Palla *et al.* (2009) expliquent qu'il y a une relation proportionnelle entre l'épaisseur du substrat et la quantité d'eau qui peut être retenue, ii) la position des sondes a pu varier au cours du temps, alors qu'elle est restée identique dans la modélisation ; pourtant les précédents résultats montrent bien à quel point la distribution de la teneur en eau n'est pas linéaire dans le substrat et donc l'importance de cette position. iii) L'absence de prise en compte de la différence entre les couches de drainage dans la simulation, en particulier les éventuels phénomènes de remontées capillaires dans la parcelle AE munie de billes d'argile (Berretta *et al.*, 2014), alors que la structure alvéolaire ne le permet théoriquement pas. iv) lors des périodes chaudes, la hauteur de végétation et la surface végétalisée sont plus importantes. De ce fait, l'évapotranspiration est accentuée. Nous avons pris des paramètres constants de végétation (hauteur, LAI, surface de couverture), alors que ces derniers évoluent dans le temps. Moody (2012) a montré que le LAI évoluait au cours des saisons entre 2 et 4.

Cette étape de la simulation met en évidence la difficulté de transposer les résultats de l'expérimentation en labo à l'échelle de la toiture en place. Pour améliorer la qualité de la simulation et reproduire l'évolution du transfert hydrique dans le substrat pour les parcelles AE et Stock40 pour les phases « une » et « quatre », deux sets de paramètres hydriques distincts ont été déterminés par la méthode d'optimisation de paramètres. Les nouveaux sets de paramètres hydriques sont ainsi évalués sur la base de l'analyse de sensibilité faite précédemment. Cette analyse a montré que α et θ_S sont les plus sensibles. De ce fait, ces paramètres hydriques feront l'objet d'une optimisation en prenant comme fonction objectif les données observées des teneurs en eau des parcelles AE et Stock40 pour la phase « une » et « quatre » respectivement pour l'année 2011 (S_0 -in-situ) et 2014 (S_{30} -in-situ). Les résultats sont présentés dans la Table 5.5.

La Fig. 5.12 montre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation numérique, avec la prise en compte du set de paramètres hydriques optimisés (S_0 -in-situ). La confrontation entre les résultats numériques et les mesures expérimentales des deux parcelles AE et Stock40 a été faite de la même manière pour les deux périodes différentes en 2011 (Fig. 5.12b).

Pour la période chaude, les évolutions au cours du temps des teneurs en eau dans le substrat obtenues numériquement et expérimentalement sont relativement proches lorsque la teneur en eau est supérieure à 30 % vol, la différence entre les deux résultats ne dépasse pas 1 % vol pour la parcelle Stock40 et 3 % vol

TABLE 5.5 – Paramètres hydriques de van Genuchten pour le substrat S_0 -disp et S_{30} -disp ; données issues de l'expérience laboratoire et optimisées S_0 -in-situ et S_{30} -in-situ.

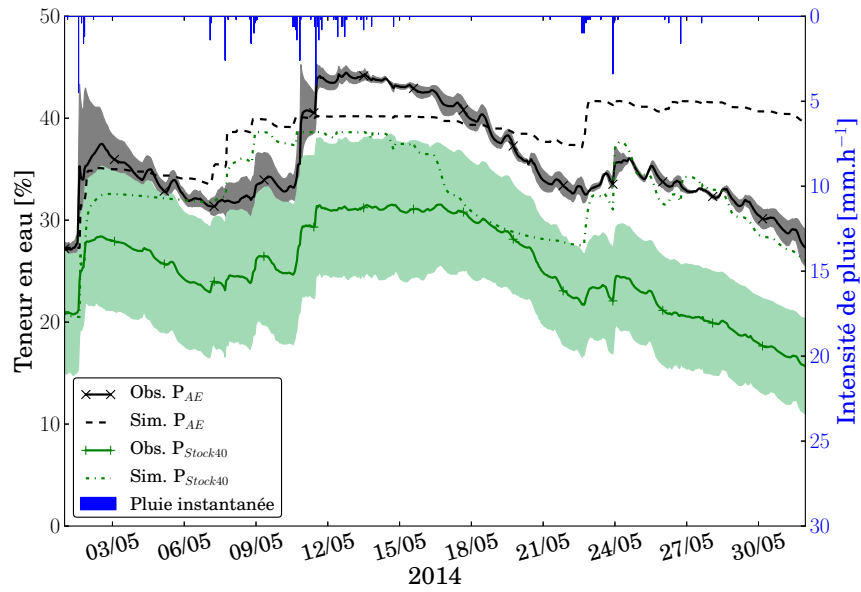
Paramètres	Unité	S_0 -disp	S_0 -in-situ		S_{30} -disp	S_{30} -in-situ	
			Stock40	AE		Stock40	AE
θ_r	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05
θ_s	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$	0,51	$0,49 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,01$	0,49	$0,43 \pm 0,01$	$0,49 \pm 0,05$
α	m^{-1}	17,32	$14,72 \pm 3,9$	$21,09 \pm 5,27$	13,4	$14,64 \pm 1,62$	$13,25 \pm 0,2$
n	-	1,58	1,58	$1,74 \pm 0,22$	3,47	1,9	$1,9 \pm 0,9$
K_s	mm.s^{-1}	1,83	1,83	1,83	2,25	2,25	2,25
l	-	2,87	2,87	2,87	8,72	8,72	8,72

pour la parcelle AE. Du 01/08 au 06/08, les valeurs simulées sont surestimées par rapport aux valeurs mesurées pour atteindre une différence maximale le 05/08 de 18,21 %.vol. Ce phénomène se reproduit entre le 20/08 et le 24/08 avec une différence entre les teneurs en eau simulées et mesurées de 10,71 %.vol. L'indice nRMSD déterminé avec le set de paramètres hydriques S_{30} -in-situ pour les deux parcelles AE et Stock40 (respectivement de 0,14 et 0,15) indique cependant une amélioration sensible de la simulation avec ce nouveau set de paramètres.

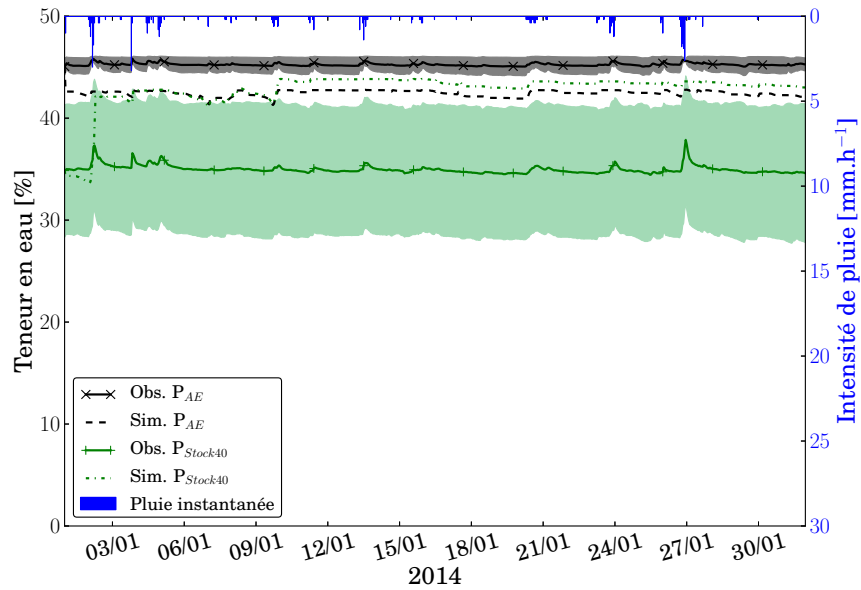
Pour la période froide, les évolutions au cours du temps des teneurs en eau dans le substrat obtenues numériquement et expérimentalement montrent une similitude presque parfaite. En effet, pour 83 % du temps de validation, la différence entre les deux teneurs en eau (simulée et mesurée) ne dépasse pas 1 %.vol. Seule différence notable entre le 01/11 et le 04/11, avec une différence de teneur en eau de 4 %.vol. L'indice nRMSD pour le set de paramètres hydriques S_{30} -in-situ montre des résultats bien meilleurs (respectivement de 0,4 et 0,24 pour la parcelle AE et Stock40) par rapport au set de paramètres hydriques S_0 -disp (respectivement de 1,22 et 0,31 pour la parcelle AE et Stock40). Dans le cas des expériences à l'échelle du bâtiment, nous trouvons des valeurs minimale d'indice de l'ordre de 0,4. et nous considérons à ce stade de complexité de la TV qu'en dessous de cet indice, les résultats sont satisfaisants.

La Fig. 5.13 montre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation numérique, avec le set de paramètres hydriques optimisé (S_{30} -in-situ). La confrontation entre les résultats numériques et les mesures expérimentales des deux parcelles AE et Stock40 a été faite pour les deux périodes différentes en 2014.

Pour la période froide (Fig. 5.13a), les évolutions au cours du temps des teneurs en eau dans le substrat obtenues numériquement et expérimentalement montrent une similitude entre les résultats. En effet, pour 79 % du temps de validation, la différence entre les deux teneurs en eau (simulée et mesurée) ne dépasse pas 3 %.vol. Par contre, les dynamiques de l'évolution de la teneur en eau simulée ne sont pas représentées. Par exemple, lors de l'événement pluvieux du 02/01 (intensité de précipitation de 3 mm.h^{-1}), les valeurs mesurées indiquent un pic à 38 %.vol, alors que les valeurs simulées indiquent un léger pic à 35,7 %.vol. L'indice nRMSD pour le set de paramètres hydriques S_{30} -in-situ montre des résultats meilleurs (respectivement de 0,45 et 0,28 pour la parcelle AE et Stock40) par rapport au set de paramètres hydriques S_0 -disp (respectivement de 3,6 et 2,35 pour la parcelle AE et Stock40).

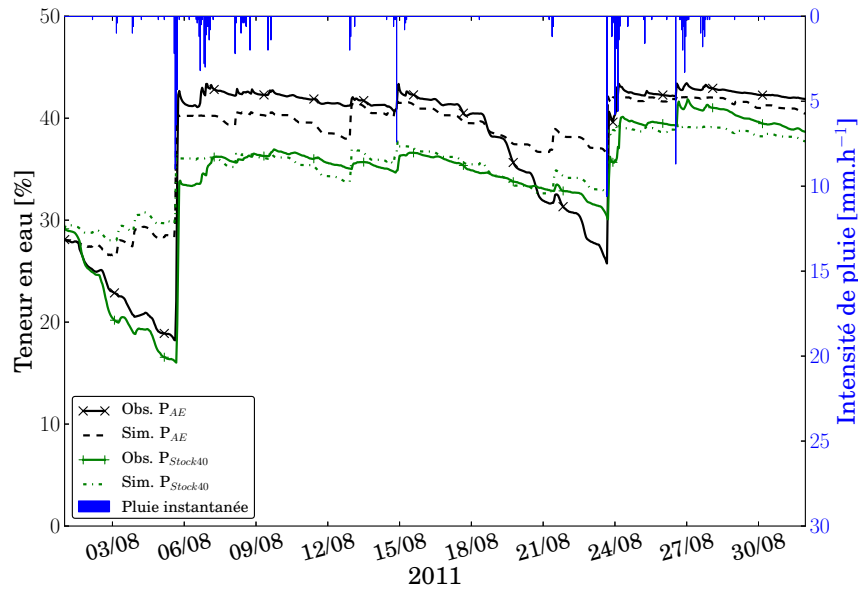


(a) Été 2014

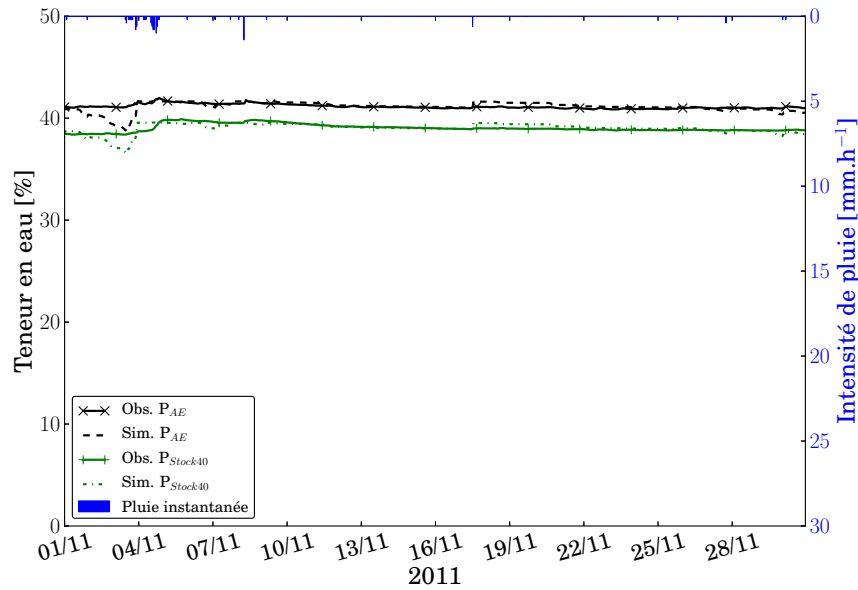


(b) Hiver 2014

FIGURE 5.11 – Simulation de la teneur en eau pour la « phase quatre » – été-hiver 2014 en utilisant le set de paramètres (S_{30} -disp), intensité de pluie (barre bleue) ordonnée droite, mesure de la teneur en eau de la parcelle AE (ligne continue noire, $\times$), mesure de la teneur en eau de la parcelle Stock40 (ligne continue verte, $+$), simulation de la teneur en eau de la parcelle AE en utilisant le set de paramètres hydriques (S_{30} -disp) (ligne discontinue noire), simulation de la teneur en eau de la parcelle Stock40 en utilisant le set de paramètres hydriques (S_{30} -disp) (ligne mixte verte)



(a) Été 2011



(b) Hiver 2011

FIGURE 5.12 – Simulation de la teneur en eau pour la “phase une” – été-hiver 2011 en utilisant le set de paramètres optimisé (S_0 -in-situ), intensité de pluie (barre bleue) ordonnée droite, mesure de la teneur en eau de la parcelle AE (ligne continue noire, $\times$), mesure de la teneur en eau de la parcelle Stock40 (ligne continue verte, $+$), simulation de la teneur en eau de la parcelle AE en utilisant le set de paramètres hydriques (S_0 -in-situ) (ligne discontinue noire), simulation de la teneur en eau de la parcelle Stock40 en utilisant le set de paramètres hydriques (S_0 -in-situ) (ligne mixte verte)

Pour la période chaude (Fig. 5.13b), les évolutions au cours du temps des teneurs en eau dans le substrat obtenues numériquement représentent toujours de manière médiocre les observations. L’allure des dynamiques est globalement représentée pour la parcelle Stock40, alors qu’elles ne le sont pas pour la parcelle AE. Nous constatons une représentation contrastée entre les deux simulations des teneurs en

eau des deux parcelles, en effet, la simulation de la teneur en eau pour la parcelle Stock40 est surestimée, alors que la simulation pour la parcelle AE est quant à elle sous-estimée. L'indice nRMSD déterminé avec le set de paramètres hydriques S_{30} -in-situ pour les deux parcelles AE et Stock40 (respectivement de 0,26 et 0,40) est légèrement moins important à celui trouvé avec le set de paramètres hydriques S_0 -disp (respectivement de 0,3 et 0,53). Cela montre que l'optimisation n'a permis d'améliorer la prédiction que légèrement.

TABLE 5.6 – Évolution des paramètres hydriques de van Genuchten pour le substrat S_0 -disp et S_{30} -disp ; données issues de l'expérience laboratoire et optimisées S_0 -in-situ et S_{30} -in-situ entre 2011 et 2014 basée sur la Table 5.5.

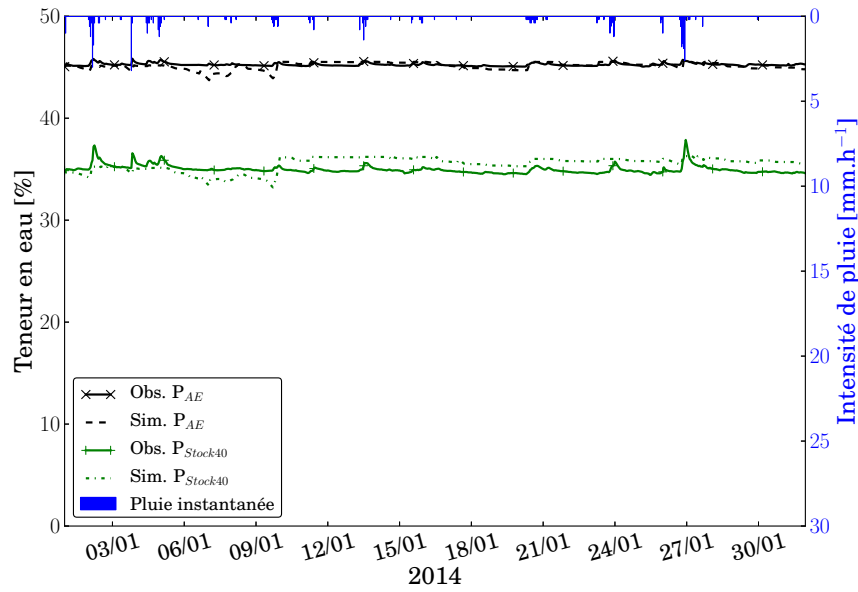
Paramètres	Écart entre S_0 -disp et S_0 -in-situ [%]		Écart entre S_{30} -disp et S_{30} -in-situ [%]	
	Stock40	AE	Stock40	AE
θ_s	+6	+1	-14	-
α	-17	+21	+9	-1
n	-	+10	-	-82

Cette nouvelle étape d'optimisation a bien confirmé l'évolution des paramètres hydriques au cours du temps (en l'occurrence entre 2011 et 2014) (Table 5.6). Nous observons une variation du paramètre α pour les deux modalités Stock40 et AE pour le substrat S_0 (respectivement de -17% et 21%) en accord avec l'analyse de sensibilité. Aussi, le paramètre θ_s varie modérément pour la modalité Stock40 (6%) et très peu pour la modalité AE (1%). En revanche pour le substrat S_{30} , un constat différent est fait, le paramètre n varie énormément pour la modalité AE (-82%), qui peut s'expliquer par une modification de la structure porale, confirmé par l'analyse de la distribution de taille des pores (Fig. 5.8). Les simulations reproduisent plus ou moins bien l'évolution des observations en 2011 au cours de la période chaude (août 2011) et froide (novembre 2011) avec la toiture végétalisée récemment installée.

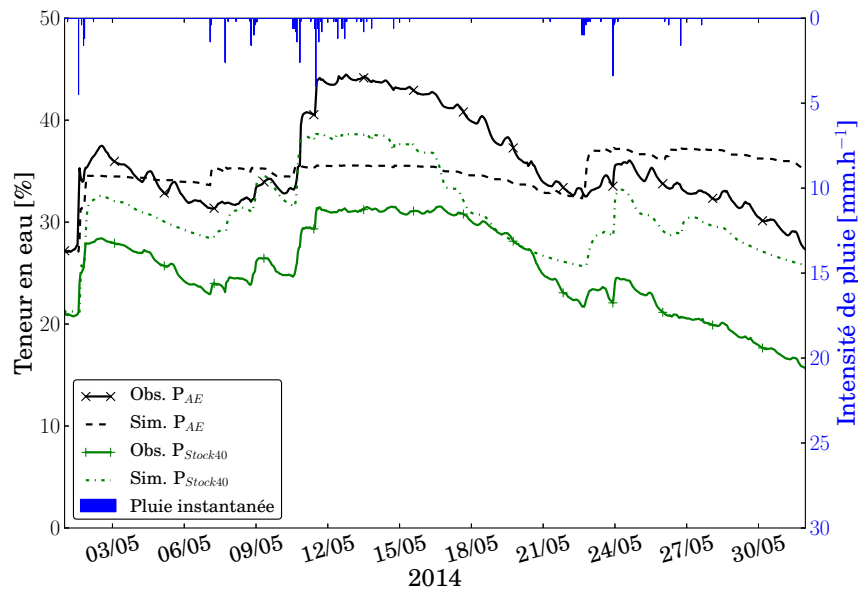
La simulation reste encore bien représentée après 30 mois (2014) de mise en service en période froide (janvier 2014). Par contre, en période chaude (mai 2014), la simulation n'est pas bien représentée. Plusieurs hypothèses ou raisons peuvent être formulées. Nous avons observé l'influence des conditions initiales (teneur en eau initiale). En effet, Palla *et al.* (2009); Berretta *et al.* (2014) montrent l'influence de ces conditions sur le comportement hydrodynamique de la TV.

Afin d'en tenir compte, nous avons fait une campagne de caractérisation pour déterminer le gradient de teneur en eau sur l'épaisseur du substrat durant une période froide (février 2014). Il aurait peut être fallu faire d'autres campagnes de mesure à différentes périodes (période chaude, avec ou sans précipitation) pour obtenir le comportement sur l'épaisseur du substrat (différents gradients de teneur en eau) et ainsi déterminer des conditions initiales de teneur en eau représentatives.

Le set S_{30} -dispo a été estimé sur la base d'un échantillon de grande taille ($40 \times 40 \times 14$ [cm]) qui a été prélevé in situ à un moment donné (17/02/2014), à un endroit donné de la TV (parcelle Stock60). Cet échantillon n'est pas nécessairement représentatif des conditions sur l'ensemble du dispositif. D'autres prélèvements auraient été nécessaires pour être représentatif de la morphologie de la TV, mais cela aurait perturbé d'une part, le système mis en place (structure de la TV), en terme de représentation de la quantité d'eau sortante, et d'autre part, nous aurions fortement perturbé la mesure en cours. En résumé, nous aurions perturbé l'évolution de la TV.



(a) Hiver 2014



(b) Été 2014

FIGURE 5.13 – Simulation de la teneur en eau pour la « phase quatre » – été-hiver 2014 en utilisant le set de paramètres optimisé (S_{30} -in-situ), intensité de pluie (barre bleue) ordonnée droite, mesure de la teneur en eau de la parcelle AE (ligne continue noire, $\times$), mesure de la teneur en eau de la parcelle Stock40 (ligne continue verte, $+$), simulation de la teneur en eau de la parcelle AE en utilisant le set de paramètres hydriques (S_{30} -in-situ) (ligne discontinue noire), simulation de la teneur en eau de la parcelle Stock40 en utilisant le set de paramètres hydriques (S_{30} -in-situ) (ligne mixte verte)

L'évolution des constituants de la TV a modifié le comportement hydrique de cette dernière. Getter *et al.* (2007) montrent pour une étude faite sur une TV durant 5 ans un doublement de la proportion de matière organique par rapport à la matière minérale, ce qui augmente la porosité totale du substrat et influence donc le comportement hydrodynamique général. Dans les résultats du chapitre 3, nous

confirmons le constat fait par Getter *et al.* (2007) sur la modification des propriétés physiques du substrat sur une période de 3 ans.

Le comportement hydrique des TV a montré des phases de dessiccation et de réhumectation du substrat. Afin de modéliser ce phénomène, nous avons introduit le phénomène d'hystérésis, concept très peu étudié pour l'étude du comportement hydrodynamique des substrats des TV. Ouldboukhité *et al.* (2012); Abbasi *et al.* (2012) montrent en effet, lors des périodes de dessiccation que de l'air reste piégé dans les plus petits pores, cela engendre une teneur en eau à saturation plus faible lors de la phase d'humectation. Nous avons fait le choix d'un modèle simpliste dans une première approche. Cette dernière peut avoir causée les valeurs sous-estimées des teneurs en eau en 2014. En effet, il serait pertinent de prendre en considération la baisse de teneur en eau à saturation lors de la phase de réhumectation dans la modélisation.

5.4 Conclusion partielle

A l'échelle du laboratoire, sur un dispositif expérimental de $0,16\text{ m}^2$, il a été démontré que le formalisme de Richards permettait de simuler très correctement aussi bien les teneurs en eau au sein de la TV (en particulier du substrat) que les quantités d'eau évacuée. La modélisation à l'aide des paramètres issus de la mesure (chapitre 3) reproduisaient correctement l'hydrodynamique du système, mais avaient tendance en particulier à surestimer les quantités d'eau évacuée. Une étape d'optimisation des paramètres hydriques a permis d'améliorer encore ce résultat. La simulation sur le substrat de toiture prélevé après 30 mois a bien confirmé que les caractéristiques de ce matériau avaient évolué au cours du temps, en particulier en ce qui concerne ses paramètres hydriques. En effet, la simulation conduite avec les paramètres obtenus sur le substrat à l'état initial (S_0) reproduisait certes les grandes tendances de la dynamique de l'eau dans le système, mais aussi bien les teneurs en eau que la quantité d'eau évacuée étaient mal estimées. A nouveau, la démarche d'optimisation a permis d'arriver à une simulation satisfaisante, par l'obtention d'un nouveau set de paramètres. La représentation de l'évolution de ces paramètres au cours du temps met particulièrement en évidence une modification de l'architecture porale du substrat au cours des 30 mois de suivi (S_{30}).

Le passage à la simulation du comportement hydrique d'une TV installée sur un bâtiment représentait un challenge car il supposait la prise en compte d'une hétérogénéité beaucoup plus forte à l'échelle du substrat (qui n'avait pas été homogénéisé au moment de l'installation), de la réponse des sondes sur une longue période de temps, de la topographie complexe de la surface de la toiture (présence de point bas) et enfin des limites de certaines mesures (le débit en sortie de toiture n'a ainsi pas été utilisé pour la modélisation). Cette phase impliquait également la prise en compte des conditions météorologiques réelles et c'est la raison pour laquelle, à chaque fois, une période chaude (été) et froide (fin de l'automne ou hiver) ont été étudiées. Néanmoins, les résultats obtenus vont finalement dans le même sens que ceux décrits au laboratoire. En effet, les simulations avec les paramètres provenant de l'optimisation des expériences en laboratoire reproduisaient globalement les tendances mesurées sur la toiture, mais avec des différences parfois marquées sur les valeurs de teneurs en eau. Ceci était particulièrement vrai sur les deux périodes considérées en 2014. A titre de test, une nouvelle phase d'optimisation a été conduite et a permis d'améliorer la qualité des simulations. Globalement, dans la plupart des situations, les résultats obtenus par modélisation sont proches des mesures ($\text{nRMSD} < 0,6$) et peuvent être jugés satisfaisant. Il est cependant à noter que, malgré un souci permanent de conserver un réalisme aux paramètres lors des

phases d'optimisation, cette approche reste une résolution mathématique à un problème physique.

Pour aller plus loin, il serait tout d'abord pertinent d'utiliser les sets de paramètres pour modéliser le comportement hydrodynamique des toitures sur les trois ans du suivi *in situ*. Afin de prendre en compte l'évolution des propriétés du substrat au cours du temps, une approche similaire à celle proposée par Cannavo *et al.* (2014) pourrait être mise en œuvre. Elle consiste, en connaissant les valeurs initiales des paramètres hydriques et leurs valeurs au bout de 30 mois, à leur appliquer une fonction linéaire pour estimer des sets en 2012 et 2013. Les perspectives scientifiques de cette approche de modélisation sont à la fois d'approfondir le formalisme physique permettant de décrire les transferts d'eau dans ces milieux poreux multicouches spécifiques que sont les toitures végétalisées. En ce sens, trois chantiers au moins peuvent être évoqués :

- la modélisation précise de l'évapotranspiration au cours du temps ; en effet, peu de travaux de recherche permettent de calculer précisément l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal de toiture végétalisée sur une année climatique ;
- une meilleure prise en compte du phénomène d'hystérèse ; en ce sens, la détermination de la courbe de rétention $h(\theta)$ en humectation serait une première étape ; c'est-à-dire, l'estimation des paramètres hydriques $(\theta_r^d, \theta_S^d, \alpha^d, n^d)$ pour la phase de dessiccation et pour la phase d'humectation $(\theta_r^h, \theta_S^h, \alpha^h, n^h)$ en considérant ces dernières différentes. Par exemple, des teneurs en eau à saturation différentes entre la phase de dessiccation et d'humectation (Abbasi *et al.*, 2012) ;
- le test d'autres modèles de résolution de l'équation de Richards plus adaptés à la structure particulière du substrat ; en particulier des modèles à double porosité pourraient être pertinents (Durner, 1994; Bond et Thompson, 2013) ;
- la prise en compte d'une méthode alternative d'analyse de sensibilité comme l'analyse « multi-paramétrique (Sobol, 2001; Sobol et Kucherenko, 2009).

en fonction de l'âge.

Conclusion et perspectives

Au regard de leurs propriétés et des fonctions que les toitures végétalisées remplissent (i.e. support de végétation, filtre/échange, réservoir de biodiversité), ce travail suggère de les considérer comme des sols et plus particulièrement des sols fortement anthropisés. En effet, les constituants des toitures végétalisées sont très largement marqués par l'action de l'Homme. Le substrat est ainsi le résultat du mélange de matériaux naturels d'extraction (e.g. pouzzolane, tourbe), de matériaux naturels ayant subi une transformation (e.g. compost, billes d'argiles), voire de produits manufacturés (e.g. géotextile, structure alvéolaire). Il est alors possible de classer les toitures végétalisées - de manière générique - en suivant la classification internationale des sols : Histi-spolic Technosol andic (IUSS, 2014). Nous avons pu mettre en évidence les caractéristiques majeures de ce Technosol : i) son hétérogénéité de constitution, résultant de la superposition de matériaux très contrastés et sans équivalent dans la nature, ii) sa faible épaisseur (10 à 20 cm), iii) sa très forte porosité (de 72% pour le substrat, jusqu'à 95% pour la structure alvéolaire), iv) la part importante de macroporosité à drainage rapide (de 28% pour le substrat jusqu'à la quasi-intégralité de la porosité pour la structure alvéolaire) et v) une capacité de stockage en eau très élevée (variable en fonction du contrôle de la lame d'eau en sortie de toiture).

De ce rattachement des toitures végétalisées à la classe des Technosols - dont il a été démontré qu'ils étaient soumis à une évolution pédogénétique rapide et intense dans les premiers temps de leur mise en place - a découlé une hypothèse sur l'évolution au cours du temps de leurs propriétés (en particulier de son constituant organo-minéral présent en surface : le substrat). Ceci a pu être vérifié par la caractérisation d'un substrat commercial utilisé pour cette thèse, au moment de sa mise en place (S_0) et après un peu moins de 3 ans d'évolution (S_{30}). Des changements significatifs de certaines propriétés physiques et hydriques (augmentation de la densité apparente, développement d'un tissu racinaire très dense, variations de l'humidité à saturation) ont été quantifiés. Il en résulte logiquement des modifications dans le comportement hydrodynamique de la toiture au cours du temps, phénomène qui n'a jusqu'à présent que très peu fait l'objet d'investigations scientifiques.

Ainsi, un volet expérimental de suivi de l'hydrodynamique de plusieurs modalités de toitures végétalisées - trois structures drainantes différentes : argile expansé, structure alvéolaire de 40 mm, structure alvéolaire 60 mm - a été conduit à l'échelle du laboratoire et du bâtiment. Il s'inspire d'études qui traitent des transferts hydriques dans leur réelle complexité et qui se basent sur l'observation et la mesure pour déterminer les performances des toitures végétalisées (Mentens *et al.*, 2006; Kasmin et Stovin, 2010). Deux indicateurs principaux de performances ont été évalués : capacité de stockage et effet retard. Le premier résultat important est que les performances des toitures végétalisées dépendent grandement de leur état hydrique au début de l'épisode pluvieux (teneur en eau initiale). Il en résulte en particulier un contraste important entre les périodes estivales et hivernales d'une part et la mise en place de systèmes de rétention (bouchons) d'autre part. La toiture végétalisée « standard » équipée

d'une structure drainante avec des billes d'argiles a démontré sa capacité à stocker entre 64 et 82 % des précipitations en été (respectivement avec et sans bouchons) et entre 24 et 39 % en hiver (respectivement sans et avec bouchons). Dans le même temps, une capacité de stockage. L'effet retard était en moyenne de 240 min en hiver et 36 h en été. Dans ce travail, l'innovation technologique apportée par Nidaplast par l'ajout d'une structure alvéolaire (Nidaroo) et la possibilité qui est ainsi donnée de contrôler la lame d'eau sur la toiture (pose de bouchons au niveau de l'évacuation) a été testée. Les résultats sont clairs et montrent que ce système permet d'augmenter significativement les performances : jusqu'à 98 % de rétention en période chaudes et 93 % en période froides. La mise en place de bouchons à un niveau maximale diminue la capacité de stockage de 15,3 % en été et de 20,4 % en hiver.

Considérant la très faible épaisseur de la toiture végétalisée, ces performances n'ont pas d'équivalent pour des sols naturels. Ceci s'explique en partie par les propriétés physiques explicitées ci-dessus. Mais c'est surtout la configuration multicouche de la toiture végétalisée et en particulier le passage de l'eau vers la structure drainante, dont les conditions de pression sont analogues aux conditions atmosphériques, qui génère une discontinuité forte dans le flux, puisque la base du substrat et le géotextile doivent être saturés en eau pour qu'il y ait écoulement. Ce phénomène physique est ainsi responsable de la forte capacité de stockage des toitures végétalisées.

Pour aller plus loin, une démarche de modélisation a ensuite été conduite. En se fondant sur la bibliographie existante, il apparaît que seulement un petit nombre d'études « numériques » ont été conduites sur des toitures végétalisées, qui utilisent des modèles plus ou moins sophistiqués (Bass et Baskaran, 2003; Hilten *et al.*, 2008; Palla *et al.*, 2009). De plus, parmi les auteurs utilisant une approche physique, il existe un manque manifeste de caractérisation des propriétés hydriques des différents composants de la toiture. Le modèle que nous avons choisi est basé sur les équations de Richards résolues avec le modèle de fermeture de van Genuchten - Mualem. Nous supposons un écoulement unidimensionnel à simple porosité. Pour traiter numériquement ce problème, nous avons fait le choix d'utiliser le logiciel HYDRUS-1D, programme couramment utilisé pour aborder ce type de problématique (Hilten *et al.*, 2008; Lawrence *et al.*, 2008; Palla *et al.*, 2009). Une analyse de sensibilité et une étude des corrélations des paramètres du modèle ont également été conduites. Le modèle a tout d'abord été testé à l'échelle du laboratoire. Une phase d'optimisation des paramètres a permis à la simulation de reproduire très correctement les flux d'eau mesurés (nRMSD=0,06). À l'échelle du bâtiment, des simulations ont été conduites sur deux modalités (AE et Stock40), sur des périodes courtes (1 mois), au début (2011) et à la fin du suivi (2014), en saison printanière ou estivale (août et mai) et en saison hivernale (novembre et janvier). L'objectif étant bien d'appliquer la démarche de modélisation dans des situations très contrastées : i) fortes variations des teneurs en eau caractéristiques de périodes à faible pluviométrie et températures élevées ; ii) faibles variations des teneurs en eau avec pluviométrie forte et températures basses. Sur les périodes considérées et après une phase complémentaire d'optimisation de paramètres, le modèle estime très bien le comportement hydrodynamique des deux modalités en 2011 (nRMSD=0,24). Une légère tendance à sous-estimer la teneur en eau a été constatée sur les simulations de 2014 (nRMSD=0,53). Dans tous les cas, le modèle surestime la quantité d'eau en sortie de toiture de 14% ce qui avait également été observé sur le même site, à partir du modèle GREENROOF développé par de Munck *et al.* (2013) pour Météo France. Outre les difficultés inhérentes à la démarche de modélisation, ceci s'explique très certainement par la complexité d'effectuer un monitoring fin et constant dans le temps des flux d'eau (teneur en eau et débit d'eau évacuée) à l'échelle du bâtiment, considérant la géométrie initiale de la toiture (présence de points bas où l'eau s'accumule).

Ce travail a conduit à mettre en œuvre différents outils expérimentaux et numériques. Ils ont permis d'obtenir un grand nombre d'informations et de remplir la plupart des objectifs posés initialement. Mais, il apparaît néanmoins que le changement d'échelle du laboratoire au bâtiment a soulevé un grand nombre de questions pour lesquelles seules des hypothèses ont pu être émises. Cette expérience permet alors de formuler un certain nombre de recommandations pour la conception d'une expérimentation en conditions réelles :

- Relevé précis de la topographie de la toiture avant installation du complexe de végétalisation ;
- Relevé précis des épaisseurs de substrat ;
- Utilisation de dispositifs tensiométriques adaptés à la fois à des milieux proches de la saturation pendant de longues périodes de temps, mais aussi susceptibles de connaître des épisodes de dessiccation intenses ; en effet, les équitensiomètres utilisés sur le LRN ne nous donnaient aucune information sur les périodes où le substrat était proche de la saturation ; il pourrait par exemple être recommandé de doubler les équitensiomètres par des tensiomètres à céramique poreuse ;
- Les mesures de teneur en eau mesurées par les sondes TDR ont toujours été entachées d'un certain doute sur les valeurs nominales, malgré un calibrage initial ; il faudrait probablement effectuer des recherches complémentaires auprès des fournisseurs pour identifier le type de sonde le plus approprié pour ce type de média hétérogène et très poreux ; par ailleurs, il serait intéressant de disposer de plusieurs points de mesure sur la profondeur du substrat ou du moins de contrôler avec précision la profondeur à laquelle se trouve la sonde ;
- Comme évoqué par de nombreux auteurs, une estimation précise de l'évapotranspiration réelle reste un objectif incontournable. Les résultats du projet ADEME TERRACES apporteront sans doute les valeurs qui nous permettraient de boucler le bilan hydrique ;
- Enfin, le débitmètre à auget mis en place sur le LRN n'avait probablement pas une sensibilité suffisante (volume élémentaire de 3 L) au regard de la taille des toitures, c'est-à-dire des volumes d'eau évacuée ; il faudrait probablement envisager des augets de 0,2 à 0,1 L afin d'avoir une meilleure résolution de cette donnée essentielle.

Cette plus grande précision d'informations permettrait en particulier de conduire la modélisation à l'échelle 3D. Les travaux présentés ici conserveraient alors toute leur pertinence pour une démarche de simulation, avec HYDRUS-3D par exemple. En effet, cette approche physique de modélisation et l'utilisation du logiciel HYDRUS ont montré leur validité sur les expérimentations en laboratoire et dans une certaine mesure sur les suivis *in situ*.

Les perspectives de ce travail sont multiples. Il s'est attaché à transposer l'approche physique de caractérisation et de modélisation des transferts d'eaux appliquée aux milieux poreux (essentiellement le sol) à cet objet spécifique qu'est la toiture végétalisée. Des résultats particulièrement encourageants ont été obtenus, mais de nombreuses pistes restent à explorer. Les différents essais de modélisation ont par exemple montré l'importance de prendre en compte les phénomènes d'hystérèse. Dans ce travail, un modèle simple de calcul des paramètres a été appliqué, mais il serait plus pertinent de les mesurer. Dans le même ordre d'idée, des modèles plus complexes intégrant une double porosité pourraient permettre une meilleure représentation des écoulements (Durner, 1994; Bond et Thompson, 2013).

En second lieu, des données sur le suivi des températures extérieures et à différentes profondeurs de la toiture végétalisée ont été acquises sur les 3 ans d'expérimentations. Elles sont d'ailleurs partiellement mise en forme et pourraient facilement être exploitées. Il serait alors envisageable de réaliser les études nécessaires sur les différentes parcelles afin de coupler transfert d'eau et transfert de chaleur et de répondre, par exemple, à des questions sur l'impact de l'état hydrique de la toiture végétalisées sur les performances thermiques pour le bâtiment, mais même plus globalement la contribution à la diminution de l'îlot de chaleur urbain. Cette démarche nous amènerait à une base de données complète nous permettant de montrer de façon plus précise, l'apport d'une structure alvéolaire en lieu et place de la couche de drainage. HYDRUS-1D pourrait de nouveau être utilisé car il propose un module de transfert de chaleur, grâce aux fichiers de données existant, des simulations pourraient être rapidement conduites. Enfin, l'approche décrite ici pourrait utilement être mise en œuvre de manière appliquée, pour le dimensionnement de toitures végétalisées. En effet, la tendance actuelle en France est à une recherche de performances précises des toitures végétalisées, en particulier sur l'évacuation d'eau, par les Maîtres d'Ouvrage. L'application de notre démarche pourrait alors permettre d'optimiser les épaisseurs de substrat, de couche de drainage, voire de recommander un contrôle de la lame d'eau sur la toiture, en prenant en compte les réalités climatiques du lieu d'implantation. Nous suggérons alors d'utiliser des archives climatiques pour obtenir des valeurs moyennes sur une année climatique type et de les utiliser comme facteurs d'entrée dans HYDRUS-1D, afin de tester différentes configurations. Au-delà, la démarche de modélisation pourrait contribuer à des développements technologiques. En effet, avant une phase de test laboratoire sur de nouveaux constituants ou de nouveaux agencements des matériaux, une étape de simulation permettrait d'optimiser la phase de prototypage.

Bibliographie

- ABBASI, F., JAVAUX, M., VANCLOOSTER, M. et an FEYEN (2012). Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments. *Geoderma*, pages 480–490. (Cited on pages [38](#), [102](#), [122](#) and [123](#).)
- ADIVET (2007). *Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées*. ADIVET. (Cited on pages [13](#), [42](#) and [64](#).)
- ANDERSEN, C. T., FOSTER, I. D. L. et PRATT, C. J. (1999). The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation : development of a laboratory simulation experiment. *Hydrological Processes*, 13(4):597–609. (Cited on page [10](#).)
- ARAIRO, W. (2013). *Influence des cycles hydriques de la dessiccation et de l'humidification sur le comportement hydromécanique des géomatériaux non saturés*. Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (Cited on page [38](#).)
- ARGYRIS, J. H. et KELSEY, S. (1967). *Energy Theorems and structural analysis*. Butterworths, London, 3^{ème} édition. (Cited on page [98](#).)
- ARNOLD, C. et GIBBONS, C. (1996). Impervious surface coverage - the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 62(2):243–258. (Cited on page [10](#).)
- ATASOYA, N. A., SENB, B. et SELCUK, B. (2012). Using gauss - jordan elimination method with cuda for linear circuit equation systems. *Procedia Technology*, 1:31–35. (Cited on page [100](#).)
- AURIAULT, J. (1991). Heterogeneous medium. is an equivalent macroscopic description possible? *International Journal of Engineering Science*, 29(7):785 – 795. (Cited on page [23](#).)
- BAIZE, D. (2000). *Guide des analyses en pédologie*. (Cited on page [46](#).)
- BAIZE, D. et GIRARD, M.-C. (2008). *Référentiel pédologique*, volume 1. Quae, Versailles, France, savoir faire édition. (Cited on pages [24](#) and [51](#).)
- BANTING, D., LI, J., MISSIOS, P., AU, A., CURRIE, B. A. et VERRATI, M. (2005). Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of toronto. Rapport technique, Earth and Environmental Technologies (OCE-ETech), Ryerson University, Toronto, Ontario. (Cited on page [14](#).)
- BAROGHEL-BOUNY, V. (2007). Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials : Part 1 : essential tool for analysis of hygral behavior and its relation to pore structure. *Cement Concrete Res*, 37(3):414–437. (Cited on page [38](#).)
- BARTOLI, F., REGALADO, C. M., BASILE, A., BUURMAN, P. et COPPOLA, A. (2007). Physical properties in european volcanic soils : a synthesis and recent developments. In ARNALDS, O., ÓSKARSSON, H., BARTOLI, F., BUURMAN, P., STOOPS, G. et GARCÍA-RODEJA, E., éditeurs : *Soils of Volcanic Regions in Europe*, pages 515–537. Springer Berlin Heidelberg. (Cited on page [51](#).)

- BASS, B. et BASKARAN, B. (2003). Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. Rapport technique NRCC-46737, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa (Canada). (Cited on pages 14, 57 and 126.)
- BEATTIE, D. et BERGHAGE, R. (2004). Green roof media characteristics : the basics. *In the 2nd Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference 2 : 411-16. Portland, Oregon, USA.* (Cited on page 13.)
- BENSOUSSAN, A., LIONS, J.-L. et PAPANICOLAU, G. (1978). *Asymptotic Analysis for Periodic Structures.* North-holland, Amsterdam. (Cited on page 23.)
- BERNARD, J. (2013). *Simulation de modèles stochastiques.* Université Claude Bernard - Lyon 1 - Institut Camille Jordan - UMR 5208 du CNRS, Villeurbanne. (Cited on page 28.)
- BERNDTSSON, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality : A review. *Ecological Engineering*, 36:351–360. (Cited on page 14.)
- BERRETTA, C., POË, S. et STOVIN, V. (2014). Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods : The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*, 511(0):374 – 386. (Cited on pages 55, 94, 116 and 120.)
- BERTHIER, E., de GOUVELLO, B., ARCHAMBAULT, F. et GALLIS, D. (2010). Bilan hydrique des toitures végétalisées : vers de meilleures compréhension et modélisation. *In* GRAIE, éditeur : *Novatech*, Lyon (France). Graie. (Cited on pages 27 and 87.)
- BEVEN, K. J. (2001). *Rainfall-runoff Modelling : The Primer.* Wiley-Blackwell. (Cited on page 28.)
- BOND, D. J. et THOMPSON, G. W. H. (2013). Flow modelling in green roof systems. *In Proceedings of the 2013 Final Honours Research Project, Dept. of Civil and Natural Ressources Engineering*, volume 3, pages 129–136. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. (Cited on pages 66, 100, 123 and 127.)
- BONZON, B. et PICARD, D. (1969). Matériel et méthodes pour l'étude de la croissance et du développement en pleine terre des systèmes racinaires. *Cahier O.S.T.R.O.M. série Biologie*, 9:3–18. (Cited on page 76.)
- BOUFADEL, M. C., XIA, Y. et LI, H. (2011). Modeling solute transport and transient seepage in a laboratory beach under tidal influence. *Environmental Modelling & Software*, 26(7):899–912. (Cited on page 99.)
- BOUZOUIDJA, R., CLAVERIE, R., SERE, G. et LACROIX, D. (2013). Characterization of the thermo-hydric functioning of *in situ* green roof. *La Houille Blanche*, 5:62 – 69. (Cited on pages 42 and 70.)
- BOUZOUIDJA, R., SÉRÉ, G., CLAVERIE, R., NUTTENS, L. et LACROIX, D. (2014). Green roof aging : quantifying the impact of substrate evolution on hydraulic performances. *submitted in Advances in Water Resources.* (Cited on pages 27 and 59.)
- BOZONNET, E. (2006). Les microclimats urbains et la demande énergétique du bâti. *In XXIVemes Rencontres Universitaires de Génie Civil 2006 - PRIX JEUNES CHERCHEURS.* (Cited on page 8.)
- BROOKS, R. H. et COREY, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology papers*, 3:1–37. (Cited on pages K, 33, 34, 35 and 37.)

- BRUAND, A. et COQUET, Y. (2005). *Science du Sol et Environnement*, hal-00090203 Les sols et le cycle de l'eau., pages 345–363. (Cited on pages 46 and 47.)
- BRUAND, A., COUSIN, I., NICOULLAUD, B., DUVAL, O. et BEGON, J. (1996). Backscattered electron scanning images of soil porosity for analyzing soil compaction around roots. *Soil science society of America journal*, 60:895–901. (Cited on page 53.)
- BRUTSAERT (1982). Evaporation into the atmosphere : Theory, history and applications. *Kluwer Academic Publishers*. (Cited on page 159.)
- BUCCOLA, N. et SPOLEK, G. (2011). A pilot-scale evaluation of greenroof runoff retention, detention, and quality. *Water, Air, & Soil Pollution*, 216(1-4):83–92. (Cited on pages 66 and 77.)
- CALVET, R. (2003). *Le sol propriétés et fonctions. Tome 1, Constitution, structure, phénomènes aux interfaces*. Paris : éd. France agricole. (Cited on page 53.)
- CANNAVO, P., HAFDHI, H. et MICHEL, J.-C. (2011). Impact of root growth on the physical properties of peat substrate under a constant water regimen. *HortScience*, 46:1394–1399. (Cited on page 28.)
- CANNAVO, P. et MICHEL, J.-C. (2013). Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia Horticulturae*, 151:11–21. (Cited on page 24.)
- CANNAVO, P., VIDAL-BEAUDET, L. et GROSBELLET, C. (2014). Prediction of long-term sustainability of constructed urban soil : impact of high amounts of organic matter on soil physical properties and water transfer. *Soil Use and Management*, 30(2):272–284. (Cited on page 123.)
- CARDENAS GOMEZ, P. A. (2007). *Caractéristiques hydrauliques de matériaux granitiques concassés*. Thèse de doctorat, Université Laval. (Cited on page 32.)
- CARTER, T. et JACKSON, C. R. (2007). Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning*, 80(12):84 – 94. (Cited on pages 15 and 26.)
- CELIA, M., BOUOUTAS, E. T. et ZARBA, R. L. (1990). A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resour. Res.*, 26:1483–1496. (Cited on page 166.)
- CHANDRA, S. et BERTSSON, L. (2002). 7 - physical properties of lightweight aggregate concrete. In CHANDRA, S. et BERTSSON, L., éditeurs : *Lightweight Aggregate Concrete*, pages 167 – 229. William Andrew Publishing, Norwich, NY. (Cited on page 43.)
- CHIU, C., YAN, W. et YUEN, K.-V. (2012). Reliability analysis of soil–water characteristics curve and its application to slope stability analysis. *Engineering Geology*, 135-136:83–91. (Cited on page 102.)
- CHKIR, N. (2010). *Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie – débit*. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris – Sciences et Techniques de l'Environnement – MISE. (Cited on page 29.)
- CHOCAT, B. (1997). *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Lavoisier, Paris, France. (Cited on page 28.)
- CHOISNEL, E. (1992). Le calcul du bilan hydrique du sol : options des modélisation et niveaux de complexité. *Science du sol*, 30:15–31. (Cited on page 39.)

- CHOUMERT, J. (2009). *Analyse économique d'un bien public local : les espaces verts*. Thèse de doctorat, Université d'Angers. (Cited on page 8.)
- CLARIDGE, N. et EDWARDS, L. (2012). Green roof technology - research, design and implementation of a green roof at the university of canterbury. Report, p. 37, UC sustainability research scholarship Report. (Cited on page 21.)
- CLAVERIE, R., BOUYER, J., M., I. D. et MOUTTON (7–8 juillet 2011). Caractérisation des îlots de chaleur urbains par mesure dynamique embarquée : premiers résultats sur la ville de nancy. Metz (France). Colloque scientifique international *2R2CV - Renforcer la Résilience au Changement Climatique des Villes : du diagnostic spatialisé aux mesures d'adaptation*. (Cited on page 15.)
- CODDINGTON, E. A. et LEVINSON, N. (1955). *Theory of Ordinary Differential Equations*. McGraw-Hill, New York. (Cited on page 166.)
- CRAIGG, T. L. et HOWES, S. W. (2007). Assessing quality in volcanic ash soils. In *Page-Dumroese, Deborah ; Miller, Richard ; Mital, Jim ; McDaniel, Paul ; Miller, Dan, tech. eds. 2007. Volcanic-Ash-Derived Forest Soils of the Inland Northwest : Properties and Implications for Management and Restoration. 9-10 November 2005 ; Coeur d'Alene, ID.*, pages 47– 66. Proceedings RMRS-P-44 ; Fort Collins, CO : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. (Cited on page 51.)
- CRAWFORD, N. et LINSLEY, R. (1964). A conceptual model of the hydrologic cycle. *International Association of Hydrological Sciences*, 63:573–587. (Cited on page 29.)
- DANO, C., HICHER, P.-Y., IBRAHIM-KHALIL, BENAZZOUEZ et TOUZO, J.-Y. L. (2006). Une cellule triaxiale de grande taille pour l'étude du comportement des sols. In *24èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil - Construire : les nouveaux défis*, La Grande Motte. (Cited on page 55.)
- DARCY, H. (1856). *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont & atlas. (Cited on pages 31 and 49.)
- DE BACKER, L., KUYPERS, J. et WOITRININ, Y. (1983). Surveillance quantitative et qualitative de la recharge artificielle à louvain-la-neuve. In *Groundwater and Water Resources Planning, Proceedings of the UNESCO-IAH-IAHS*, pages 35–44, Koblenz. (Cited on page 65.)
- DE GOUVELLO, B. et BERTHINEAU, B. (2005). Caractériser les performances des toitures végétalisées . le point sur l'eau. Rapport technique 3535, e-Cahier du CSTB. (Cited on pages 25, 26 and 27.)
- de KREIJ, C., van ELDEREN, C., MEINKEN, E. et FISCHER, P. (1995). Extraction methods for chemical quality control of mineral substrates. *Acta Horticulturae*, 401:61–70. (Cited on page 55.)
- de MUNCK, C. S., LEMONSU, A., BOUZOUIDJA, R., MASSON, V. et CLAVERIE, R. (2013). The greenroof module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within teb. *Geoscientific Model Development*, 6(6):1941–1960. (Cited on pages 9, 15, 87, 100, 101 and 126.)
- DEBANO, L. F. (2000). Water repellency in soils : a historical overview. *Journal of Hydrology*, 231-232:4–32. (Cited on page 49.)

- DEFFONTAINE, J. P. (1964). Une méthode d'appréciation du système racinaire sous prairie. *Fourrages*, 19:91–96. (Cited on page 76.)
- DEL BARRIO, E. P. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2):179 – 193. (Cited on page 15.)
- DENARDO, J. C., JARRETT, A. R., MANBECK, H. B., BEATTIE, D. J. et BERGHAGE, R. D. (2005). Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the ASAE*, 48(48):1491–1496. (Cited on page 13.)
- DÉQUÉ, M., ROWELL, D., LÜTHI, D., GIORGI, F., CHRISTENSEN, J., ROCKEL, B., JACOB, D., KJELLSTRÖM, E., CASTRO, M. D. et van den HURK, B. (2007). An intercomparison of regional climate simulations for europe : assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81(1):53–70. (Cited on page 9.)
- DOYA, M., DJEDJIG, X. B. R. et OULDBOUKHITINE, S. (2011). Description des mesures végétales du 23/09/2011. Unpublished report. (Cited on page 101.)
- DUPONT (2001). *Modélisation Dynamique Et Thermodynamique De La Canopée Urbaine : Réalisation Du Modèle De Sols Urbains Pour Submeso*. Thèse de doctorat, Université de Nantes. (Cited on page 163.)
- DURHMAN, A., ROWE, D. et RUGH, C. (2006). Effect of watering regimen on chlorophyll fluorescence and growth of selected green roof plant taxa. *HortScience*, 41(7):1623–1628. (Cited on pages 13 and 14.)
- DURNER, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2):211–223. (Cited on pages 123 and 127.)
- EMILSSON, T., BERNDTSSON, J. C., MATTSSON, J. E. et ROLF, K. (2007). Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems. *Ecological Engineering*, 29(3):260 – 271. (Cited on page 14.)
- EYLES, N. (1997). Environmental geology of a canadian supercity ; the greater toronto area. *Environmental Geology of Urban Areas*, N. Eyles, Editor. 1997, Geological Association of Canada, *Geotext*, 3:7–80. (Cited on page 9.)
- FEDDES, R., BRESLER, E. et NEUMAN, S. P. (1974). Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. *Water Resour. Res.*, 10(6):1199–1206. (Cited on page 100.)
- FIORETTI, R., PALLA, A., LANZA, L. G. et PRINCIPI, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and environment*, 45(8):1890–1904. (Cited on page 25.)
- GENDREAU, N., P, P. R., KOVACS, Y., C, C. S. et F, F. L. (2007). Les toitures végétalisées, une technique de gestion de l'eau devenue incontournable lors des nouvelles constructions respectant les critères de la haute qualité environnementale. In *6ème Conférence sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie*. (Cited on pages 12 and 14.)
- GETTER, L., ROWE, B. et ANDERSON, A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31:225–231. (Cited on pages 28, 121 and 122.)

- GILLI, M. (2006). Méthodes numériques. Rapport technique, Département d'économétrie - Université de Genève. (Cited on page 100.)
- GROSSEIN, O. (2009). *Modélisation et simulation numérique des transferts couplés d'eau, de chaleur et de solutés dans le patrimoine architectural en terre, en relation avec sa dégradation*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble - Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement. Thèse de doctorat dirigée par Laurent, Jean-Paul et Oxarango, Laurent Océan, atmosphère et hydrologie Grenoble 1 2009. (Cited on page 23.)
- GUJISAITE, V. (2008). *Transport réactif en milieux poreux non saturés*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine – Institut National Polytechnique de Lorraine – laboratoire des sciences du génie chimique – laboratoire sols et environnement. (Cited on pages 33 and 151.)
- GUNZBURGER, Y. et MAGNET, V. (2014). Stress inversion and basement-cover stress transmission across weak layers in the paris basin, france. *Tectonophysics*, 617:44–57. (Cited on page 103.)
- GUO, P. (2012). Dependency of tortuosity and permeability of porous media on directional distribution of pore voids. *Transport in Porous Media*, 95(2):285–303. (Cited on page 108.)
- HILTEN, R. N., LAWRENCE, T. M. et TOLLNER, E. W. (2008). Modeling stormwater runoff from green roofs with hydrus-1d. *Journal of Hydrology*, 358:288–293. (Cited on pages 31, 33, 37, 48, 87, 95, 100 and 126.)
- HINGRAY, B., PICOUE, C. et MUSY, A. (2009). *Hydrologie - Tome 2 : Une science pour l'ingénieur*. Broché. (Cited on pages 28 and 104.)
- HOPMANS, J. W. et DANE, J. H. (1986). Temperature dependence of soil water retention curves. *Soil Science Society of America Journal* 50, 562–567, 50:562–567. (Cited on page 102.)
- HOPMANS, J. W. et ROLSTON, D. E. (2000). *SSC 107 - Introductory soil physics*. University of California, Davis. (Cited on pages 21 and 22.)
- HUDSON, M. (2000). Le besoin d'une nature urbaine : un rapport de recherche. Evergreen. (Cited on page 14.)
- HUMBERT, P. (1984). Application de la méthode des éléments finis aux écoulements en milieu poreux. Rapport technique 132, Laboratoire central des Ponts et chaussées. (Cited on page 98.)
- HUOT, H. (2013). *Formation, fonctionnement et évolution d'un Technosol sur des boues sidérurgiques*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine. (Cited on pages 48, 51 and 73.)
- HUOT, H., SIMONNOT, M.-O., MARION, P., YVON, J., DONATO, P. et MOREL, J.-L. (2013). Characteristics and potential pedogenetic processes of a technosol developing on iron industry deposits. *Journal of Soils and Sediments*, 13(3):555–568. (Cited on pages 27 and 59.)
- HWANG, S. I. et POWERS, S. E. (2003). Estimating unique soil hydraulic parameters for sandy media from multi-step outflow experiments. *Advances in Water Resources*, 26(4):445 – 456. (Cited on pages 104 and 108.)

- INOUE, M., ŠIMŮNEK, J., HOPMANS, J. et CLAUSNITZER, V. (1998). In situ estimation of soil hydraulic function using a multistep soil-water extraction technique. *Water resources research*, 34(5):1035–1050. (Cited on page 104.)
- IPCC (2007). Climate change 2007 : Mitigation of climate change. synthesis report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. (Cited on page 8.)
- IUSS, W. G. (2014). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports 106, WRBWorld Reference Base for Soil Resources 2014, FAO, Rome. (Cited on pages 24, 27, 58 and 125.)
- JACQUET, S. (2011). Performance énergétique d’une toiture végétale au centre-ville de montréal |. Résumé de mémoire, Centre d’Écologie Urbaine de Montréal, ISBN 987-2-9810129-8-2, Available at : <http://www.ecologieurbaine.net/node/1214>. (Cited on pages 15 and 16.)
- JARRETT, A. R., HUNT, W. et BERGHAGE, R. (2006). Annual and individual-storm green roof stormwater response models. In *the American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, Portland OR. Paper 062310*. (Cited on page 13.)
- JAVAUX, M. et VANCLOOSTER, M. (2006). Scale-dependency of the hydraulic properties of a variably saturated heterogeneous sandy subsoil. *Journal of Hydrology*, 327(3-4):376–388. (Cited on page 38.)
- JONES, M. R., ZHENG, L. et LANDS, M. D. N. (2002). Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for min. *Void Ratio*, 35:301–309. (Cited on page 49.)
- KASMIN, H. et STOVIN, V. R. and Hathway, E. A. (2010). Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs. *Water science and technology*, 62(4):898–905. (Cited on pages 100 and 125.)
- KIM, K.-G. (2004). The application of the biosphere reserve concept to urban areas : the case of green rooftops for habitat network in seoul. In *Urban Biosphere and Society : Partnership of Cities. Annals of the New York Academy of Sciences 1023*, pages 187–214. Alfsen-Norodom, C., Lane, B.D., Corry, M. (Eds.). (Cited on page 14.)
- KLUTE, A. et DIRKSEN, C. (1986). *Methods of soil analysis - part 1. Physical and mineralogical methods*, chapitre Hydraulic conductivity and diffusivity. Laboratory methods, pages 687–734. Klute (ed). (Cited on page 57.)
- KÖHLER, M. et SCHMIDT, M. (2003). Study of extensive green roofs in berlin : Part iii retention of contaminants. Rapport technique, International Report, Technical University of Berlin. (Cited on page 14.)
- KOK, S. (2004). Wet – weather flow management in the great lakes areas of concern. *Water Quality Research Journal of Canada*, 39(4):319 – 330. (Cited on page 24.)
- KOOL, J., PARKER, J. C. et van GENUCHTEN, M. T. (1985). Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation : I. theory and numerical studies. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 49:1348–1354. (Cited on page 104.)

- KOOL, J. B. et PARKER, J. C. (1987). Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 23(1):105–114. (Cited on pages 38, 101 and 102.)
- KOSUGI, K., HOPMANS, J. et DANE, J. (2002). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*, chapitre Water Retention and Storage - Parametric Models, pages 739–758. Numéro 5. Soil Science Society of America Book Series. (Cited on pages 34 and 35.)
- KRONAVETER, L., SHAMIR, U. et KESSLER, A. (2001). Water-sensitive urban planning : Modeling on-site infiltration. *Journal of Water Resources Planning & Management-ASCE*, 127(2):78–88. (Cited on page 10.)
- KUTILEK, M. (2004). Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil and tillage research*, 79:175–184. (Cited on page 27.)
- LABRECQUE, M. et VERGRIETE, Y. (2006). Étude des biotopes urbains et périurbains de la communauté métropolitaine de montréal. Rapport technique, Conseil Régional de l'Environnement de Laval. (Cited on pages 8, 10 and 24.)
- LASSALLE, F. (2008). *Végétalisation extensives des terrasses et toitures*. Le moniteur. (Cited on page 11.)
- LAWRENCE, D. M., SLATER, A. G., ROMANOVSKY, V. E. et NICOLSKY, D. J. (2008). Sensitivity of a model projection of near-surface permafrost degradation to soil column depth and representation of soil organic matter. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 113(F2):n/a–n/a. (Cited on pages 100 and 126.)
- LAZZARIN, R. M., CASTELLOTTI, F. et BUSATO, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37(12):1260 – 1267. (Cited on pages 8 and 27.)
- LEDIEU, J., DE RIDDER, P., DE CLERCK, P. et DAUTREBANDE, S. (1986). A method of measuring soil moisture buy time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 88(3-4):319–328. (Cited on page 157.)
- LENHART, T., ECKHARDT, K., FOHRERAND, N. et FREDE, H.-G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Phys. Chem. Earth.*, 27((9-10)):645–654. (Cited on page 103.)
- LI, Y. et BABCOCK JR., R. W. (2014). Green roof hydrologic performance and modeling : a review. *Water Science & Technology*, 69(4):727–738. (Cited on page 39.)
- LIONS, J.-L., MADAY, Y. et TURINICI, G. (2001). Résolution d'edp par un schéma en temps «pararéel ». *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series I - Mathematics*, 332(7):661 – 668. (Cited on page 98.)
- LIU, K. K. Y. (2005). Performance of green roof systems. Rapport technique NRCC-47705, National Research Council Canada, Toronto, Canada. (Cited on page 27.)
- LONDRA, P. A. (2010). Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady – state laboratory method. *Hortscience*, 45(7):1106–1112. (Cited on page 42.)
- LUNDHOLM, J. et MARLIN, A. (2006). Habitat origins and microhabitat preferences of urban plant species. *Urban Ecosyst*, 9:139–159. (Cited on page 14.)

- MACIVOR, J. S. et LUNDHOLM, J. (2011). Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37:407–417. (Cited on page 14.)
- MAGNET, V., GIRAUF, A. et HOMAND, F. (2008). Parameter sensitivity analysis for a drücker–prager model following from numerical simulations of indentation tests. *Computational Materials Science*, 44:385–391. (Cited on page 103.)
- MAIER, U., DEBIASE, C., BAEDER-BEDERSKI, O. et BAYER, P. (2009). Calibration of hydraulic parameters for large-scale vertical flow constructed wetlands. *Journal of Hydrology*, 369:260–273. (Cited on pages 56 and 57.)
- MANDAL, U. K., SARMA, K. S. S., VICTOR, U. S. et RAO, N. H. (2002). Profile water balance model for irrigated and rainfed systems. *Agronomy Journal*, 94(5):1204–1211. (Cited on page 37.)
- MARLE, C. (1967). écoulements monophasiques en milieu poreux. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 22(10):1471–1509. (Cited on page 23.)
- MARQUARDT, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J. Appl. Math.*, 11:431–441. (Cited on page 103.)
- MARTIN, B. K. (2008). The dynamic stormwater response of a green roof. Mémoire de D.E.A., The Faculty of graduate studies of the university of Guelph. (Cited on pages 30 and 31.)
- MENTENS, J., RAES, D. et HERMY, M. (2003). Effect of orientation on the water balance of greenroofs. *In Proceedings of the 1st Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, volume 1, pages 363–371, Chicago, IL. (Cited on page 30.)
- MENTENS, J., RAES, D. et HERMY, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and urban planning*, 77:217–226. (Cited on pages 15, 24, 26, 28, 95 and 125.)
- MERMOUD, A. (2005). *Cours de physique du sol I*, chapitre Dynamique de l'eau du sol – Copie des transparents. (Cited on page 28.)
- MESGOUEZ, A., BUIS, S., RUY, S. et LEFEUVE-MESGOUEZ, G. (2014). Uncertainty analysis and validation of the estimation of effective hydraulic properties at the darcy scale. *Journal of Hydrology*, 512:303–314. (Cited on pages 51, 54 and 55.)
- METSELAAR, K. (2012). Water retention and evapotranspiration of green roofs and possible natural vegetation types. *Resources conservation and recycling*, 64(SI):49–55. (Cited on pages 24 and 39.)
- MOISSELIN, J., SCHNEIDER, M., CANELLAS, C. et MESTRE, O. (2002). Les changements climatiques en France au xxe siècle : étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, 38:45–56. (Cited on page 8.)
- MONTEITH, J. (1965). Evaporation and the environment, the state and movement of water in living organisms. *XIXth symposium. Cambridge University Press, Swansea*:205–234. (Cited on pages 101 and 160.)
- MOODY, S. S. (2012). Development of dynamic thermal performance metrics for eco-roof systems. Mémoire de D.E.A., Portland State University. (Cited on page 116.)

- MUALEM, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 1:513–522. (Cited on pages 33, 40, 48, 107 and 108.)
- MUSY, A. et SOUTTER, M. (1991). *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes. (Cited on pages K, 20, 21, 23, 33, 38, 44, 46, 47, 48, 51 and 55.)
- NAASZ, R. J., MICHEL, C. et CHARPENTIER, S. (2005). Measuring hysteretic hydraulic properties of peat and pine bark using a transient method. *Soil Science Society of America Journal*, 69:13–22. (Cited on page 38.)
- NAGASE, A. et DUNNETT, N. (2010). Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs : Effects of watering and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 97:318–332. (Cited on page 14.)
- NASH, J. et SUTCLIFFE, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3):282 – 290. (Cited on page 104.)
- NEUMAN, S. P. R. A. F. et BRESLER, E. (1974). Finite element simulation of flow in saturated–unsaturated soils considering water uptake by plants. Third Annual Report Project No. A10–SWC–77, Hydraulic Engineering Lab., Technion, Haifa, Israel. (Cited on page 98.)
- NGO, V. V., LATIFI, M. A. et SIMONNOT, M.-O. (2013). Estimability analysis of single-porosity model parameters from lysimeter data. *Transp Porous Med*, 98:485–504. (Cited on page 104.)
- NIACHOU, A., PAPAKONSTANTINOY, K., SANTAMOURIS, M., TSANGRASSOULIS, A. et MIHALAKAKOU, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7):719 – 729. (Cited on page 15.)
- NIEBER, J. (1996). Modeling finger development and persistence in initial dry porous media. *Geoderma*, 70:209–229. (Cited on pages 49 and 112.)
- NIELSEN, D. R. et LUCKNER, L. M. (1992). Theoretical aspects to estimate reasonable initial parameters and range limits in identification procedures for soil hydraulic properties. In *Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, edited by M. Th van Genuchten, F. J. Leij, and L. J. Lund, pages 147–160, University of California, Riverside. (Cited on page 102.)
- NIGEL DUNNET, N. K. (2008). *Toits et murs végétaux*. édition du Rouergue. (Cited on pages 11, 12, 13, 28 and 57.)
- NIU, H., CLARK, C. et ADRIAENS, J. Z. P. (2010). Scaling of economic benefits from green roof implementation in washington, dc. *Environmental Science & Technology*, 44(11):4302–4308. (Cited on page 15.)
- OKE, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. 2nd edition. Methuen, N.Y. (Cited on page 8.)
- OLDEMAN, L. R., GREENLAND, D. et SZABOLCS, I. (1994). *Soil Resilience and Sustainable Land Use*, chapitre The global extent of soil degradation, page 99–118. CAB International, Wallingford. (Cited on page 24.)

- OULDOUKHITINE, S.-E., BELARBI, R. et DJEDJIG, R. (2012). Characterization of green roof components : Measurements of thermal and hydrological properties. *Building and Environment*, 56:78–85. (Cited on pages 11, 14, 26, 101 and 122.)
- PALLA, A., BERRETTA, C., LANZA, L. et LA BARBERA, P. (2008). Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale. *In 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK*. (Cited on pages 24, 25, 26 and 95.)
- PALLA, A., GNECCO, I. et LANZA, L. (2009). Unsaturated 2d modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *Journal of Hydrology*, 379:193–204. (Cited on pages 48, 57, 78, 87, 94, 100, 116, 120 and 126.)
- PALLA, A., GNECCO, I. et LANZA, L. G. (2012). Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrological Processes*, 26(1):73–84. (Cited on pages 37, 39, 48, 94 and 100.)
- PARE (2006). *Contribution à la détermination d'un terme du bilan hydrologique dans la région d'Errachidia-Tafilalet : Evaluation de l'évapotranspiration de référence et de l'évaporation à travers la zone non saturée de la Plaine de Tafilalet*. Thèse de doctorat, Université Mohammed V - Agdal. (Cited on page 160.)
- PECK, S. W., CALLAGHAN, C., KUHN, M. E. et BASS, B. (1999). Greenbacks from green roofs : forging a new industry in Canada. status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion. Rapport technique, Canada Mortgage and Housing Corporation. (Cited on pages 9 and 15.)
- PENDEXTER, W. et FURBISH, D. (1991). Development of a heterogeneous moisture distribution and its influence on the evolution of preferred pathways of flow in an unsaturated sandy soil. *In Proceeding of the national symposium, Chicago, Illinois, U.S.A. 16-17 Dec. 1991, American Soc. Of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA*, page 104–112. (Cited on page 49.)
- PENMAN, H. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London*, 193:120–145. (Cited on pages 101 and 159.)
- PETERS, A. et DURNER, W. (2008). Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356(1–2):147 – 162. (Cited on page 47.)
- PETERS, A., DURNER, W. et WESSOLEK, G. (2011). Consistent parameter constraints for soil hydraulic functions. *Advances in Water Resources*, 34(10):1352 – 1365. (Cited on pages 50 and 54.)
- PHILIP, J. (1975). Stability analysis of infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39:1042–1049. (Cited on page 49.)
- PIRES, L. F., CÁSSARO, F. A., REICHARDT, K. et BACCHI, O. O. (2008). Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. *Soil and Tillage Research*, 100(1–2):72 – 77. (Cited on page 37.)
- PROWELL, E. S. (2006). An analysis of stormwater retention and detention of modular green roof blocks. Mémoire de D.E.A., University of Georgia, Athens Georgia. (Cited on pages 30 and 31.)

- RAMIER, D. (2005). *Bilan Hydrique des voiries Urbaines : Observations et Modelisation*. Thèse de doctorat, l'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes. (Cited on page 101.)
- REYNOLDS, W. D., BOWMAN, B. T., BRUNE, R. R., DRURY, C. F. et TAN, C. S. (2000). Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64:478–484. (Cited on page 55.)
- RITSEMA, C., DEKKER, L., NIEBER, J. et STEENHUIS, T. (1998). Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resour. Res.*, 34:555–567. (Cited on page 49.)
- RITSEMA, C., DEKKER, L., van der ELSEN, E., OOSTINDIE, K., STEENHUIS, T. et NIEBER, J. (1997). Recurring fingered flow pathways in a water repellent sandy field soil. *J. of Hydrology and Earth System Sciences*, 4:777–786. (Cited on page 49.)
- RITSEMA, C., STEENHUIS, T., PARLANGE, J.-Y. et DEKKER, L. (1996). Predicted and observed finger diameters in field soils. *Geoderma*, 70:185–196. (Cited on page 49.)
- ROCHE, M. (1971). Les divers types de modèles d'éterministes. *La Houille Blanche*, 2:111–129. (Cited on page 30.)
- ROSSI, C. et NIMMO, J. (1994). Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness. *Water Resour Res*, 30:701–708. (Cited on page 54.)
- ROWELL, D. L. (1994). *Soil Sciences. Methods and Applications*. Longman. (Cited on page 23.)
- RUIZ, V. C. (2009). *Transport de colloïdes en milieu poreux : étude expérimentale*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I -. (Cited on page 20.)
- RUSSEL, E. W. (1961). *Soils conditions ans plant growth*. Longmans, London. (Cited on page 76.)
- SALTELLI, A., RATTO, M., ANDRES, T., CAMPOLONGO, F., CARIBONI, J., GATELLI, D., SAISANA, M. et TARANTOLA, S. (2008). *Sensitivity Analysis : From Theory to Practice*. JOHN WILEY & SONS, Ltd. (Cited on page 103.)
- SANCHEZ-PALENCIA, E. (1980). *Non-Homogeneous Media and Vibration Theory*. Springer-Verlag. (Cited on page 23.)
- SANDERS, R. A. (1986). Urban vegetation impacts on the hydrology of dayton, ohio. *Urban Ecology*, 9(3–4):361 – 376. <ce :title>Special Issue Ecology of the Urban Forest II</ce :title>. (Cited on page 10.)
- SARRAF, A., DOLATABADI, S. S. et SALEHPOOR, M. (2012). Review process of water movement in soil in the sprinkler irrigation system using a simulation model hydrus-1d. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, LV-2012:102–106. (Cited on page 100.)
- SAYED, O. H. (2001). Crassulacean acid metabolism 1975–2000, a checklist. *Photosynthetica*, 39:339–352. (Cited on pages 14 and 75.)
- SCHAAP, M. G. et LEIJ, F. J. (2000). Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the mualem-van genuchten model. *Society of America Journal*, 65(3):843–851. (Cited on page 108.)

- SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J. et VAN GENUCHTEN, M. (2001). rosetta : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3–4):163 – 176. (Cited on pages 53, 54 and 55.)
- SCHINDLER, U. (1980). Ein schnellverfahren zur messung der wasserleitfähigkeit im teilgesättigten boden an stechzylinderproben. *Arch. Acker-u. Pflanzenbau u. Bodenkd*, 24. (Cited on page 48.)
- SCHRADER, S. et BOENING, M. (2006). Soil formation on green roofs and its contribution to urban biodiversity with emphasis on collembolans. *Pedobiologia*, 50:347–356. (Cited on page 28.)
- SCHWAGER, J. (2014). *Les toitures végétalisées, puits et sources d'éléments en traces métalliques*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine. (Cited on page 74.)
- SCHWAGER, J., SCHAAL, L., SIMONNOT, M.-O., CLAVERIE, R., RUBAN, V. et MOREL, J.-L. (2014). Emission of trace elements and retention of cu and zn by mineral and organic materials used in green roofs. *Journal of Soils and Sediments*, pages 1–13. (Cited on pages 14, 95 and 112.)
- SCOTT, P. S., FARQUHAR, G. J. et KOUWEN, N. (1983). Hysteresis effects on net infiltration. In *Advances in infiltration : proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration*, pages 163–170, Hyatt Regency Illinois Center, Chicago, Illinois. (Cited on pages 38 and 101.)
- SÉRÉ, G. (2011). *L'eau dans le sol - Module Eau dans les Agrosystèmes - 2A agro ENSAIA*. Université de Lorraine. (Cited on pages 22 and 24.)
- SÉRÉ, G., OUVRARD, S., MAGNET, V., PEY, B., MOREL, J. et SCHWARTZ, C. (2012). Predictability of the evolution of the soil structure using water flow modeling for a constructed technosol. *gsvadzone*, 11(1). (Cited on pages 94, 103 and 108.)
- SÉRÉ, G., SCHWARTZ, C., OUVRARD, S., RENAT, J., WATTEAU, F. et MOREL, J. (2010). Early pedogenic evolution of constructed technosol. *Journal of Soils & Sediments*, 10:1246–1254. (Cited on pages 27 and 59.)
- SHE, N. A. et PANG, J. (2010). Physically based green roof model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6):458–464. (Cited on page 57.)
- SHUTTLEWORTH (1993). *Evaporation*. Handbook of hydrology. McGraw-Hill, New-York. (Cited on page 160.)
- SILLERS, W., FREDLUND, G. et ZAKERZADEH, N. (2001). Mathematical attributes of some soil – water characteristic curve models. *geotechnical and Geological Engineering*, 19:243 – 283. (Cited on pages 35 and 36.)
- SMITH, R. E. (1993). Cannulation experiments on the role of soil hydraulic characteristics. In *agro-ecosystems. Modeling Geo-Biosphere Processes*, volume 2, page 1–14. (Cited on page 38.)
- SOBOL, I. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1-3):271–280. (Cited on page 123.)
- SOBOL, I. et KUCHERENCO, S. (2009). Derivative based global sensitivity measures and their link with global sensitivity indices. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(10):3009–3017. (Cited on page 123.)

- SOLONE, R., BITTELLI, M., TOMEI, F. et MORARI, F. (2012). Errors in water retention curves determined with pressure plates : Effects on the soil water balance. *Journal of Hydrology*, pages 65–74. (Cited on page 53.)
- SPENGEN, J. V. (2010). The effects of large-scale green roof implementation on the rainfall-runoff in tropical urbanized subcatchment - a singapore case study. Mémoire de D.E.A., Delft University of technology, Faculty Civil Engineering & Geosciences. (Cited on page 31.)
- STARR, J., DEROO, H., FRINK, C. et PARLANGE, J.-Y. (1978). Leaching characteristics of a layered field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:386–391. (Cited on page 49.)
- STARR, J. L. et PALTINEANU, J. C. (2002). *Methods of Soil Analysis : Part 4 Physical Methods*, chapitre Methods for Measurement of Soil Water Content : Capacitance Devices, pages 463–474. Soil Science Society of America, Inc. (Cited on page 157.)
- STOVIN, V. (2010). The potential of green roofs to manage urban stormwater. *Water and Environment Journal*, 24(3):192–199. (Cited on page 39.)
- STOVIN, V., VESUVIANO, G. et KASMIN, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under {UK} climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414–415(0):148 – 161. (Cited on page 39.)
- TARDIEU, F. et MANICHON, H. (1986). Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. *Agronomie*, 6:345–354. (Cited on page 73.)
- TEEMUSK, A. et MANDER, A. (2009). Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane : A case study from estonia. *Building and Environment*, 44(3):643 – 650. (Cited on page 15.)
- TEEMUSK, A. et MANDER, A. (2010). Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecological Engineering*, 36(1):91 – 95. (Cited on page 15.)
- THEODOSIOU, T. (2009). Green roofs in buildings : thermal and environmental behaviour. *Advanced Building Energy*, 3:271–288. (Cited on page 15.)
- TOPP, G., DAVIS, J. et ANNAN, A. (1980). Electromagnetic determination of soil water content : measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3):574–582. (Cited on page 157.)
- TRABELSI, A. (2010). *Études numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle. (Cited on page 38.)
- U.S. EPA (2007). In stream corridor restoration : Principles, processes, and practices (10/98) by the federal interagency stream restoration working group (fisrwg) (15 federal agencies of the u.s.). Rapport technique. (Cited on page 8.)
- U.S.D.A. (1975). « soil taxonomy ». agriculture handbook nr 436, soil survey staff. Rapport technique, U.S. Department of Agriculture, Washington. (Cited on page 52.)
- VAN GENUCHTEN, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America journal*, 44:892 – 897. (Cited on pages K, 6, 33, 35, 36, 37, 38, 40, 47, 49, 54, 101, 102 and 108.)

- VAN GENUCHTEN, M. T. (1981). Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments. Research Report 119, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, CA,. (Cited on page 104.)
- VAN WAMBEKE, A., KINDERMANS, J. M., BONNET, H. M. et BRÜLL, A. (1976). *Mode opératoire : Réduction des échantillons de sols en laboratoire*. Modes opératoires de géotechnique - Centre de Recherches Routières, Boulevard de la Woluwe 42, 1200 Bruxelles, centre de recherches routières édition. (Cited on page 43.)
- VAN WOERT, N., ROWE, D., ANDERSEN, J., RUGH, C., FRENANDEZ, R. et XIAO, L. (2005). Green roof stormwater retention : Effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*, 34(3):1036–1044. (Cited on page 39.)
- VANCLOOSTER, M. et BIELDERS, C. (2004). Hydrodynamique des sols - geru -. syllabus du cours, Université catholique de Louvain. (Cited on page 104.)
- VEREecken, H., KAISER, R., DUST, M. et PÜTZ, T. (1997). Evaluation of the multistep outflow method for the determination of unsaturated hydraulic properties of soils. *Soil Science*, 162(9):618–631. (Cited on page 104.)
- VILA, A., PÉREZ, G., SOLÉ, C., FERNÁNDEZ, A. et CABEZA, L. (2012). Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. *Building and Environment*, 48:101–106. (Cited on pages 51 and 55.)
- VILLARREAL, E. L., SEMADENI-DAVIES, A. et BENGTTSSON, L. (2004). Inner city stormwater control using a combination of best management practices. *Ecological Engineering*, 22(4–5):279 – 298. (Cited on pages 9 and 24.)
- VOGEL, T., HUANG, K., ZHANG, R. et VAN GENUCHTEN, M. T. (1996). The hydrus code for simulating one-dimensional water flow, solute transport, and heat movement in variably-saturated media, version 5.0. Research report 140, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA. (Cited on page 165.)
- VOGEL, T., VAN GENUCHTEN, M. et CISLEROVA, M. (2001). Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advanced in Water Resources*, 24(2):133–144. (Cited on pages 35 and 37.)
- ŠIMŮNEK, J. (2006). *Models of Water Flow and Solute Transport in the Unsaturated Zone*. John Wiley & Sons, Ltd. (Cited on pages 100 and 166.)
- ŠIMŮNEK, J., SEJNA, M., SAITO, H., SAKAI, M. et VAN GENUCHTEN, M. (2008). *The HYDRUS-1D software package for simulating one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media*. Department of Environmental Sciences University of California Riverside, Riverside, California. (Cited on pages 100, 165, 166, 167 and 168.)
- ŠIMŮNEK, J. et VAN GENUCHTEN, M. (1996). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water resources research*, 32(9):2683–2896. (Cited on page 104.)
- ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. et SEJNA, M. (2005). The hydrus 1d software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, version 3.0, hydrus software series 1. Rapport technique, Dept. of Environmental Science, University of California Riverside, Riverside, California, USA. (Cited on page 104.)

- ŠIMŮNEK, J., WENDROTH, O. et VAN GENUCHTEN, M. (1998). Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Soil Science Society America*, 62:894–905. (Cited on page 98.)
- WEVER, G. et van LEEUWEN, A. (1995). Measuring mechanical properties of growing media and the influence of cucumber cultivation on these properties. *Acta Horticulturae*, 401:27–34. (Cited on pages 43 and 55.)
- WEYNANTS, M. (2011). *Linking soil hydraulic properties to structure indicators Experiments and modeling*. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain - Earth and Life Institute - Environmental Sciences. (Cited on page 33.)
- WHITAKER, S. (1967). Diffusion and dispersion in porous media. *AIChE Journal*, 13:420–427. (Cited on page 23.)
- WHITE, J. et SNODGRASS, E. (2003). Extensive greenroof plant selection and characteristics. *In the 1st Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference 1 : 166-76, Chicago, IL, USA*. (Cited on page 13.)
- WILSON, J. W. et DING, Y. (2007). A report on the estimated reserves and quality of the pozzolan deposits on north pagan island, commonwealth of northern mariana islands. Rapport technique, Department of Public Lands, Commonwealth of Northern Mariana Islands. (Cited on page 51.)
- WONG, N., CHEONG, D., YAN, H., SOH, J., ONG, C. et SIA, A. (2003). The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in singapore. *Energy and Buildings*, 35(4):353 – 364. (Cited on page 14.)
- YAO, Z., SHAW, B., KOU, B., MCAULEY, K. et BACON, D. (2003). Modeling ethelene/buten copolymerization with multi-site catalysts : Parameter estimability and experimental design. *Polym. React. Eng.*, 11(3):563–588. (Cited on page 103.)
- ZELLER, B. (1987). *Modélisation mécaniste et opérationnelle du bilan hydrique parcellaire*. Thèse de doctorat, Institut national agronomique Paris Grignon. (Cited on page 39.)

Mesures physiques

A.1 Analyse granulométrique

A.1.1 Principe

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, pour fractionner le substrat. Une fois séché, le matériau est tamisé et pesé. Nous obtenons le "refus" (la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis) cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon analysé. Cet essai a pour but d'aboutir à la séparation selon la grosseur des éléments constituant un échantillon en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

A.1.2 Matériel utilisé

Le matériel nécessaire à l'analyse comprend :

- un dispositif de lavage avec arroseur et, éventuellement, de malaxage
- un jeu de tamis à mailles d'ouvertures carrées conforme à la norme NF ISO 565. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. La série de tamis utilisée est la suivante en (mm) : 0,063 ; 0,08 ; 0,125 ; 0,2 ; 0,30 ; 0,50 ; 1 ; 2 ; 3,15 ; 5 ; 6,3 ; 8 ; 10 ; 12,5 ; 16 ; 20 ; 25 ; 31,5 ; 40 ; 45.
- une balance dont la portée maximale et minimale est compatible avec les masses à peser
- une étuve ou enceinte climatique à température réglée à 50 °C pour les sol organiques

A.2 Détermination de la densité apparente

A.2.1 Appareil

La mesure comporte un cylindre de mesure rigide de respectivement 4,33 l ; 8,67 l ; 17,34 l. Le volume du cylindre est V_1 exprimé en $[\text{cm}^3]$ (Figure A.1), d'une balance, pour effectuer les mesures de poids de l'échantillon et d'une règle rigide de section rectangulaire.



FIGURE A.1 – Dispositif de mesure de la densité apparente en application à la norme NF - EN 12580

L'échantillon de substrat est versé dans le cylindre jusqu'à son remplissage total. Ensuite, la surface du cylindre est nivelée à l'aide d'une règle pour enlever l'excès de substrat. À la fin de l'opération, le cylindre de mesure est pesé. Le résultat donne la masse volumique apparente (densité apparente), en utilisant l'équation suivante :

$$D_a = \frac{m_2 - m_1}{V_c} \quad (\text{A.1})$$

m_2 est la masse du cylindre vide [g], m_1 est la masse du cylindre et le substrat [g] et V_c est le volume du cylindre de mesure [cm³].

Mesures hydriques

B.1 Détermination de la courbe de rétention

B.1.1 Méthode des presses à membrane

B.1.2 Principe

L'appareil est constitué d'une plaque poreuse reliée à un tuyau souple qui permet l'évacuation de l'eau et d'effectuer des mesures de désorption. Dans cette situation, un échantillon est préalablement saturé (*par remontée capillaire*). L'ensemble du dispositif plaque et échantillon est placé dans une marmite de pression, dont le couvercle est muni d'un ajustage permettant l'arrivée d'air comprimé.

Lorsque la pression à l'intérieur de la marmite dépasse la pression atmosphérique, l'eau contenue dans le sol commence à être entraînée à travers les pores microscopiques de la plaque poreuse. Une fois les pores de la plaque saturés en eau, ces derniers deviennent imperméables à l'air, donc la marmite devient complètement hermétique. Étant donné la surpression dans la marmite, l'eau va s'écouler vers l'extérieur.

B.1.3 Protocole

Les conditions opératoires de l'expérience sont réalisées de la manière suivante :

- utilisation de substrat prélevé dans un big bag représentatif du sol de la toiture végétalisée,
- utilisation des presses extractives,
- le temps de mise à saturation des échantillons : 24 heures,
- le fluide utilisé pour la mise en pression : air comprimé,
- temps de mise sous pression des échantillons : 48 heures,
- poids des échantillons variables entre 400 à 600 grammes.

B.1.4 Matériel

Il existe deux types de chambres d'extraction, haute et basse pression.

- Chambre d'extraction haute pression : C'est un récipient en acier soudé, poli et traité contre la corrosion, de diamètre intérieur de 30 cm et de hauteur de 10 cm. L'épaisseur des parois est d'environ 1 cm. Il est conçu pour tolérer des pressions jusqu'à 25 bars. La fermeture est réalisée par huit boulons à oreilles, des joints toriques assurent l'étanchéité. Il peut contenir trois plaques de porcelaine haute pression superposées et muni de trois tuyaux de sortie correspondants. (*modèle*

Soil Moisture Equipment Corp. réf n°1500). La chambre peut être utilisée de 5 bars pour le pF 3,7 à 15 bars pour le pF 4,2.

- Chambre d'extraction basse pression : C'est un récipient avec la forme d'une cocotte minute (*modèle Soil Moisture Equipment Corp. réf n°1600*) conçu pour tolérer une pression de 5 bars et principalement utilisée de 0,1 bar à 1 bar (pF 2 à pF 3).



FIGURE B.1 – Les deux types de presses extractives. À gauche le modèle 1500 haute pression, à droite le modèle 1600 basse pression

B.1.5 Modes opératoires

Pour les 2 chambres d'extraction, le mode opératoire suivi est identique. La procédure expérimentale est la suivante :

- placer un géo-synthétique sous les cylindres de 251 cm³ pour retenir le substrat et éviter que ce dernier se lessive,
- verser le substrat dans les cylindres et niveler le surplus,
- poser les cylindres sur un bac à saturation (récipient contenant de l'eau et où les cylindres sont posés sur une grille perforée) et laisser un excès d'eau stagnante (quelques mm au dessus de la base des cylindres) pendant 24 h,
- mettre les plaques poreuses à saturation durant 24 heures,
- poser les plaques de porcelaine poreuse dans la chambre d'extraction et connecter à l'intérieur le tube d'évacuation d'eau à l'orifice d'évacuation de la chambre,
- fermer hermétiquement l'extracteur par serrage de l'ensemble des écrous du couvercle avec une clé dynamométrique,
- connecter un tube collecteur en caoutchouc au tube d'évacuation extérieure et l'amener dans un bêcher en verre pour collecter l'eau extraite,
- ouvrir la valve de régulation du manomètre à la pression voulue,
- laisser sous pression 48 h (normalement l'équilibre est atteint quand l'écoulement de l'eau du tube d'évacuation attaché à l'orifice extérieur a cessé,

- à la fin de l'opération, fermer les extrémités du tube d'évacuation à l'extérieur pour empêcher l'eau de remonter dans les échantillons après le relâchement de la pression,
- fermer la bouteille d'air comprimé,
- ouvrir les vannes d'extraction de l'air comprimé pour évacuer l'air qui se trouve dans les presses et attendre que la pression soit redescendue à la pression atmosphérique,
- desserrer les écrous et enlever le couvercle de la chambre,
- transférer rapidement les échantillons dans un bêcher en verre préalablement pesé (poids P1),
- peser le substrat humide avec le bêcher (poids P2),
- sécher le substrat dans son bêcher à 105 °C,
- à la sortie de l'étuve, laisser refroidir dans un dessiccateur, peser le bêcher contenant la terre séchée (poids P3) et calculer la teneur en eau en % de substrat séchée à 105°C (équation B.1).

$$\theta\% = \frac{P2 - P3}{P3 - P1} \cdot 100 \quad (\text{B.1})$$

Les figures (B.2) et (B.3) montrent la disposition des cylindres avant et pendant l'essai avec les presses extractives.



FIGURE B.2 – Les cylindres contenant le substrat à l'intérieur des presses extractives



FIGURE B.3 – Les cylindres contenant le substrat des toitures végétalisées posées sur une plaque poreuse en porcelaine

B.2 Méthode d'évaporation (méthode de Wind)

Les mesures ont été réalisées sur des cylindres contenant du substrat préalablement homogénéisé de 251 cm^3 (6,1 cm de hauteur et 7,2 cm de diamètre) à partir des sacs de substrat livrés lors de la conception de la toiture végétalisée du Cerema¹ en 2011 avec trois échantillons (après quartage). Les trois échantillons sont portés à saturation par capillarité pendant 24 h, deux tensiomètres ont été installés dans chaque cylindre à 1,5 et 4,5 cm de hauteur. La masse des cylindres au cours de l'évaporation à température ambiante et le potentiel de pression matricielle mesurés par les deux tensiomètres ont été enregistrés avec un pas de temps de 10 min min pendant 12 jours. Les cylindres ont été séchés à 105°C jusqu'à masse constante afin de déterminer les teneurs en eau. La courbe de rétention en eau $h(\theta)$ a été calculée à partir de la moyenne des deux mesures de potentiel de pression matricielle (h) et de la teneur en eau moyenne (θ) dérivée des mesures de masse à chaque pas de temps. La gamme de potentiel matriciel explorée lors des mesures est comprise entre pF 0,5 et 3, soit -2,5 et -1250 cm de colonne de hauteur d'eau.

B.3 Méthode de la charge constante

B.3.1 Appareil

L'appareillage utilisé pour la mesure de K_s est composé d'une colonne de sol, reliée à une colonne d'eau, connectée en circuit fermé à une pompe péristaltique et à un réservoir d'eau comme l'indique la figure (Figure B.4).

¹Centre d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

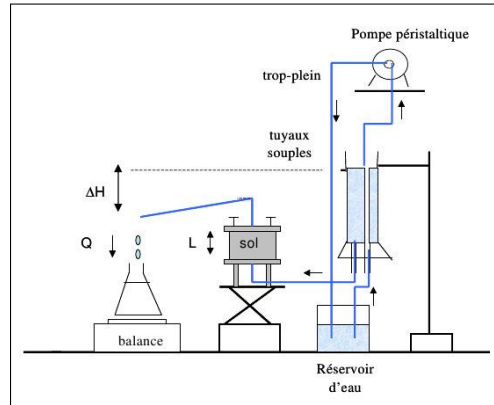


FIGURE B.4 – Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la détermination de la conductivité hydraulique à saturation K_s (Gujisaite, 2008).

B.3.2 Mode opératoire

Le cylindre contenant le sol (substrat) a une hauteur de 5 cm et un diamètre intérieur de 8 cm (volume : 251 cm³). À la base, se trouve un tamis en tissu de 300 μm. Le cylindre et le tamis sont insérés dans un cylindre en PVC (le tout est isolé par un couvercle pour éviter l'évaporation). Cet ensemble est placé sur une grille, puis sur un des joints du dispositif. Le tout est placé dans une cuvette émaillée. Le flux qui traverse le cylindre est recueilli et mesuré en fonction du temps, à l'aide d'une balance (précision 0,1 g). Le gradient hydraulique étant constant, la mesure du débit Q (cm³. min⁻¹) en sortie de la colonne de sol permet de déterminer la conductivité hydraulique à saturation K_s (cm.min⁻¹) selon :

$$Q = AK_s \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{B.2})$$



FIGURE B.5 – Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique avec un perméamètre à charge constante

Où ΔH [cm] est la différence de niveau entre le niveau constant de la cuve d'alimentation et le niveau de l'orifice de sortie, L [cm] est la hauteur de l'échantillon de sol dans le cylindre et A [cm²] la section de l'échantillon cylindrique. La reproductibilité de la mesure est vérifiée en effectuant six essais, avec quatre différences de niveau ΔH distinctes pour un même échantillon : 0,5 ; 1 ; 1,5 et 2 cm. L'écoulement doit de plus être laminaire pour assurer la validité de la loi de Darcy.

B.4 Expérience de saturation/drainage : méthode opératoire

B.4.1 Détail de la méthode

L'expérience de saturation/drainage est une méthode de flux instantané où la teneur en eau du sol et la quantité d'eau évacuée sont mesurés. Le résultat est comparé avec la simulation sous HYDRUS-1D. Voici les étapes qui ont permis la réalisation de cette expérience :

- **Calibration des sondes** : les sondes de teneur en eau ont été préalablement calibrées suivant le protocole fourni par le fabricant Decagon devices (voir Annexe C.2),
- **Teneur en eau initiale** : le substrat est à teneur en eau de livraison $\approx 17\%$,
- **Installation sonde haute** : la sonde de teneur en eau est placée à 5 cm par rapport à la surface du substrat,
- **Mise en place du substrat restant** : sur la sonde de teneur en eau, 5 cm de substrat a été ajouté,
- **Mise en route de l'expérience** : l'expérience de saturation/drainage a duré 3 heures avec une température extérieure constante de 25 °C. Durant l'expérience, la quantité d'eau évacuée et la teneur en eau ont été mesurées à un pas de temps de 60 secondes.

Système d'acquisition

C.1 Système d'acquisition thermique

C.1.1 Description du système d'acquisition thermique

Les nœuds : Le WSN-3226 possède quatre canaux d'entrées analogiques que l'on peut configurer pour des mesures de ± 10 V. Il dispose également de deux canaux numériques bidirectionnels avec des gammes de tension industrielles que vous pouvez configurer par canal, comme entrée ou comme source de sortie. Les canaux numériques peuvent également être programmés pour répondre à des événements numériques de changement d'état. Le bornier à vis de 18 connecteurs fournit une connectivité directe aux capteurs et aussi une tension de 12 V, pour un courant de 50 mA d'alimentation du capteur que l'on peut utiliser pour plusieurs capteurs nécessitant une alimentation externe. En outre, l'appareil prend en charge une batterie de secours. Quand l'alimentation externe est défectueuse, l'appareil bascule automatiquement sur la batterie. Une fréquence de 2,4 GHz est utilisée pour transmettre sans fil des données vers la passerelle WSN. Le WSN-3226 se configure en tant que routeur en étoile pour augmenter la distance du réseau et se connecter à plus de nœuds. Nous pouvons aussi connecter huit nœuds aux extrémités (topologie en étoile) ou jusqu'à 36 nœuds de mesure (topologie maillée) à une passerelle WSN unique, avec une portée en extérieur allant jusqu'à 300 m en ligne droite. Le nœud est alimenté par une alimentation de 12 V.

Le concentrateur : (ou passerelle) WSN-9791 permet de coordonner les communications entre les nœuds des mesures distribuées (WSN-3226) et le système hôte (PC / Windows XP) fonctionnant par connexion Ethernet sans fil¹. La passerelle dispose d'une fréquence porteuse de 2,4 GHz à la norme radio IEEE 802.15.4 basée sur la technologie *ZigBee*² pour recueillir les données de mesures à partir du réseau de capteur et un port Ethernet 10/100 Mbit/s. Le logiciel NI-WSN inclus avec le WSN-9791 permet de configurer rapidement le réseau de capteurs et d'extraire, analyser et présenter les données de mesure en utilisant l'environnement de développement graphique LabVIEW, édité par National Instrument. L'antenne est compatible avec une portée extérieure de 300 m en direct, et peut accueillir jusqu'à 8 nœuds dans une topologie en étoile ou jusqu'à 36 nœuds dans une topologie maillée. Dans notre cas de figure, la configuration choisie est *étoile*.

Sondes de température : Les sondes de température sont fabriquées par thermo-Est. Elles sont constituées d'éléments sensibles PT100 de classe A et d'un montage 3 fils. Les dimensions de l'élément sensible sont les suivantes : l=5 mm, L=8 mm, h=45 mm. L'élément sensible de la sonde de température est un thermomètre à résistance de platine (PT100). C'est un dispositif permettant de mesurer la température (la résistance électrique de platine varie selon la température). La PT100

¹Protocole WSN

²[http ://www.zigbee.com](http://www.zigbee.com)

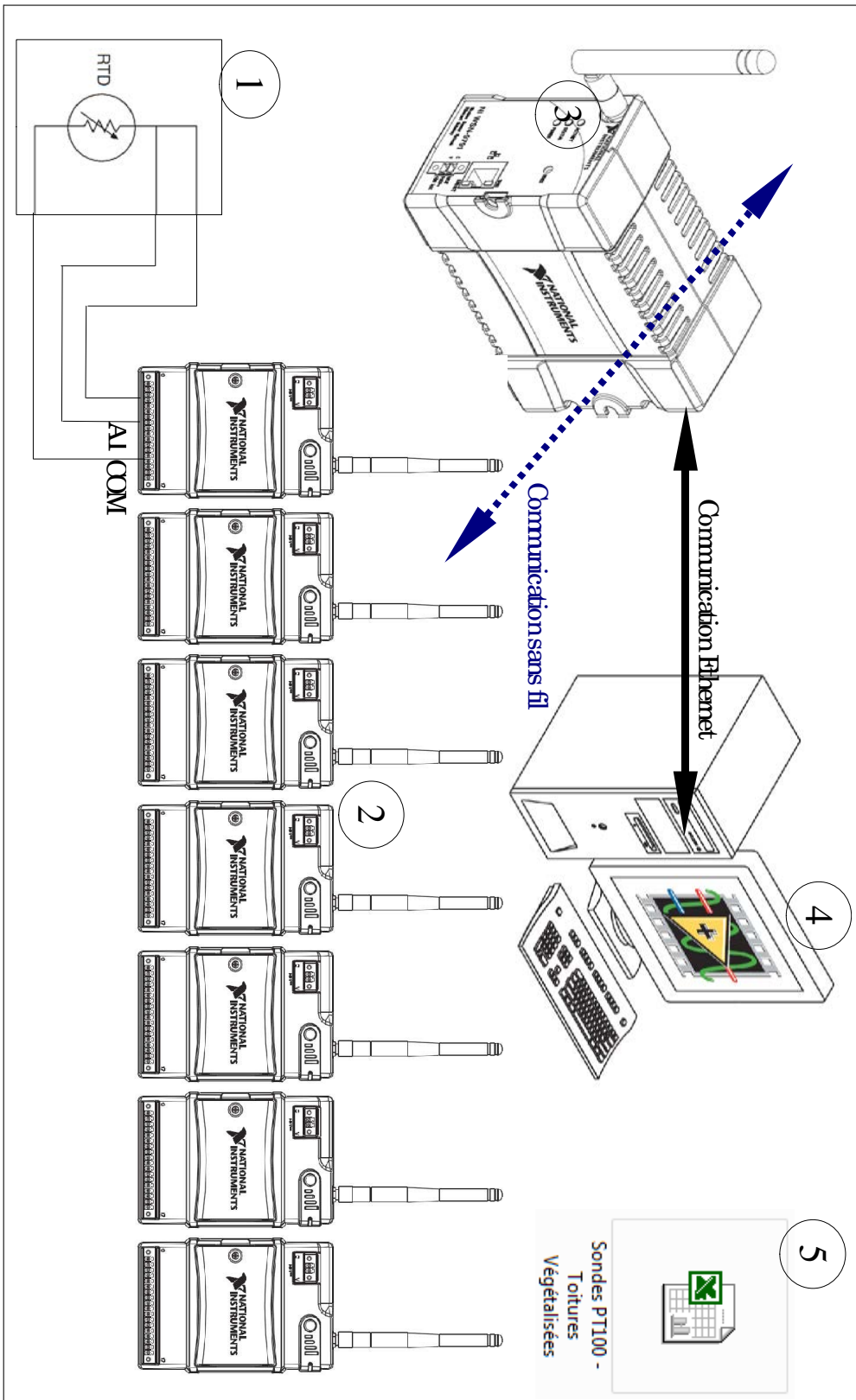


FIGURE C.1 – Schéma de fonctionnement de l'instrumentation. Les différents composants représentés sont : 1) Sonde de Température : RTD (Resistance Temperature Detector) qui se connecte en 3 fils sur la node WSN 3226. 2) NI WSN 3226 nodes : Sur chaque node on peut connecter 4 sondes de températures en 3 fils. Les nodes communiquent en sans fil avec NI WSN 9791. 3) NI WSN 9791 (passerelle) permet de coordonner les communications entre les nœuds de mesures distribuées (NI WSN 3226) en sans fil et un système hôte (ex : ordinateur) en Ethernet. 4) Système hôte : Il héberge le programme d'acquisition de données des sondes de température. 5) Fichier Tableur : Les données de température sont stockées sur un tableur.

est une RTD (Resistance Temperature Detector) Le montage 3 fils (référence 1 de la Figure C.1) permet de réduire au maximum les erreurs liées à la résistance du fil. Le principe est le suivant : si les fils A et B sont de la même longueur alors l'effet de résistance lié aux fils s'annuleront parce que chacun est dans une partie opposée du montage. Le troisième fil, C, agit comme mesure ($i=0$ A).

C.1.2 vérification des sondes de température

L'ensemble des sondes de température (24) ont été calibrées suivant le protocole Pro Q-E MET E2 1-4-3 Rév.3. Les sondes ont d'abord été reliés au système d'acquisition (Fig. C.2). Une sonde de température de platine PT100 type TLH 100 de référence a été ajoutée afin de vérifier la précision des sondes PT100. L'ensemble des sondes est immergé dans un bain thermostaté d'une précision de $\pm 0,01$ °C. La Table C.1 reprend les mesures effectuées sur chaque sonde avec la précision et l'équation introduite dans le programme d'acquisition.

Réf. sonde	Précision (°C)	Éqt. d'exploitation (°C)
T.02	$\pm 0,19$	$-0,225 + T_{lue} \times 1,002$
T.04	$\pm 0,22$	$-0,259 + T_{lue} \times 1,003$
T.09	$\pm 0,33$	$-0,283 + T_{lue} \times 0,998$
T.14	$\pm 0,16$	$-0,162 + T_{lue} \times 1,000$
T.15	$\pm 0,24$	$-0,279 + T_{lue} \times 1,003$
T.17	$\pm 0,41$	$-0,340 + T_{lue} \times 0,998$
T.18	$\pm 0,30$	$-0,271 + T_{lue} \times 0,999$
T.19	$\pm 0,34$	$-0,228 + T_{lue} \times 0,995$
T.20	$\pm 0,32$	$-0,257 + T_{lue} \times 0,998$
T.21	$\pm 0,31$	$-0,272 + T_{lue} \times 0,999$
T.22	$\pm 0,64$	$-0,617 + T_{lue} \times 0,999$
T.23	$\pm 0,36$	$-0,335 + T_{lue} \times 0,999$
T.24	$\pm 0,33$	$-0,644 + T_{lue} \times 0,998$
T.25	$\pm 0,66$	$-0,627 + T_{lue} \times 0,999$
T.26	$\pm 0,33$	$-0,119 + T_{lue} \times 0,999$
T.27	$\pm 0,44$	$-0,420 + T_{lue} \times 1,000$
T.28	$\pm 0,68$	$-0,552 + T_{lue} \times 0,995$
T.29	$\pm 0,70$	$-0,606 + T_{lue} \times 0,996$
T.30	$\pm 0,66$	$-0,656 + T_{lue} \times 1,001$
T.31	$\pm 0,41$	$-0,403 + T_{lue} \times 1,000$
T.32	$\pm 0,40$	$-0,314 + T_{lue} \times 0,997$
T.33	$\pm 0,66$	$-0,609 + T_{lue} \times 0,998$
T.35	$\pm 0,43$	$-0,380 + T_{lue} \times 0,998$
T.37	$\pm 0,14$	$-0,089 + T_{lue} \times 0,998$

TABLE C.1 – Récapitulatif des mesures pour la calibration des sondes de température PT100

C.1.3 Installation des sondes de température

C.2 Système d'acquisition hydrique

Afin d'observer le comportement hydrique du substrat, des sondes TDR (Time Domain Reflectometry), qui est basée sur les mêmes principes que les RADAR, c'est-à-dire qu'elle est basée sur le temps de propagation d'une onde électromagnétique entre les tiges d'une sonde. Les sondes 5TM du manufacturier américain Decagon (Pullman, Washington) ont été installées. Cependant, il est à noter que ce type de



FIGURE C.2 – Photographie de l'ensemble ; sondes de température et système d'acquisition pour la toiture du LRN : 1 : Alimentation pour NI WSN 3791, 2 : NI WSN 3791 Ethernet Gateway, 3 : NI WSN 3291, Protection extérieure de NI WSN 3226, 4 : NI WSN 3226 Nodes, 5 : Thermo-Est Sondes PT100



FIGURE C.3 – Photographie de la mise en place des sondes de température pour la toiture du LRN : à gauche entre le géotextile et le drainage de la parcelle (AE), au milieu : mise en place de la sonde dans la couche de substrat, à 7 cm de profondeur par rapport à la surface de la parcelle (S60). À droite : mise en place de la sonde à la surface du substrat, au niveau de la canopée

capteur a été conçu pour des sols agricoles ou sols naturels. Pour leur utilisation, Decagon propose une courbe de calibration moyenne établie à partir des sols agricoles homogènes et très peu dense. Or dans le cas des toitures végétalisées, les substrats sont souvent beaucoup plus complexes et hétérogènes. Une calibration a donc été nécessaire.

C.2.1 Calibration des sondes hydriques

La méthode de calibration des sondes de teneur en eau est basée sur les travaux de Starr et Paltineanu (2002). Voici les principales étapes qui ont mené à la détermination de la courbe de calibration. Du substrat de la toiture végétalisée a été prélevé à l'état initiale (lors de l'installation).

- une quantité de substrat de 4l est nécessaire
- le substrat est mélangé et homogénéisé suivant la méthode de quartage et d'homogénéisation
- le substrat est introduit dans un récipient d'un volume connu (1l)
- la sonde 5TM est introduite de manière horizontale sur l'ensemble de la surface du capteur. La sonde doit être complétement entouré de substrat (volume de contrôle de 0,3l), c'est-à-dire 1,5 cm de chaque coté.
- lire la valeur affiché à l'écran (RAW, valeur brute du signal de sortie de la sonde TDR)
- suivant la quantité d'eau présente ou de la teneur en eau, une quantité a été ajouté (Decagon préconise d'ajouter 1 ml d'eau chaque 10 ml de substrat)
- dans le même temps, le substrat a été pesé
- une fois le substrat arrivé à saturation (présence de ressuyage), l'essai est arrêté. Le substrat est par la suite séché à 105 °C pendant 24 h

N° Échan- tillon	lecture signal capteur (RAW)	masse tare (g)	volume de l'échantillon (cm ³)	masse échantillon humide (g)	masse échan- tillon sec (g)	Densité apparente (g/cm ³)	VWC (cm ³ /cm ³)
1	278	119,4	1000	1096,1	957,3	0,838	0,138
2	151	112	1000	1036,8	916,2	0,804	0,1206
3	168	110,2	900	946,7	865,3	0,839	0,09
4	252	117,9	1000	1104,2	910,5	0,7926	0,1937
5	76	119,1	1000	927,6	926,4	0,807	0,0012
6	84	112	900	804,3	787,4	0,750	0,019
7	83	111	1000	931,1	930,7	0,819	0
8	102	110,1	900	804,3	780,6	0,745	0,026
9	92	117,8	900	802,2	785	0,741	0,02
10	211	119,4	1000	974,8	882	0,762	0,093
11	212	112	1000	996	899,6	0,787	0,096
12	156	111,1	1000	1027,1	905,8	0,795	0,121
13	232	110,2	1000	989,2	881,4	0,763	0,108
14	185	119,1	1000	929,7	822,1	0,703	0,108
15	159	112,1	1000	1002,4	880,4	0,768	0,122
16	193	110,9	1000	997,4	872,1	0,761	0,125
17	193	110,2	1000	1012,5	879,1	0,768	0,133
18	217	118	1000	952,2	816	0,698	0,136
19	242	119,2	1000	1075,2	923,8	0,804	0,151
20	226	111,9	950	1046,2	872,6	0,801	0,182
21	300	111	950	1042	872,6	0,802	0,178
22	221	110,2	950	1025,7	846,1	0,775	0,189
23	273	117,6	1000	1051,9	882,6	0,765	0,169
24	244	109,6	900	1033,9	883,8	0,860	0,166
25	193	110,3	1000	1052,6	906	0,795	0,146
26	231	110,9	1000	1087,8	927,8	0,817	0,16
27	216	111,5	900	1018,4	851,6	0,822	0,185
28	334	117,9	1000	1106,3	922	0,804	0,184

TABLE C.2 – Récapitulatif des mesures pour la calibration des sondes TDR

La Table C.2 reprend l'ensemble des mesures et pesés réalisées. L'équation empirique de calibration est décrite par Topp *et al.* (1980) et Ledieu *et al.* (1986) en utilisant une fonction polynomiale :

$$\theta = -0,23 + 4,16 \cdot 10^{-3}RAW - 1,97 \cdot 10^{-5}RAW^2 + 4,80 \cdot 10^{-8}RAW^3 - 4,12 \cdot 10^{-11}RAW^4 \quad (C.1)$$

La définition de la teneur en eau volumique est reprise dans la § 2.2.1. Une courbe caractéristique de la sonde TDR en fonction de la variable **RAW** est tracée (Fig. C.4)

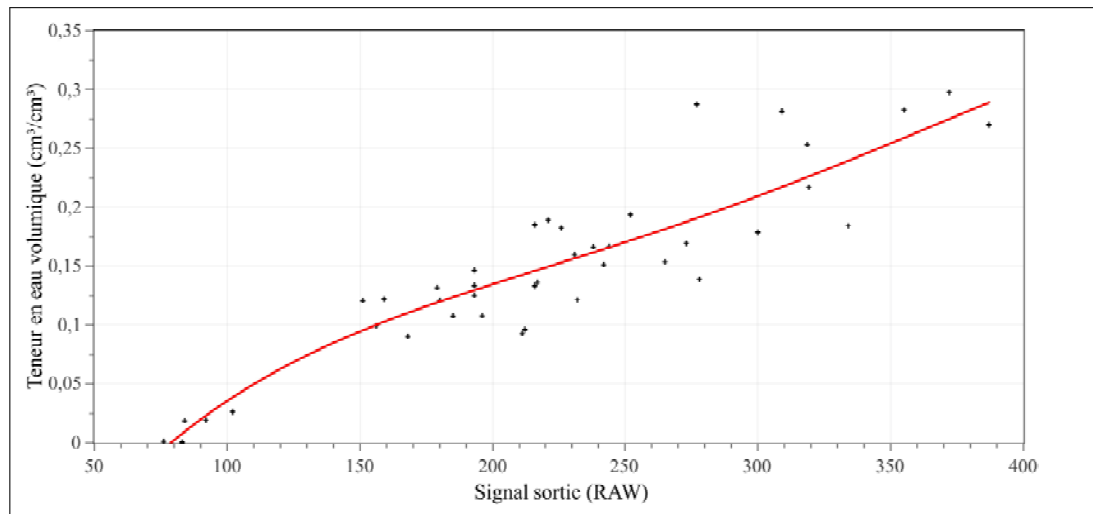


FIGURE C.4 – Représentation de la courbe caractéristique de calibration de l'une des sondes TDR présente dans le substrat de la toiture végétalisée

Méthode de calcul de l'évapotranspiration

D.1 Méthode de Penman

Dans son article fondateur (Penman, 1948), Penman combine les méthodes aérodynamiques au bilan d'énergie. Il n'utilise pas les résistances de surface et aérodynamiques, mais introduit un coefficient empirique pour le terme aérodynamique. La rigueur physique de cette équation fait d'elle une des références, même si elle ne traduit pas l'évapotranspiration réelle. Elle s'applique aux surfaces d'eau libres ou surfaces saturées en eau. Pour écrire son équation, Penman part du bilan énergétique dans lequel il néglige le taux d'énergie emmagasinée :

$$\lambda \rho_w E_0 + Q_H = R_n \quad (\text{D.1})$$

On peut aussi écrire les équations aérodynamiques, comme le rappelle Brutsaert (1982) :

$$\begin{cases} \lambda \rho_w E_0 = f(U)(e_s - e_d) \\ Q_H = \gamma f(U)(T_s - T_a) \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

Dans ces équations $f(U)$ est une fonction qui dépend de la vitesse du vent et γ la constante psychrométrique, définie telle que :

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0,665 * 10^{-3} P \quad (\text{D.3})$$

Pour éviter de mesurer e_s et T_s , on se propose de passer par le calcul de la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante.

$$\Delta = \frac{de}{dT} = \frac{e_s - e_d}{T_a - T_d} \quad (\text{D.4})$$

En introduisant T_d dans le terme aérodynamique, on a :

$$Q_H = \gamma f(U)((T_s - T_d) - (T_a - T_d)) = \gamma f(U) \left[\frac{e_s - e_d}{\Delta} - \frac{e_a - e_d}{\Delta} \right] \quad (\text{D.5})$$

En introduisant l'équation aérodynamique du flux de chaleur latente, on a :

$$Q_H = \frac{\gamma \lambda \rho_w E_0}{\Delta} - \frac{\gamma (e_a - e_d)}{\Delta} f(U) \quad (\text{D.6})$$

En introduisant Q_H dans le bilan d'énergie et en notant $E_a = f(U)(e_a - e_d)$, on trouve l'équation de

Penman :

$$\lambda \rho_w ET_0 = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (D.7)$$

Bien qu'elle découle d'un raisonnement physique, le fait que le terme aérodynamique ne soit pas calculé pour chaque cas introduit des erreurs. Le coefficient utilisé ne traduit pas toujours la situation réelle. C'est pour répondre à cette problématique que de nombreux auteurs ont repris cette formule en essayant d'exprimer de différentes façons le terme aérodynamique. La formule de Penman constitue cependant la base de toutes les méthodes combinatoires.

D.2 Méthode de Penman-Monteith

Partant des travaux de Penman, Monteith (1965) intègre à la formule des paramètres liés aux caractéristiques des plantes. Ainsi, une résistance du couvert végétale et une résistance aérodynamique est introduite dans l'équation. Il développe là un des premiers modèles Sol-Végétation-Atmosphère (SWAT). La formule s'écrit alors :

$$ETP_c = E_0 = \frac{\Delta R_n + \frac{\rho_a C_p}{r_a} (e_a - e_d)}{\lambda \rho_w [\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)]} \quad (D.8)$$

Une étude et une application intéressante de cette formule est faite par Pare (2006).

Contrairement à la formule de Penman, cette nouvelle approche évalue plus précisément l'évapotranspiration. Monteith a introduit deux résistances r_s et r_a , permettant de prendre en compte la résistance de l'air et des plantes à l'évaporation et surtout à la transpiration. Contrairement à l'équation de Penman, la fonction du vent est aussi exprimée. Cette formule donne l'évapotranspiration réelle (ETR) lorsque les résistances sont prises en compte.

Bien que plus complète que la formule de Penman, cette expression fait l'hypothèse que le coefficient de transfert pour la chaleur et pour la vapeur d'eau sont identiques. Enfin, la valeur des résistances reste empirique. Shuttleworth (1993) en donnera des corrélations et des valeurs pour certains climats.

D.3 Méthode de Penman-Monteith-FAO56

Dans le journal *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24*, la FAO préconise quatre méthodes pour évaluer le flux d'évapotranspiration (ou plutôt les besoins en eau des cultures ; étant directement liés à l'évaluation du flux d'évapotranspiration). Dans le No. 56 du même journal, paraît un article *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* qui a pour but d'exposer les retours et de proposer une formule mondialement acceptée.

En définissant une culture de référence comme du gazon, ayant une hauteur de 0,12 m supposé avoir une résistance de surface de 70 s-1 m et un albédo de 0,23. La formule brute proposée par la FAO nous donne donc l'évapotranspiration potentielle d'un couvert de référence ET_o . Ils proposent la formule journalière améliorée de Penman-Monteith s'écrivant :

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - R_g) + \gamma \frac{900}{T+273} U (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34U)} \quad (D.9)$$

Dans certaines conditions climatiques, les résultats journaliers peuvent moyenner les variations

d'évapotranspiration. C'est pourquoi une formule existe pour être plus précis sur ces phénomènes de courte durée. Aujourd'hui, il est d'autant plus simple d'utiliser des formules au pas de temps horaire, car les stations météorologiques sont plus adaptées.

La formule horaire de Penman-Monteith proposée par la FAO est :

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - R_g) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} U (e^\circ(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U)} \quad (D.10)$$

La FAO nous propose donc de calculer l'évapotranspiration d'un couvert de référence. Pour obtenir l'évapotranspiration potentielle, elle applique un coefficient cultural K_c (crop coefficient), tel que :

$$ETP = K_c * ET_0 \quad (D.11)$$

Le coefficient cultural K_c varie selon le couvert végétal, l'état de développement de la plante et selon des variables climatiques. On peut le trouver dans des abaques ou le déterminer en résolvant un bilan hydrique.

Avec cette formule, la FAO essaye d'imposer une méthode internationale standard pour calculer le besoin en eau des cultures.

Le coefficient Cultural L'évapotranspiration des cultures diffère de l'évapotranspiration de référence ET_0 , car les propriétés et les capacités de transpiration des plantes diffèrent selon les espèces. Il existe un coefficient cultural K_c , propre à chaque culture et intégrant l'ensemble des caractéristiques liées à l'espèce. K_c est défini tel que :

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (D.12)$$

Le coefficient cultural dépend de nombreuses caractéristiques de la plante, mais aussi du climat et de la saison. Ainsi, pour une même plante, le coefficient cultural peut varier considérablement selon la vitesse du vent, l'ensoleillement (...). Par exemple, la valeur du coefficient cultural pour le sucre de canne peut varier de 1,08 en période humide et peu venteuse, à 1,55 en période sèche et venteuse.

Le coefficient est directement lié à l'âge de la plante, l'état de croissance saisonnier, sa taille et son indice de recouvrement foliaire.

Pour déterminer la valeur du coefficient cultural, il existe deux approches : l'approche du coefficient unique et celle du double coefficient. L'approche du coefficient simple combine l'effet de la transpiration de la culture et de l'évaporation des sols en un seul coefficient. Dans l'approche à deux coefficients, la transpiration des plantes et l'évaporation des sols sont déterminées dans deux coefficients différents.

L'approche du simple coefficient permet des calculs rapides, sur des moyennes journalières minimums. Celle du double coefficient permet de mieux représenter l'état hydrique du sol et la disponibilité en eau.

La détermination de ce coefficient semble assez difficile à mettre en œuvre. Et même si nous le trouvons dans la littérature, il faut l'ajuster, de manière à ce qu'il s'adapte aux conditions climatiques et aux caractéristiques évolutives de la plante.

D.4 Méthode d'évaluation du flux d'évapotranspiration de Météo-France

Météo-France calcul chaque jour l'évapotranspiration potentielle d'un couvert végétal bas, continu et homogène, bien alimenté en eau et qui n'est soumis à aucune pathologie. Météo-France considère aussi que la prairie est en pleine croissance, fauchée régulièrement, bien enracinée et bien arrosée mais sans excès.

D.4.1 Méthodes utilisées

L'évapotranspiration calculée par Météo-France se base sur l'équation de Penman-Monteith, appliqué dans des conditions idéales. Le pas de temps utilisé pour cette méthode est le jour. Météo-France utilise des mailles de 12 km pour diviser la France. Pour chaque grille, l'ETP est calculée en utilisant les 5 stations les plus proches et en interpolant par une méthode "inverse de la distance au carré".

Pour effectuer leur calcul, Météo-France utilise des mesures entre 8 heures UTC et 18 heures UTC.

D.4.2 Méthode de Penman-Monteith

Météo-France base sa méthode sur celle de Penman-Monteith d'une manière similaire à la FAO. L'évapotranspiration quotidienne de Penman-Monteith est donnée par :

$$\Lambda ETP = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (D.13)$$

On sait que Météo-France utilise les coefficients suivants :

$$\begin{cases} r_a = 1/(0,007 + 0,0056u) \\ r_s = 60 \end{cases} \quad (D.14)$$

On peut donc écrire :

$$\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right) = 1,42 + 0,336u \quad (D.15)$$

On exprime aussi :

$$Cp = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{P} \quad (D.16)$$

$$\rho_a = \frac{P}{T_{kv} R} \quad (D.17)$$

avec : $T_{kv} = 1,01(T + 273)$

Ainsi, on a :

$$\frac{Cp \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \varepsilon \lambda (0,007 + 0,0056u)}{R 1,01(T + 273)} \quad (D.18)$$

En remplaçant les constantes par leur valeur et en multipliant l'équation par le nombre de secondes qu'il y a en une journée :

$$\frac{Cp \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma(0,622)\lambda(0,007 + 0,0056u)}{(0,287)1,01(T + 273)} \quad (D.19)$$

Et finalement :

$$\frac{Cp\rho_a}{r_a} = \frac{\gamma(1297,8 + 1038,2u)}{T + 273} \quad (\text{D.20})$$

Météo-France applique enfin un terme correctif γ_r pour la constante psychrométrique γ , qui permet de prendre en compte dans les calculs l'approximation entre la température de l'air et la température du sol. On peut enfin écrire :

$$ET = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \frac{(\gamma + \gamma_r)(1297,8 + 1038,2u)(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + (\gamma + \gamma_r)(1,42 + 0,336)} \quad (\text{D.21})$$

D.4.3 Limites de la méthode

La première limite qui apparaît est temporelle. Météo-France calcule l'évapotranspiration chaque jour en prenant uniquement les valeurs de température, rayonnement, vitesse du vent et tension de vapeur moyenne entre 8 h et 18 h UTC. On comprends assez rapidement le manque de représentativité sur des phénomènes ponctuels.

La seconde limites est spatiale. Les données météorologiques ne se prêtent pas facilement à une extrapolation, ce qui limite le réalisme des résultats Dupont (2001).

En milieu urbain, nous ne pouvons pas utilisés les données de météo-France. En effet, la répartition des sols est trop complexe pour que le modèle utilisé soit acceptable. Météo-France détermine l'ETP pour un gazon bas, bien alimenté en eau. Les surfaces urbaines sont très diversifiées (donc pas représentées par Météo-France) et il ne prennent pas en compte l'évaporation de l'eau au sol. Aussi, d'un point de vue énergétique, la formule de Penman-Monteith telle qu'utilisée par Météo-France n'est pas acceptable. En effet, les flux anthropique et le flux de chaleur stockée sont négligés. En ville, ces deux flux de chaleurs ne sont pas négligeables.

TABLE D.1 – Nomenclature des principaux symboles utilisés

Symbole	Variable	Unité
c_p	Chaleur spécifique de l'air	$[kJ/kg/^\circ C]$
Δ	Pente de la courbe de pression de vapeur saturante	$[kPa/^\circ C]$
ε	Rapport poids moléculaire vapeur/air sec	/
e_a	Pression de vapeur saturante à T_a	$[hPa]$
e_d	Pression de vapeur effective	$[hPa]$
e_s	Pression de vapeur saturante à T_s	$[hPa]$
EP	Evaporation potentielle	$[mm/durée]$
ET	Evapotranspiration	$[mm/durée]$
ETP	Evapotranspiration potentielle	$[mm/durée]$
ETP_C	Evapotranspiration potentielle climatique	$[mm/durée]$
ETP_T	Evapotranspiration potentielle théorique	$[mm/durée]$
ET_0	Evapotranspiration de référence	$[mm/durée]$
ET_c	Evapotranspiration d'une culture	$[mm/durée]$
ETR	Evapotranspiration réelle	$[mm/durée]$
ETR_M	Evapotranspiration réelle maximale	$[mm/durée]$
γ	Constante psychrométrique	$[kPa/^\circ C]$
G	Densité de flux de chaleur du sol	$[MJ/m^2/jrs]$
λ	Chaleur latente d'évaporation	$[MJ/kg]$
P	Précipitation	$[mm/durée]$
P_a	Pression atmosphérique	$[kPa]$
Q_H	Flux de chaleur sensible	$[W/m^2]$
ρ_w	Masse spécifique de l'eau	$[kg/m^3]$
R	Ruissellement	$[mm/durée]$
r_a	Résistance aérodynamique	$[s/m]$
r_s	Résistance surfacique	$[s/m]$
Rg	Rayonnement Global	$[MJ/m^2/durée]$
Rn	Rayonnement Net	$[MJ/m^2/durée]$
T	Température	$[^\circ C]$
T_{air}	Température de l'air	$[^\circ C]$
T_a	Température moyenne	$[^\circ C]$
T_s	Température de surface	$[^\circ C]$
U	Vitesse du vent	$[m/s]$

Discrétisation des équations différentielles partielles

E.1 Discrétisation des équations

Dans cette section, nous présentons la discrétisation de l'équation de Richards par la méthode des différences finies. Les discrétisations spatiales et temporelles sont discutées dans un premier temps. La mise en forme matricielle du système d'équations linéaires fait l'objet du paragraphe suivant.

E.1.1 Traitement des conditions aux limites

Comme cela a été mentionné dans le début de ce chapitre, la résolution numérique de l'équation de Richards requiert la définition de conditions aux limites. Dans notre cas (géométrie 1D), nous devons définir les valeurs associées à ces conditions aux limites sur les faces supérieure et inférieure de la toiture végétalisée.

Conditions de type Dirichlet : Pour notre champ scalaire (pression matricielle h ou teneur en eau θ , liées par la courbe de rétention), nous devons discrétiser une condition de type Dirichlet où la valeur du scalaire est définie à la limite inférieure :

$$\theta = \theta_d \Leftrightarrow h = h_d \quad (\text{E.1})$$

où θ_d est la teneur en eau constante imposée par la condition à la limite de Dirichlet, il en va de même pour la pression matricielle h_d .

Conditions de type Neumann : Quand il s'agit du gradient de la grandeur scalaire qui conditionne la condition à la limite, on parle de condition de type Neumann :

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = \theta'_n \quad (\text{E.2})$$

E.2 Discrétisations spatiale et temporelle de l'équation de Richards

Les différentes couches de la toiture végétalisée sont discrétisées en $N-1$ éléments avoisinants. Les extrémités des éléments sont situées au niveau des points nodaux. La discrétisation spatiale de chaque élément est aussi réalisée avec le même formalisme (Šimůnek *et al.*, 2008). Un schéma aux différences centrées est utilisé pour la discrétisation spatiale de l'équation de Richards (équation 5.1) (Vogel *et al.*,

1996), la discrétisation temporelle est réalisée avec un schéma implicite. Le processus de résolution est itératif à chaque pas de temps.

$$\frac{\theta_i^{j+1,k+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left(K_{i+1/2}^{j+1,k} \frac{h_{i+1}^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k+1}}{\Delta x_i} - K_{i-1/2}^{j+1,k} \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_{i-1}^{j+1,k+1}}{\Delta x_{i-1}} \right) + \frac{K_{i+1/2}^{j+1,k} - K_{i-1/2}^{j+1,k}}{\Delta x} - S_i^j \quad (\text{E.3})$$

où

$$\begin{aligned} \Delta t &= t^{j+1} - t^j \\ \Delta x &= \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2}, \Delta x_i = x_{i+1} - x_i, \Delta x_{i-1} = x_i - x_{i-1} \\ K_{i+1/2}^{j+1,k} &= \frac{K_{i+1}^{j+1,k} - K_i^{j+1,k}}{2} \quad K_{i-1/2}^{j+1,k} = \frac{K_i^{j+1,k} - K_{i-1}^{j+1,k}}{2} \end{aligned} \quad (\text{E.4})$$

Les indices $i-1$, i et $i+1$ indiquent la position des nœuds dans le maillage (Fig. 5.1). Les indices k et $k+1$ décrivent la précédente et l'itération actuelle, enfin, les indices j et $j+1$ déterminent les pas de temps précédent et actuel. L'équation E.3 est résolue temporellement avec le schéma Picard-Lindelof (Eq. E.5) (Coddington et Levinson, 1955). Pour stabiliser le calcul, le terme source S est déterminé au pas de temps précédent (Šimůnek *et al.*, 2008).

$$\theta_{t=0} = \theta_0, \quad \theta_{j+1} = \theta_0 + \int_{t=0}^t f(\delta, \theta_{j+1}(\delta)) d\delta \quad (\text{E.5})$$

Pour finaliser la discrétisation de l'équation E.3, il faut trouver une relation de fermeture liant la teneur en eau au potentiel matriciel. La méthode de conservation de la masse suggérée par Celia *et al.* (1990) permet de réécrire la variation temporelle de θ au pas de temps actuel en fonction de sa variation (connue au pas de temps précédent. Avec cette méthode, le terme $\theta^{j+1,k+1}$ est développé en série de Taylor et est tronqué au premier ordre :

$$\frac{\theta_i^{j+1,k+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = C_i^{j+1,k} \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k}}{\Delta t} + \frac{\theta_i^{j+1,k} - \theta_i^j}{\Delta t} \quad (\text{E.6})$$

Où C_i représente la capacité de rétention en eau du sol [L^{-1}] au nœud i :

$$C_i^{j+1,k} = \left. \frac{d\theta}{dh} \right|^{j+1,k} \quad (\text{E.7})$$

Šimůnek (2006) a démontré que cette méthode fournissait d'excellents résultats en termes de minimisation de l'erreur faite sur le bilan hydrique. Dans la pratique, le premier terme à droite de l'équation E.6 doit disparaître à la fin du processus itératif si la résolution numérique converge (Šimůnek *et al.*, 2008).

E.3 Formulation du système discrétisé

L'équation E.3 combinée à la relation de fermeture (équation E.6) permet d'expliciter le système d'équations linéaires donnant la teneur en eau en fonction du potentiel matriciel. Dans le cas d'une géométrie unidimensionnelle la matrice A contenant les coefficients déterminés par la technique des différences finies est tridiagonale. Elle est écrite à chaque pas de temps "actuel" $j+1$ en fonction du pas de temps "antérieur" j ($[A_w]^{j+1,k}$). Le produit de la matrice A par le vecteur $\{h\}^{j+1,k+1}$ contenant la

pression matricielle pour tous les nœuds de la structure donne le vecteur solution $\{F_w\}$.

$$[A_w]^{j+1,k} \{h\}^{j+1,k+1} = \{F_w\} \quad (\text{E.8})$$

La matrice symétrique et tridiagonale $[A_w]$ (équation E.8) a la forme suivante :

$$[A_w] = \begin{vmatrix} d_1 & e_1 & 0 & & & 0 \\ e_1 & d_2 & e_2 & 0 & & 0 \\ 0 & e_2 & d_3 & e_3 & 0 & 0 \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ 0 & & 0 & e_{N-3} & d_{N-2} & e_{N-2} & 0 \\ 0 & & & 0 & e_{N-2} & d_{N-1} & e_{N-1} \\ 0 & & & & 0 & e_{N-1} & d_N \end{vmatrix} \quad (\text{E.9})$$

Les coefficients de la diagonale principales d_i et extra-diagonaux e_i de la matrice $[A_w]$ ainsi que les coefficients f_i du vecteur $\{F_w\}$ sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} d_i &= \frac{\Delta x}{\Delta t} C_i^{j+1,k} + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2\Delta x_i} + \frac{K_i^{j+1,k} + K_{i-1}^{j+1,k}}{2\Delta x_{i-1}} \\ e_i &= -\frac{K_i^{j+1,k} + K_{i+1}^{j+1,k}}{2\Delta x_i} \\ f_i &= \frac{\Delta x}{\Delta t} C_i^{j+1,k} h_i^{j+1,k} - \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\theta_i^{j+1,k} - \theta_i^j \right) + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} - K_{i-1}^{j+1,k}}{2} - S_i^j \Delta x \end{aligned} \quad (\text{E.10})$$

On note que les coefficients d_1 , e_1 , f_1 et e_{N-1} , d_N , f_N dépendent des conditions aux limites imposées aux frontières du domaine de calcul (Šimůnek *et al.*, 2008). Ils font l'objet d'un traitement particulier (discrétisation des conditions aux limites) qui est détaillé dans la section suivante.

E.4 Traitement des conditions aux limites

Comme cela a été mentionné dans le début du chapitre 5 (§ E.1.1), la résolution numérique de l'équation de Richards requiert la définition de conditions aux limites. Dans notre cas (géométrie 1D), nous devons définir les valeurs discrètes associées à ces conditions aux limites sur les faces supérieure et inférieure de la toiture végétalisée.

Conditions de type Dirichlet : L'Eq. E.1 décrite dans le chapitre 5 est discrétisée pour la limite inférieure pour résoudre l'Eq. 5.1 :

- $d_N = 1$
- $e_{N-1} = 0$
- $f_N = h_d = h_0 = 0 \text{ m}$

Ces modifications impliquent de réarranger la matrice $[A_w]$ pour conserver la symétrie (Šimůnek *et al.*, 2008). **Conditions de type Neumann :** Les coefficients pour la résolution de l'Eq. E.2 sont obtenus par discrétisation de l'Eq. 5.7

$$d_1 = \frac{K_1^{j+1,k} + K_2^{j+1,k}}{2\Delta x_1} \quad (\text{E.11})$$

$$f_1 = \frac{K^{j+1,k} + K^{j+1,k}}{2} + q_0^{j+1} \quad (\text{E.12})$$

où q_0 est le flux sortant de la toiture végétalisée [L.T⁻¹].

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} - S \quad (\text{E.13})$$

La discrétisation de l'équation E.13 donne avec la méthode du point fantôme ou ghost-cell :

$$\frac{\theta_N^{j+1,k+1} - \theta_N^j}{\Delta t} = -\frac{2 \left(q_N^{j+1} - q_{N-1/2}^{j+1,k} \right)}{\Delta x_{N-1}} - S_N^j \quad (\text{E.14})$$

Le membre de gauche de l'équation E.14 peut être exprimé par la relation de fermeture sur la teneur en eau, comme nous l'avons écrit pour l'équation E.6, la forme discrétisée de la loi de Darcy pour le terme $q_{N-1/2}$, l'équation devient :

$$d_N = \frac{\Delta x_{N-1}}{2\Delta t} C_N^{j+1,k} + \frac{K_N^{j+1,k} + K_{N-1}^{j+1,k}}{2\Delta x_{N-1}} \quad (\text{E.15})$$

$$f_N = \frac{\Delta x_{N-1}}{2\Delta t} C_N^{j+1,k} h_N^{j+1,k} - \frac{\Delta x}{2\Delta t} \left(\theta_N^{j+1,k} - \theta_N^j \right) - \frac{K_N^{j+1,k} + K_{N-1}^{j+1,k}}{2} - \frac{\delta x_{N-1}}{2} S_N^j - q_N^{j+1} \quad (\text{E.16})$$

avec q_N est le flux d'eau entrant à la surface de la toiture végétalisée. On précise que ce type de condition à la limite préserve la symétrie de la matrice $[A_w]$ (Šimůnek *et al.*, 2008), il n'est donc pas nécessaire de procéder à un réarrangement des termes.

Abstract

The sealing in cities highly degrades the buffer and filter functions of soils which generates and/or emphasizes major environmental issues (*e.g.* urban heat island, flooding, pollution of the runoff water). Among other technologies, advances in green roof engineering provide solutions for the management of urban rainwater. Indeed, green roofs can highly contribute to water regulation service by delaying run-off peaks and decreasing water fluxes to storm water collection network. The purpose of this work is to quantify and model the hydric performances of such an urban Technosol by taking into account the seasonal variations and the aging of the green roof. Physic and hydric measurements were conducted on the green roof constituents. Then, water fluxes and meteorological parameters were monitored in four green roofs parcels – including two with an innovative water storage structure – both at the lab and the building scales. Finally, the hydrodynamics of green roofs was modeled and numerically investigated with HYDRUS-1D in the framework of the Richards equations and the van Genuchten-Mualem model that describe unsaturated flows. As a result: i) the water flows inside these complex porous media were physically characterized, ii) the hydric performances of different parcels over three years, under Lorraine climate, were evaluated, iii) the model approach reached to a good description of the hydraulic behavior at the lab-scale but tends to underestimate *in situ* water fluxes. Beyond that, this work can provide a robust approach to simulate water transfer in green roofs under different climates or situations and may also contribute to further technological development.

Keywords : modelisation, green roof, hydraulic parameters, porous media, Technosol

Résumé

L'imperméabilisation des sols en ville génère des problématiques aigües au niveau du cycle de l'eau urbaine : dégradation de la qualité des eaux de ruissellement, saturation des réseaux de collecte, risque d'inondation. Parmi différentes solutions, la construction de toitures végétalisées offre de nouvelles perspectives dans la gestion de ces eaux pluviales urbaines. De telles structures jouent en effet un rôle de régulation hydrique en retardant les pics de débit lors des pluies d'orage et plus globalement en diminuant les flux envoyés vers les réseaux. L'objectif de cette thèse est de quantifier et de modéliser les performances hydriques ce type de Technosol urbain, en intégrant à la fois les variations saisonnières et le vieillissement de la toiture végétalisée. Le travail repose en premier lieu sur une caractérisation physique et hydrique des constituants des toitures, à travers une démarche pour partie originale de transposition des méthodes développées sur les sols. Ensuite, un suivi expérimental (monitoring des flux et paramètres météorologiques) de quatre modalités de toitures – dont deux équipées d'une structure innovante de stockage d'eau – a été effectué à deux échelles : le laboratoire et le bâtiment. La modélisation et la simulation numérique du transport de l'eau a enfin été effectuée à l'aide du logiciel HYDRUS-1D, avec le formalisme des équations de Richards qui décrivent le transfert en conditions insaturées et la résolution de van Genuchten-Mualem. Les recherches ont permis de caractériser, sur une base physique robuste, les écoulements au sein de ces milieux poreux complexes. Une estimation des performances de différentes modalités de toitures au cours de trois années climatiques est proposée en contexte climatique Lorrain. La démarche de modélisation permet de décrire fidèlement les transferts à l'échelle du laboratoire mais tend à sous-estimer les flux *in situ*. A plus long terme, ces travaux permettent d'envisager aussi bien la simulation du comportement de toitures végétalisées sous d'autres climats, que des développements technologiques basées sur des nouvelles associations de constituants.

Mots clés : modélisation, toiture végétalisée, paramètres hydriques, milieu poreux, Technosol