



HAL
open science

Bilan hydrique des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux

Quentin Cailleux

► **To cite this version:**

Quentin Cailleux. Bilan hydrique des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux. Sciences de l'environnement. 2015. hal-02605647

HAL Id: hal-02605647

<https://hal.inrae.fr/hal-02605647>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Institut national
de recherche en sciences
et technologies
pour l'environnement
et l'agriculture



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

Bilan hydrique des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux

04 Mai 2015 – 28 Août 2015

Quentin CAILLEUX

Master 1 « Sciences De l'Univers, Environnement, Ecologie »
Spécialité « Environnements Continentaux et Hydrosiences »



Etablissement d'accueil :

IRSTEA, Centre d'Antony (92)

Unité de recherche HBAN « Hydrosystèmes et Bioprocédés »

Equipe de recherche technologique MP2 « Mesures Physiques pour les Milieux Poreux »

Responsables de stage :

Sylvain MOREAU (Irstea)

Laurent EISENLOHR (Cerema)

Table des matières

Introduction générale.....	3
Présentation générale	3
Contexte du stage.....	3
Objectifs du stage.....	4
I) Environnement de travail.....	5
A. Présentation de l'IRSTEA.....	5
1. Caractéristiques générales de l'Institut.....	5
2. Le centre d'Antony	6
3. L'unité de recherche HBAN « Hydrosystèmes et Bioprocédés »	6
4. L'équipe de recherche technologique MP2	6
B. Présentation du CEREMA.....	7
1. Caractéristiques générales du centre.....	7
2. La Direction territoriale Centre-Est (DterCE).....	8
3. Unité Déchets, sols pollués, eau souterraine	9
II) Etat des lieux sur les ISDND et leur bilan hydrique	9
A. Généralités sur les ISDND.....	9
B. Contexte réglementaire référant au bilan hydrique.....	12
C. Informations extraites du rapport du CEREMA sur le bilan hydrique (2014)	13
III) Description des paramètres du bilan hydrique.....	14
A) La pluie (P).....	17
B) L'évapotranspiration réelle (ETR).....	18
C) Le ruissellement (Rext, Rint)	19
D) L'absorption (La) et le relargage (Ld) des liquides contenus dans les déchets.....	20
E) La réserve en eau des couvertures de surface (RFU).....	22
F) Le lixiviat collecté (Lc)	23
G) Le lixiviat réinjecté (Lr)	23
H) Le biogaz collecté (B).....	24
I) Les défauts de l'ouvrage (EX, Kc, η , D)	25
J) Conclusions	25
IV) Quantification des paramètres du bilan hydrique	26
A) La pluie (P).....	26
a) Méthodes de mesures	26

b) Données bibliographiques	27
c) Conclusion.....	27
B) L'évapotranspiration réelle (ETR).....	28
a) Méthodes de mesure	28
b) Données bibliographiques	28
c) Conclusion.....	29
C) Le ruissellement (Rint, Rext)	29
a) Méthodes de mesure	29
b) Données bibliographiques	30
c) Conclusion.....	30
D) L'absorption (La) et le relargage (Ed) des liquides contenus dans les déchets.....	30
E) La réserve en eau des couvertures de surface (RU).....	30
a) Méthodes de mesure	30
b) Données bibliographiques	31
c) Conclusion.....	31
F) Le lixiviat collecté (Lc), le biogaz collecté (B) et le lixiviat réinjecté (Lr)	31
a) Méthodes de mesure	31
b) Conclusion.....	31
G) Les défauts de l'ouvrage (EX, Kc, η , D).....	31
Conclusion	32
Bibliographie.....	33
Annexe 1 : Organigramme de l'IRSTEA (Mars 2015).....	36
Annexe 2 : Organigramme de la Direction territoriale Centre-Est (Septembre 2014).....	37
Annexe 3 : Localisation des implantations du CEREMA en France	38
Annexe 4 : Extrait de la convention cadre de partenariat entre IRSTEA et le CEREMA sur la thématique « Déchets »	40
Annexe 5 : Données bibliographiques pour l'évapotranspiration potentielle ETP et l'évapotranspiration réelle ETR	41
Annexe 6 : Données bibliographiques pour le ruissellement Rint	44
Annexe 7 : Données bibliographiques pour la réserve utile RU.....	45
Annexe 8 : Quelques coefficients de ruissellement (Cr) trouvés dans la littérature	46

Introduction générale

Présentation générale

Au cours de la première année du Master de Sciences De l'Univers, Environnement, Ecologie (SDUEE) et de sa spécialité « Environnements Continentaux et Hydrosociétés » (ECH), il nous est demandé de réaliser un stage d'une durée d'au moins deux mois, à compter du 20 Avril 2015, dans l'entreprise ou le laboratoire de notre choix. Pour répondre à cette attente, et ainsi valider l'Unité d'Enseignement (UE) intitulée « Stage en laboratoire ou en entreprise », j'effectue un stage à l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (**Irstea**), au sein du centre d'Antony (Ile-de-France, 92), durant quatre mois, **du 04 Mai 2015 au 28 Août 2015**. Durant ce stage, je me trouve sous la tutelle de **Sylvain MOREAU**, qui est ingénieur de recherche et responsable de l'équipe de recherche technologique MP2 « Mesures Physiques pour les Milieux Poreux » de l'unité de recherche HBAN « Hydrosystèmes et bioprocédés ». Ce stage est proposé dans le cadre d'une convention de partenariat entre l'Irstea et le **CEREMA** (Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement), dont un des axes de travail est la thématique « Déchets ». Pour cela, mon stage est donc également encadré par **Laurent EISENLOHR**, chef de l'unité « Déchets, Sols Pollués et Eaux Souterraines » (DSPE) du Département Environnement, Territoires, Climat (DETC) au sein de la Direction territoriale Centre-Est du CEREMA, et pilote du pôle de compétences et d'innovation (PCI) "valorisation de la gestion durable des déchets".

Le sujet de mon stage, intitulé : « **Bilan hydrique des Installations de Stockage de Déchets (ISD)** », mélange à la fois le cycle de l'eau et la gestion des déchets.

Contexte du stage

Ce stage intervient au cœur d'une période extrêmement importante en ce qui concerne la gestion des déchets. Au cours des dernières décennies, la production de déchets a significativement augmenté en France, compte tenu du développement de la société de consommation, de l'amélioration du niveau de vie, et de la croissance démographique. Ainsi, la production d'ordures ménagères (OM) a doublé en 40 ans. En 2012, 345 millions de tonnes de déchets étaient produits en France (ADEME, 2015). En 2013, le service public de gestion des déchets a collecté quelques 37,6 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés (ADEME, 2015). En 2012, 47,7 millions de tonnes de déchets étaient acheminées vers les installations de traitement des déchets ménagers et assimilés pour traitement, tandis qu'à la même période, 19,5 millions de tonnes de déchets ont été envoyées dans les installations de stockage de déchets, pour élimination (ADEME, 2015). La gestion des déchets est donc devenue un enjeu majeur pour notre société, ce qui conduit les industriels à optimiser et maîtriser au mieux le fonctionnement des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND). L'enjeu majeur de ces ISDND est d'accélérer la biodégradation des déchets pour en réduire notamment l'impact sur l'environnement. En plus des enjeux écologiques, la problématique de la gestion des déchets répond aussi à d'importants enjeux économiques. En effet, la dégradation des déchets permet aux exploitants de ces ouvrages de valoriser le biogaz généré, et de réduire dans le temps les coûts induits par le suivi et la surveillance du site.

Le bilan hydrique d'une Installation de Stockage de Déchets est un outil puissant demandé par les autorités de contrôle et qui doit être disponible régulièrement. Le bilan hydrique se définit comme le résultat chiffré de la comparaison des apports (ex. précipitations) et des pertes d'eau (ex. évapotranspiration), sur une surface ou un volume de terrain considéré, pendant une durée déterminée. Cette « balance comptable » des entrées et des sorties d'eau sur le site est obtenu en calculant la différence de celles-ci. Il est positif lorsque de l'eau de pluie reste stockée dans le massif de déchets et négatif lorsque du lixiviat¹ s'écoule en quantité supérieure aux eaux de pluie. Tous les termes du bilan hydrique doivent avoir la même unité. Les termes du bilan hydrique s'expriment

généralement en hauteur d'eau (mm) par mètre carré (m²) de surface, bien qu'il puisse également s'énoncer en hauteur d'eau (mm) ou encore en volumes (m³). Le bilan hydrique tient compte, entre autres, des paramètres climatiques (ex. précipitations, température, ...) et du mode de fonctionnement de l'installation (ex. volumes de lixiviat réinjectés dans le massif de déchets).

Utilisé à différents moments de la gestion de l'ouvrage, au cours et à la fin de la mise en stockage ou encore au cours de la période de post-exploitation, le bilan hydrique recense les entrées et sorties de lixiviat¹ du massif de déchets. Cela, dans le but de quantifier le stock d'eau et de lixiviat en présence à l'intérieur du casier où sont entreposés les déchets, puis à l'échelle du site industriel. Il permet de définir et de dimensionner les ouvrages de collecte, de drainage, et de traitement du lixiviat, à mettre en œuvre sur ou aux environs du site. Le bilan hydrique permet également d'évaluer le fonctionnement d'une ISD, à travers une mise en évidence de l'absence d'impact(s) sur les ressources en eau et le milieu naturel.

Le contexte réglementaire demande à l'exploitant d'une installation de stockage de déchets non dangereux ou de déchets des industries extractives de calculer, **au moins annuellement**, le bilan hydrique de l'installation (Villemin, 2014). Son suivi doit valider le bon fonctionnement du site notamment la bonne protection des sols, eaux souterraines et eaux de surfaces, et doit contribuer à la gestion des flux polluants potentiellement issus de l'installation (Villemin, 2014) et à réviser, si nécessaire, les aménagements du site. Le bilan hydrique peut être établi par l'exploitant ou un bureau d'études intervenant dans le domaine de la gestion des déchets, et il est consulté par les services de l'État en charge du suivi des ISD dans le cadre de leur mission de police des installations classées.

Actuellement, il existe peu de documentation sur les méthodes proposant un mode d'estimation du bilan hydrique dédié aux installations de stockage de déchets. Ce manque se traduit par :

- une méconnaissance de la sensibilité de certains paramètres pouvant intervenir dans le fonctionnement hydrique d'une ISD,
- la difficulté d'obtenir les données sources pour le calcul du bilan hydrique,
- une forte hétérogénéité des approches numériques utilisées et ainsi,
- un manque de méthodologie pour appréhender l'échantillonnage de la matrice solide (déchet) stockée, et définir sa teneur en eau initiale moyenne pour qu'elle soit représentative à l'échelle de l'ouvrage,
- la difficulté pour les services instructeurs de juger les éléments fournis par les exploitants.

Objectifs du stage

L'objectif du stage est d'évaluer les méthodologies existantes ou à développer pour établir le bilan hydrique des installations de stockage de déchets non dangereux. Concrètement, l'objectif principal du stage proposé consiste en la recherche d'une formule de bilan hydrique, applicable à toute ISDND, à tout instant t, aussi bien au cours du remplissage de l'installation de stockage que consécutivement à son exploitation.

Les objectifs du stage sont donc :

- de mener une étude bibliographique des méthodes d'estimation des bilans hydriques et du contexte réglementaire dans le cadre de la gestion des ISD ;
- d'identifier les outils de calculs et les données sources utilisés ;
- d'évaluer la sensibilité des données et des paramètres des modèles disponibles ;
- de rencontrer des services instructeurs de l'état afin d'appréhender leurs attentes vis-à-vis du document ressource et des exploitants pour évaluer les pratiques industrielles ;
- et de rédiger un rapport.

L'ensemble de ces points sera abordé au cours des 4 mois de stage, jusque fin août, et se poursuivra donc après ma soutenance de stage, le 1^{er} juillet prochain.

¹ Le lixiviat est le liquide résiduel produit par la percolation des eaux météoriques et des eaux constitutives des déchets à travers le massif de déchets. Il est riche en matières organiques et en éléments traces, tels que les métaux lourds, les polluants organiques et chimiques, et les radionucléides. La présence de tous ces composés est due à la dégradation des déchets par des réactions bio-physico-chimiques. Le lixiviat s'accumule en fond d'ISDND (source : définition <http://www.futura-sciences.com/>)

I) Environnement de travail

A. Présentation de l'IRSTEA

Source : www.irstea.fr

1. Caractéristiques générales de l'Institut

Né en 1981 de la fusion du Centre Technique du Génie Rural des Eaux et des Forêts (CTGREF) et du Centre National d'Etudes et d'Expérimentations du Machinisme Agricole (CNEEMA), le CEMAGREF (Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts) devient l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) en Novembre 2011.

L'IRSTEA est un Etablissement Public national à caractère Scientifique et Technologique, sous la double tutelle des Ministères de la Recherche et de l'Agriculture.

L'IRSTEA emploie près de 1650 personnes, réparties sur neuf centres couvrant l'ensemble du territoire français.

L'IRSTEA est un organisme de recherche qui, depuis plus de trente ans, travaille sur les enjeux majeurs d'une agriculture responsable et de l'aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés, l'étude des écosystèmes complexes et de la biodiversité dans leurs interrelations avec les activités humaines.

Ses cinq orientations scientifiques concernent :

- Les risques environnementaux tels que les crues, les inondations, les avalanches, les feux de forêt et les pollutions diffuses ;
- La surveillance des milieux aquatiques continentaux, les ressources en eau ;
- Les technologies propres telles que les écotechnologies, l'éco-évaluation, l'éco-toxicologie, le traitement et la valorisation énergétique des déchets organiques ;
- L'aménagement du territoire ;
- L'économie et la sociologie de l'environnement : observation de la biodiversité, télédétection.

L'IRSTEA est donc caractérisée par une recherche multidisciplinaire. Elle compte douze thèmes de recherche (TR), distribués selon trois départements de recherche distincts. Ainsi, un département de recherche traite des eaux, un autre est porté sur les écotechnologies, tandis que le dernier est relatif aux territoires. Les TR sont mis en œuvre par une ou plusieurs unités de recherche (UR). Au total, l'IRSTEA s'appuie sur 24 UR, réparties au sein des neuf centres cités précédemment.

2. Le centre d'Antony

Les équipes de recherche du centre d'Antony apportent leurs compétences dans les domaines des eaux continentales et des eaux usées, de la gestion des déchets, du génie des procédés frigorifiques et de la chaîne du froid, de la sécurité et des performances des agroéquipements.

3. L'unité de recherche HBAN « Hydrosystèmes et Bioprocédés »

L'unité de recherche HBAN est placée sous la direction de Nathalie Touze-Foltz. Elle est constituée de huit équipes de recherche, d'une équipe transversale (laboratoire de chimie) et d'un observatoire de recherche (GIS Oracle).

Les travaux de recherche de l'unité HBAN ont pour objectif la maîtrise qualitative et quantitative des eaux continentales de surface. Les deux principaux axes de recherche sont la connaissance et la gestion des hydrosystèmes (flux d'eau et de substances polluantes, habitats et communautés aquatiques), et les technologies qui leur sont associées (bioprocédés de traitement des eaux usées et des déchets ménagers).

Les modèles et l'expertise de l'unité s'appliquent à l'ingénierie des stations d'épuration et des installations de stockage des déchets, à la prévision des ressources en eau (fleuves, retenues) et des événements exceptionnels (crues, étiages), à la gestion des populations de poissons et de l'occupation des bassins versants fortement anthropisés, permettant une approche intégrée de la gestion des hydrosystèmes.

4. L'équipe de recherche technologique MP2

L'équipe de recherche technologique « Mesures Physiques pour les Milieux Poreux » (MP2), au sein de laquelle j'ai réalisé ce stage, développe des outils de recherche et techniques de mesure pour la compréhension des propriétés hydro-physicochimiques des milieux poreux, tel que le déchet ménager par exemple, et apporte un soutien métrologique aux travaux expérimentaux menés dans l'unité.

Quatre types d'activités la caractérisent aujourd'hui :

- la recherche en instrumentation et métrologie pour les mesures physiques dans les sols et les déchets, dans le cadre du thème de recherche TED (Technologies et procédés pour l'Eau et les Déchets) ;
- le développement de la démarche métrologique en général, en lien avec l'ensemble des équipes de l'unité de recherche.
- la coordination du réseau Mesure IRSTEA, constitué en ateliers thématiques sur des questions liées à la mesure.
- le service instrumentation pour l'aide à la conception et la mise en œuvre des projets des équipes de recherche.

Les travaux menés par l'équipe MP2 au sein des Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux (ISDND) s'appliquent notamment aux installations de type bioréacteur dont l'objectif est d'accélérer la stabilisation du massif de déchets en favorisant leur biodégradation par la recirculation des lixiviats.

B. Présentation du CEREMA

Source : www.cerema.fr

1. Caractéristiques générales du centre

Le Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema) est, depuis le 1^{er} janvier 2014 (cf. décret n° 2013-1273 du 27 Décembre 2013), un établissement public de l'Etat à caractère administratif (titre 1^{er}*, article 1). Il est issu de la réunion des 8 Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE)**, du Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU), du Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), du Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (SETRA).

Il se compose d'un siège, situé à Bron dans le Rhône (69) (article 1) ; de 3 directions techniques ; et 8 directions territoriales (titre IX****, article 44***). Cet établissement est placé sous la tutelle conjointe du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et du ministère de l'égalité des territoires et du logement.

Le CEREMA emploie 3100 personnes - dont 220 experts nationaux et internationaux -, sur l'ensemble du territoire français. Il est présent à travers 29 sites, et est doté de 17 laboratoires et de 4 centres d'essais. Il développe des relations d'envergure avec les collectivités territoriales présentes dans ses instances de gouvernance.

Le CEREMA est, au plan national et territorial, un centre de ressources et d'expertises scientifiques et techniques interdisciplinaires qui intervient en appui à la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques portées par les services de l'Etat et les collectivités locales. Le CEREMA possède un budget de 250 millions d'euros et est caractérisé par la présence de 66 pôles de compétences et d'innovation, et 33 équipes de recherches associées.

* Le titre 1er s'intitule « Dispositions générales ».

** à savoir les CETE Est, de Lyon (du Centre-Est), Méditerranée, Nord-Picardie, Normandie-Centre, Ouest, Sud-Ouest et Île-de-France.

*** L'article 44 se réfère à la loi n°2013-431 du 28 mai 2013 portant diverses dispositions en matière d'infrastructures et de services de transports.

**** Le titre IX de cette loi se nomme : « Centre d'Etudes et d'expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement ».

Fort de son savoir-faire transversal, de son objectivité, de sa pluridisciplinarité, de ses compétences, de sa déontologie, et de son expertise, le CEREMA intervient dans des domaines variés : la connaissance et la prévention des risques, le développement des infrastructures, l'énergie et le climat, la gestion du patrimoine d'infrastructures, les impacts sur la santé, la mobilité et les transports, les territoires durables et les ressources naturelles, la ville et les bâtiments durables.

Le CEREMA, en apportant des conseils aux entreprises, en s'impliquant dans des activités de production, d'expertise et d'essais, en encore en développant une ingénierie publique innovante au profit des maîtres d'ouvrages, contribue à jouer un rôle majeur dans la valorisation de la recherche.

Le CEREMA accompagne les acteurs privés, entretient des relations privilégiées avec les services de l'Etat, et renforce ses relations auprès des collectivités locales, en cherchant toujours à développer de nouveaux partenariats.

De par ses prestations de recherche, de certification, de normalisation, de contrôle, de méthodologie, d'innovation, d'évaluation, d'expertise et d'ingénierie, et de par sa vocation de

diffusion des connaissances scientifiques et techniques (sites web, interventions en formation, journées techniques, éditions ...), le CEREMA contribue largement à la conception et à la mise en œuvre des politiques publiques conduites par le ministère.

2. La Direction territoriale Centre-Est (DterCE)

Source : <http://www.centre-est.cerema.fr/>

La Direction territoriale Centre-Est (DterCE) du CEREMA est constituée de quatre implantations, situées à Bron (69), Isle-d'Abeau (38), Autun (71) et Clermont-Ferrand (63). Elle est composée de plus de 480 agents, dont 230 chargés d'études. Certains sont experts internationaux.

La Direction territoriale Centre-Est contient six départements :

- trois départements laboratoires (pour Lyon : DLL, Pour Clermont Ferrand : DLCf, Pour Autun : DLA)
- un département mobilités (DMOB)
- un département construction aménagement projet (DCAP)
- un département environnement territoires climat (DETC)

Elle possède un nombre important de clients, répartis dans une multitude d'organismes : DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), Régions, DIR (Directions Interdépartementales des Routes), DDT (Directions Départementales des Territoires), Administrations centrales, Départements, Villes, Intercommunalités, Sociétés d'Autoroutes, Ecoles, Centres de formation... .

La DterCE réalise des prestations d'ingénierie étayées par des essais en laboratoire ou sur le terrain (15 % de ses interventions) ; effectue un travail méthodologique et/ou de la recherche (38 % de ses contributions) ; opère dans des actions de formation et d'animation (11 % des services qu'elle propose) ; et mène des expertises, conseille ses clients, procède à des assistances techniques à maîtrise d'ouvrage ou maîtrise d'œuvre (36 % de ses interventions).

La Direction territoriale Centre-Est intervient dans de multiples thématiques :

- la prévention des risques et des pollutions des eaux la gestion des sites et des sols pollués ;
- la sécurité des déplacements, en abordant les problématiques urbaines et interurbaines de la sécurité routière au travers du triptyque conducteur-usager/véhicule/infrastructure ;
- l'énergie et le climat, en réfléchissant à limiter les conséquences des impacts de l'activité humaine, et la consommation d'énergie ;
- la ville et l'aménagement des territoires en croisant les échelles et les thèmes pour intervenir sur l'urbain et les espaces plus ruraux ;
- la mobilité et les réseaux de transport, en développant une approche multimodale de la mobilité ;
- la construction, à travers une amélioration de la performance technique et de la qualité d'usage ;
- l'environnement, en réalisant des évaluations environnementales globales et des expertises des domaines de l'eau, de la biodiversité et des milieux naturels ;
- les ouvrages d'art, la géotechnique, les terrassements et les chaussées ;
- les grands projets d'aménagement et d'infrastructures.

3. Unité Déchets, sols pollués, eau souterraine

L'unité Déchets, sols pollués, eau souterraine est au sein du département DETC. L'unité est mobilisée dans les actions de protection de la ressource (eau, sol, déchets).

Dans le cadre de la politique nationale de prévention et de gestion des déchets, le MEDDE/DGPR (Ministère de l'Écologie, du Développement durable de l'Énergie / Direction générale de la Prévention des Risques) a souhaité un appui scientifique et technique du Cerema et a confié le pilogage du PCI valorisation et gestion durable des déchets à l'unité DSPES.

Les orientations thématiques du PCI sont regroupées autour de 3 axes majeurs :

- la participation à des actions innovantes (projet de génie civil à 0 déchets, actions pour diminuer les impacts environnementaux et sanitaires des divers modes de gestion des déchets, opérations R&D pour substituer les matériaux naturels par des matériaux alternatifs)
- l'appui à l'administration centrale sur l'élaboration de nouveau texte réglementaire, la rédaction de guides techniques et méthodologiques, la participation aux groupes de travail pour la prévention et la gestion des déchets,
- la diffusion et la valorisation des bonnes pratiques auprès des services et acteurs économiques (organisation et participation à des journées techniques, appui à la prévention et gestion des déchets, animation de réseaux)

L'extrait de la convention cadre de partenariat entre l'Irstea et le Cerema sur la thématique « Déchets » est présenté en Annexe 4.

II) Etat des lieux sur les ISDND et leur bilan hydrique

A. Généralités sur les ISDND

Les déchets présents dans une ISDND constituent un milieu poreux insaturé (Bellenfant, 2001), où coexistent trois phases distinctes : une phase solide (avec le déchet), une phase liquide (avec le lixiviat), et enfin une phase gazeuse (avec le biogaz) (Djiré, 2010).

D'après l'arrêté du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux, actuellement en cours de révision, les déchets autorisés à être stockés dans une ISDND pour élimination sont « les déchets non dangereux ultimes¹, quelle que soit leur origine, notamment provenant des ménages ou des entreprises » (titre 1^{er}², article 3³).

Les déchets d'amiante lié à des matériaux de construction inertes ayant conservé leur intégrité, les déchets de terres naturellement amiantifères⁴, et les agrégats d'enrobés bitumineux⁵ amiantés sont également admis, dans des casiers⁶ mono-déchets⁷ dédiés (article 3).

Des matériaux à base de plâtre sont admis dans des casiers dédiés aux déchets de plâtre⁸, sans essai (article 3). Ceci concerne le plâtre et les carreaux de plâtre, les plaques de plâtre cartonées, les complexes d'isolation, le plâtre en enduits sur supports inertes, les parements plafond à plaques de plâtre, le staff, et le plâtre sur ossature métallique (article 3). Les autres déchets de plâtre sont admis dans des casiers dédiés aux déchets de plâtre, dès qu'ils respectent certaines valeurs limites, lors de la réalisation du test de potentiel polluant. Ce test est basé sur la réalisation d'un essai de lixiviation et la mesure du contenu total en carbone organique (article 3).

Enfin, « une installation de stockage de déchets dédiée aux déchets de sédiments ne peut recevoir que des déchets de sédiments non dangereux⁹, à l'exclusion de tout autre type de déchets » (article 3).

¹ Un déchet ultime est un déchet non valorisable dans les conditions techniques et économiques du moment (article 1).

² Le titre 1^{er} s'intitule « Définitions et champ d'application ».

³ L'article 3 de l'arrêté ministériel aborde les déchets autorisés et les déchets interdits dans une installation de stockage de déchets non dangereux.

⁴ Un déchet de terres naturellement amiantifères est un déchet de matériaux géologiques naturels excavés contenant naturellement de l'amiante (article 1).

⁵ Les agrégats d'enrobés bitumineux sont les déchets provenant de la couche supérieure de la structure de chaussée du réseau routier (article 1).

⁶ Un casier est une subdivision de la zone à exploiter assurant l'indépendance hydraulique, délimitée par des flancs et un fond (article 1).

⁷ Les mono-déchets sont des déchets de même nature, relevant d'un même code déchets ; les déchets biodégradables ne peuvent pas être considérés comme des mono-déchets (article 1).

⁸ Un déchet de plâtre est un déchet de matériaux de construction contenant au moins 10 % en masse de plâtre (article 1).

⁹ Un déchet de sédiments non dangereux est défini comme étant un déchet de vase et de graviers provenant de l'érosion des berges et des sols, et ne présentant aucune des propriétés de dangers énumérées à l'annexe I de l'article R.541-8 du code de l'environnement (article 1).

Selon ce même arrêté, une ISDND doit être implantée sur des terrains au contexte géologique, hydrologique et hydrogéologique favorable (titre II*, chapitre 1**, article 5***). En allant plus loin, les terrains d'implantation de l'ISDND ne doivent pas être exposés à des risques d'inondation, d'affaissement, de glissement de terrain ou d'avalanche (titre II, chapitre 1, article 6****).

* Titre II : « Conception et construction de l'installation ».

** Chapitre 1 : « Localisation de l'installation et maîtrise foncière ».

*** Article 5 : « Géologie, hydrologie et hydrogéologie ».

**** Article 6 : « Critères d'implantation de l'installation ».

La présence d'une barrière de sécurité passive, constituée du terrain naturel en l'état (sous-sol) de la zone à exploiter, permet d'assurer à long terme la protection du sol, des eaux souterraines et de surface, contre la pollution par les déchets et les lixiviats (titre II, chapitre 2*, article 8**).

* Le chapitre 2 présente les « exigences relatives à l'étanchéité, au drainage et à la stabilité ».

** L'article 8 se qualifie « Barrière de sécurité passive ».

Cette barrière de sécurité passive ne doit pas être sollicitée pendant l'exploitation, sauf en cas de dernier recours (article 5).

Pour une ISDND, la barrière de sécurité passive doit répondre aux critères suivants : « le fond de la zone à exploiter présente, de haut en bas, une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre d'épaisseur et une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-6} m/s sur au moins 5 mètres d'épaisseur » (article 8).

De plus, « les flancs de la zone à exploiter présentent une perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre d'épaisseur sur toute leur hauteur » (article 8).

Enfin, « les éventuelles digues assurant l'indépendance hydraulique à l'intérieur du casier présentent une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur une largeur de 5 mètres minimum à leur base et sur une hauteur minimale de 2 mètres » (article 8).

NB : Dans le cas où la barrière géologique naturelle ne répond pas aux conditions précédentes, « elle peut être complétée artificiellement et renforcée par d'autres moyens présentant une protection équivalente » (article 8).

Un dispositif constitué d'une géomembrane en PEHD « résistante aux sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques pendant toute la durée d'exploitation et de suivi long terme », est mis en place sur le fond et les flancs de chaque casier de remplissage (titre 1^{er}, chapitre 2, article 10*). Cette géomembrane, constituant une barrière de sécurité active, assure l'étanchéité du casier, en retenant les liquides résiduels dans l'alvéole, évitant alors une percolation des polluants dans le sous-sol jusqu'aux nappes d'eaux souterraines.

Ce dispositif d'étanchéité contribue également au drainage et à la collecte des lixiviats, en fond d'alvéole (article 10). Il est recouvert d'une couche de drainage, d'une épaisseur supérieure ou égale à 50 cm, « constituée d'un réseau de drains permettant l'évacuation des lixiviats vers un collecteur principal complété d'une structure granulaire artificielle ou naturelle dont la perméabilité est supérieure ou égale à 1.10^{-4} m/s ». Tout en certifiant que « cette couche de drainage résiste aux sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques pendant toute la durée d'exploitation et de suivi long terme » (article 10).

Si la couche de drainage présente le risque d'endommager la géomembrane en PEHD, « un géotextile anti-poinçonnant doit être intercalé entre cette dernière et le matériau constitutif de la couche de drainage » (article 10).

* L'article 10 se nomme : « Barrière de sécurité active et drainage ».

Le site d'implantation d'une ISDND est caractérisé par la présence de plusieurs casiers de remplissage, subdivisés en alvéoles, où sont stockés les déchets non dangereux (AMORCE, 2007). Dans la suite de ce rapport, nous ne ferons pas de distinction entre les termes de casier et d'alvéole. Les casiers de remplissage présents sur un même site sont comblés les uns après les autres. Ces casiers possèdent une surface de petite taille, comme l'indique l'alinéa de l'article 37* : « la zone en cours d'exploitation** ne doit pas être supérieure à 7000 m² ». Cette surface réduite permet ainsi « de limiter les entrées d'eaux pluviales au sein du massif de déchets », et de limiter les émissions de biogaz (article 37). Ce mode de stockage permet de limiter les envols de déchets légers (article 37), et les nuisances olfactives, sujettes à incommoder la population.

* L'article 37, intitulé « Limitation de la zone en cours d'exploitation, des envols de déchets, du risque incendie et recouvrement périodique des déchets, activité de tri », fait partie du chapitre 4, désigné « Conduite d'exploitation », et du titre III dénommé « Exploitation de l'installation ».

** La zone en cours d'exploitation est la zone à exploiter*** ouverte à la réception des déchets (article 1).

*** La zone à exploiter correspond à l'emprise foncière maximale affectée au stockage des déchets non dangereux, sans prendre en compte la surface occupée par les équipements connexes nécessaires au fonctionnement de l'installation (article 1).

Comme indiqué dans le titre de l'article 49*, issu du titre IV** de l'arrêté relatif aux ISDND, dès la fin de son exploitation, tout casier, autre que ceux exploités en mode bioréacteur, est doté « d'une couverture intermédiaire constituée d'une couche d'épaisseur de 0,5 mètre constituée de matériaux inertes ». Selon le matériau inerte considéré, ce dernier peut être perméable, semi-perméable voire imperméable. En principe, en lien avec les observations de terrain, nous considérons que les casiers de stockage fermés temporairement sont recouverts d'une couverture semi-perméable.

Cette couverture assure une certaine étanchéité à l'eau et au gaz (article 49), en fonction de sa perméabilité, qui lui est propre.

* Article 49 : « Fermeture temporaire de la zone d'exploitation ».

** Titre IV : « Fin d'exploitation ».

Viens ensuite la mise en place de la couverture finale du casier de stockage.

Une couverture minérale d'une épaisseur minimale de 0,5 mètre et d'une perméabilité inférieure à 1.10^{-7} m/s est mise en place sur tout casier, autre que ceux exploités en mode bioréacteur. Cette

couverture permet le confinement des déchets, et permet de limiter les infiltrations d'eaux pluviales dans le massif de déchets (titre IV, article 50*).

En ce qui concerne les casiers exploités en mode bioréacteur, ceux-ci sont équipés « d'une couverture d'une épaisseur minimale de 0,5 m et d'une perméabilité inférieure à $5 \cdot 10^{-9}$ m/s au plus tard 6 mois après la fin du comblement du casier » (article 50).

La couverture finale peut comporter une géomembrane (article 50).

L'article 50 précise également qu'au-dessus de la couche d'étanchéité de la couverture finale, chaque casier contient, « du bas vers le haut :

- Une couche de drainage des eaux de ruissellement, composée de matériaux naturels d'une épaisseur minimale de 0,5 m ou de géosynthétiques ;
- Une couche de terre de revêtement d'une épaisseur minimale d'un mètre » (article 50).

* L'article 50 décrit la « couverture finale des casiers comblés ».

Enfin, dès que les opérations invoquées précédemment sont terminées, des travaux de revégétalisation se mettent en place au-dessus de la couverture finale (article 50).

Pour la suite du rapport, trois cas de casiers apparaissent.

Tout d'abord, le casier peut être en cours de remplissage par des déchets, et donc en cours d'exploitation, pendant une certaine période appelée **période d'exploitation***. Viens ensuite le cas où dès lors que le casier est fermé, il est recouvert d'une couverture semi-perméable**. Enfin, le troisième et dernier cas correspond au casier fermé recouvert d'une couverture finale imperméable, normalement surmontée d'un couvert végétal.

Une fois le casier comblé et recouvert, un suivi de celui-ci s'opère sur le long terme. La période correspondante est appelée **période de suivi long terme*****.

* D'après l'article 1 du titre 1^{er} de l'arrêté, la période d'exploitation d'un casier est définie comme la période commençant à la date de réception des premiers déchets dans un casier, et se terminant à la date d'achèvement de la couverture finale du casier.

** Dans ce second cas, étant donné que la fermeture du casier est **temporaire**, nous estimons que la couverture semi-perméable **n'est pas** surmontée par une couverture végétale.

*** La **période de suivi long terme** est la période comprenant la période de post-exploitation**** et la période de surveillance des milieux, sa durée ne pouvant être inférieure à 30 ans (article 1).

**** La période de post-exploitation d'un casier est la période d'une durée minimale de 25 ans, commençant à la date de notification à l'inspection des installations classées par l'exploitant de l'achèvement de la couverture finale du casier, et s'achevant dès lors que les données de surveillance des milieux ne montrent pas d'évolution des paramètres contrôlés tant du point de vue de l'air que des eaux souterraines qui nécessiterait des dispositifs actifs de gestion des effluents (article 1).

B. Contexte réglementaire référant au bilan hydrique

Selon l'article 39⁸ du chapitre 4⁹ de l'arrêté relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux, « l'exploitant (d'une ISDND) tient à jour un registre sur lequel il reporte quotidiennement les éléments nécessaires au calcul hydrique de l'installation : la pluviométrie, la température, l'ensoleillement, l'évaporation, l'humidité relative de l'air, la direction et la force des vents, et les quantités d'effluents rejetés ». D'autre part, « il reporte une fois par semaine le relevé de la hauteur d'eau dans les puits » (article 39). Dans cet article, il est également précisé que « les données météorologiques nécessaires (au calcul du bilan hydrique) sont recherchées auprès de la station météorologique locale la plus représentative du site, en l'absence d'instrumentation sur ce dernier ». Toujours d'après l'article 39, et à la suite des alinéas précédents, dans le cas des installations dédiées au stockage de déchets de sédiments, les prescriptions sont les suivantes : « Durant la période d'exploitation, l'exploitant tient à jour un registre sur lequel il reporte mensuellement les éléments nécessaires au calcul du bilan hydrique de l'installation : la pluviométrie, la température,

l'ensoleillement, l'évaporation, l'humidité relative de l'air, la direction et la force des vents, le relevé de la hauteur d'eau dans les puits, et les quantités d'effluents rejetés ». De même que précédemment, « les données météorologiques nécessaires sont recherchées auprès de la station météorologique locale la plus représentative du site » (article 39).

Finalement, dans le cas d'une installation de stockage de déchets non dangereux gérée en mode bioréacteur, la réglementation concernant le bilan hydrique précise que « L'exploitant tient à jour un registre sur lequel il reporte quotidiennement les volumes de lixiviats réinjectés dans le massif de déchets et l'humidité des déchets entrants » (article 39).

⁸ L'article 39 de l'arrêté se nomme « Registres ».

⁹ Le chapitre 4 de l'arrêté est intitulé « Conduite d'exploitation ».

Selon l'article 41¹⁰ du chapitre 5¹¹ de ce même arrêté, « l'exploitant relève une fois par semaine : le niveau de lixiviats dans les puits de collecte de lixiviats, la hauteur de lixiviats dans le bassin de collecte ». D'autre part, l'article précise que « dans le cas d'une collecte non gravitaire des lixiviats, l'exploitant relève une fois par semaine les volumes de lixiviats pompés ».

¹⁰ L'article 41 de l'arrêté est intitulé « Surveillance des paramètres de fonctionnement des installations de collecte des lixiviats liées aux casiers en cours d'exploitation ».

¹¹ Le chapitre 5 de l'arrêté se nomme « Suivi de l'installation en cours d'exploitation ».

C. Informations extraites du rapport du CEREMA sur le bilan hydrique (2014)

En 2014, un rapport portant sur le bilan hydrique des installations de stockage de déchets non dangereux a été rédigé au sein du CEREMA, par Hugues VILLEMINE. Ce dernier a proposé la formule suivante pour représenter le bilan hydrique d'une alvéole de déchets :

$$L = P - ETR + Rint - Rext + (Ed - Ec) - I \quad [1]$$

Avec : **L**, le lixiviat collecté

P, les précipitations

ETR, l'évapotranspiration réelle

Rint, le ruissellement de l'eau en direction de l'intérieur de l'alvéole

Rext, le ruissellement de l'eau vers l'extérieur de l'alvéole

Ed, la teneur en eau des déchets entrants

Ec, la teneur en eau critique de ces déchets

I, l'infiltration du lixiviat dans le substratum et sur les flancs

L'équation [1] a ensuite été simplifiée, en envisageant les deux paramètres **Rint** et **I** égaux à 0, de telle sorte que l'équation [1] devienne :

$$L = P - ETR - Rext + (Ed - Ec) \quad [2]$$

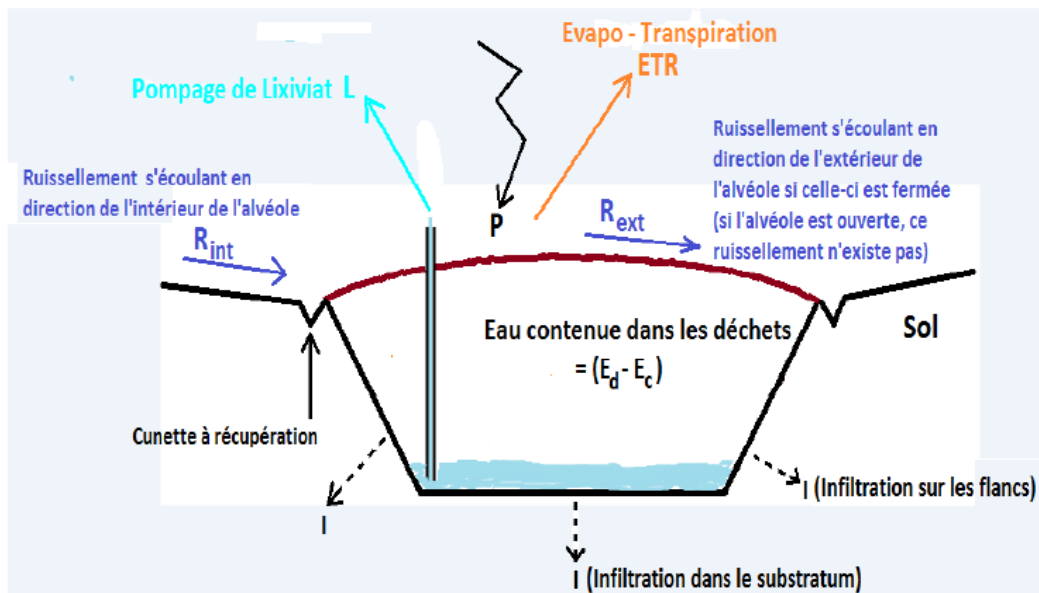


Figure 1 : Bilan hydrique d'une alvéole de déchets (Source : Hugues VILLEMIN, 2014)

Le schéma ci-dessus (cf. Figure 1), également réalisé par Hugues VILLEMIN, rend compte des paramètres du bilan hydrique présentés en [1].

III) Description des paramètres du bilan hydrique

En première approximation, les formules [1] et [2] de la dernière sous-partie paraissent simplifiées dans la représentation du bilan hydrique d'une alvéole de déchets. Cela se confirme par la réalisation d'une recherche bibliographique plus approfondie, au cœur d'articles, de thèses et autres rapports. En effet, cette recherche nous montre clairement que les équations précédemment citées manquent de paramètres dont il faudrait tenir compte pour calculer le bilan hydrique d'une alvéole de déchets, de façon précise.

De plus, lors de ce stage, l'intérêt est de proposer une formule de bilan hydrique, applicable à un site d'ISDND, formé de plusieurs (types de) casiers (cf. I), A)) et non d'une seule alvéole, comme c'est le cas dans le rapport de Hugues VILLEMIN. De ce fait, notre échelle de travail est différente, et fera sûrement appel à un nombre de paramètres plus importants que ceux mis en évidence par le CEREMA.

A travers ce stage, nous cherchons à évaluer le bilan hydrique des déchets à l'intérieur des casiers de stockage, et non à l'échelle de la totalité du casier (déchets + couverture(s)).

D'après la définition du bilan hydrique, les entrées d'eau dans l'alvéole de déchets doivent être égales aux sorties de lixiviat plus la quantité d'eau stockée dans le milieu, selon la formule :

Entrée d'eau = Sortie d'eau +/- Rétenion d'eau (par les déchets et la couverture de surface)
(ADEME, 1999)

A l'aide de références bibliographiques, et par réflexion, une formule générale du bilan hydrique au niveau du massif de déchets est proposée par nos soins :

$P + R_{ext} + L_r = ETR + R_{FU} + R_{int} + L_c + B + L_a - L_d$ +/- défauts de l'ouvrage : EX, Kc, η , D

Les Références utilisées sont :

- ✓ *Bilan hydrique des Installations de Stockage de déchets Non Dangereux – Application au cas de Saint-Quentin-sur-Isère*, Hugues VILLEMIN, 2014 (Rapport du CEREMA 2014)

- ✓ *Circulaire DPP/SD/SEI/YG/MM n°1364 du 16/10/84 relative à la mise en décharge de déchets industriels*, Direction Générale de la Prévention des Risques, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 1984
- ✓ *Centres de stockage des déchets – Exploitation*, Hervé BILLARD, 2001
- ✓ *259-55 Bilan hydrique d'un centre de stockage*, Wolters Kluwer, après Juillet 2001
- ✓ *Etude du bilan hydrique de décharges industrielles – calcul du bilan hydrique*, A. Lallemand-Barrès & M. Sauter, 1986
- ✓ *Performance d'un géosynthétique bentonitique dans une couverture d'installation de stockage de déchets après six ans en service*, Thierry PIRRION ; Jean-Frédéric OUVRY ; Nathalie TOUZE-FOLTZ ; Didier CROISSANT ; Sandrine ROSIN-PAUMIER, 2012
- ✓ *ISDND Les Parrines – Bilan hydrique du site (modèle MOBYDEC)*, Sydevom04, après 2010
- ✓ *Approches du bilan hydrique de deux centres de stockage des déchets ménagers dans les pays en développement : cas de Go-Cat (Vietnam) et Essaouira (Maroc)*, Fouad ZHRANI ; Rémy GOURDON ; Philippe REVIN ; Paul VERMANDE ; Pascale NAQUIN ; Tien Dung TRAN NGOC, après 2004
- ✓ *Lecture 19 : Landfill hydrology*, Massachusetts Institute of Technology (MIT) OpenCourseWare, 2004
- ✓ *Water balance*, Jae K. (Jim) Park

Avec : **P** = Pluie tombée sur le site de l'installation

Rext = Ruissellement de l'eau de pluie, de l'extérieur vers l'intérieur du site

Lr = Lixiviat réinjecté : casier géré en mode « bioréacteur »

ETR = Evapotranspiration réelle

RFU = Stockage de l'eau dans la couverture de surface

Rint = Ruissellement de l'intérieur du site vers l'extérieur

Lc = Lixiviat collecté

B = Collecte du biogaz

La = Liquides absorbés par les déchets

Ld = Liquides « expulsés » des déchets solides : expulsion des liquides provenant de la teneur en eau initiale des déchets, ou relargage des liquides absorbés par les déchets

EX = Lixiviat infiltré dans le substratum à travers le fond de la décharge

Kc = Perméabilité de la couverture

η = Efficacité du système de drainage et d'évacuation du lixiviat

D = Débordement de l'eau au sein des cunettes de récupération, et inefficacité des cunettes

La figure 2 (voir ci-dessous) représente un site de stockage de déchets, constitué de quatre casiers distincts mettant en évidence les situations rencontrées au cours de la gestion d'une ISDND.

La situation **a** présente un casier en cours d'exploitation, avec une collecte par gravité des lixiviats en fond, et une collecte des biogaz à l'avancement.

La situation **b** dénote un casier fermé, recouvert d'une couverture semi-perméable, et équipé d'une collecte par pompage des lixiviats présents en fond, et d'un réseau de collecte des biogaz.

La situation **c** expose un casier fermé recouvert d'une couverture imperméable végétalisée, et équipé d'une collecte par gravité des lixiviats en fond, et d'un réseau de collecte des biogaz

Enfin, la situation **d** montre un casier fermé, recouvert d'une couverture imperméable végétalisée, et équipé d'une collecte par pompage des lixiviats, d'un réseau de collecte des biogaz, et d'un réseau de réinjection de lixiviat pour un fonctionnement en mode « bioréacteur ».

La description des différents paramètres du bilan hydrique est réalisée ci-après.

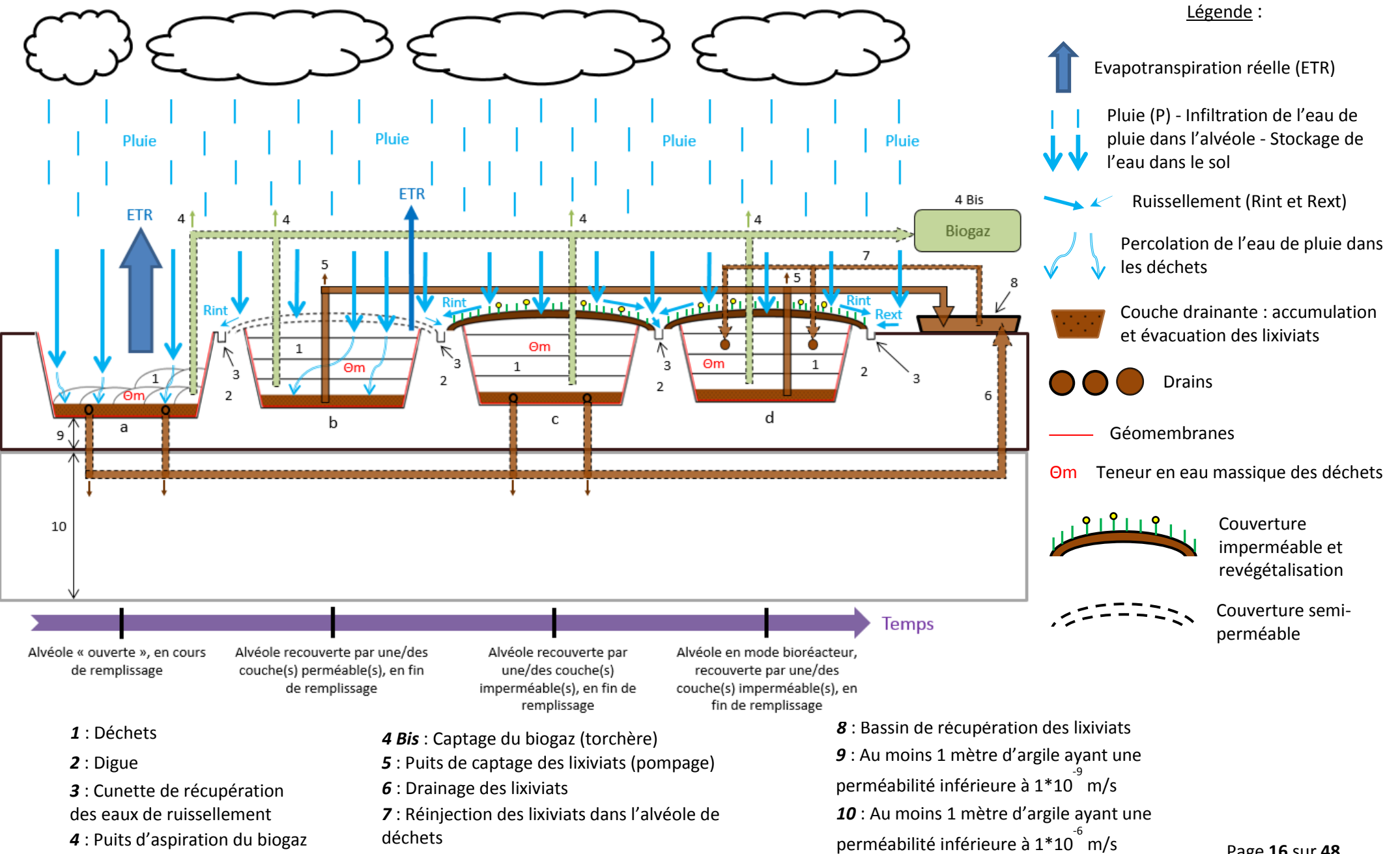


Figure 2 : Bilan hydrique d'une ISDND composée d'un casier de stockage ouvert (a), recouvert par une couverture semi-perméable (b), et de deux casiers recouverts par une couverture imperméable (c & d) (Source : Quentin CAILLEUX, 2015)

A) La pluie (P)

Le premier de ces paramètres est la pluie. La pluie tombée sur une alvéole est notée **P** dans le bilan hydrique (Villemin, 2014). Elle a une importance prépondérante sur la quantité totale de lixiviat produit dans l'alvéole de déchets (Villemin, 2014), lorsque cette dernière est en cours d'exploitation et/ou recouverte de couche(s) semi-perméable(s) (situations **a** et **b**). Dans ces deux cas, l'eau de pluie tombée sera en capacité de s'infiltrer à l'intérieur de l'alvéole et du massif de déchets, pour ensuite y percoler. Au contraire, lorsque l'alvéole est recouverte par une couverture imperméable (situations **c** et **d**), **P** ne pourra pas s'infiltrer dans l'alvéole. Dans ce dernier cas, la pluie s'avère être nulle, n'influençant en aucun cas le bilan hydrique du massif de déchets considéré. Le volume de pluie (m^3) pénétrant dans l'alvéole de déchets peut être obtenu en multipliant la hauteur de pluie (m) par la surface de cette alvéole (m^2) (Villemin, 2014).

La part de la pluie tombée **P** qui s'infiltré dans le massif de déchets est notée **Pi**. **Pi** est égale à la somme de **E** (écoulement rapide de l'eau pluviale dans les déchets) et **La** (liquides absorbés par les déchets).

Lorsque le casier est couvert en surface par une couverture semi-perméable, comme c'est le cas dans la situation **b**, l'eau de pluie tombée (**P**) sur le casier a plusieurs devenir. Elle est en mesure de s'infiltrer dans le massif de déchets (**Pi**), de ruisseler à la surface de la (des) couche(s) semi-perméable(s) (**Rint**), ou de constituer un stock d'eau dans la couverture de surface s'identifiant à la réserve utile en eau du sol* (**RU**). Enfin, une part non négligeable de **P** repart directement vers l'atmosphère par évaporation (**EV_{pluie}**). De ce fait, dans la situation **b**, il peut être écrit : **P = E + La + Rint + RU + EV_{pluie}**.

Dans le cas d'un casier en cours de remplissage, à savoir la situation **a**, une partie de la pluie tombée sur le casier s'infiltré dans le massif de déchets (**Pi**), le casier n'étant pas recouvert en surface pendant l'exploitation. Une autre partie de **P** repart directement vers l'atmosphère par évaporation (**EV_{pluie}**). La pluie tombée se présente donc sous la forme : **P = E + La + EV_{pluie}**.

Lors du recouvrement d'un casier rempli de déchets par une couverture imperméable et végétale (situations **c** et **d**), l'eau de pluie tombée (**P**) sur le casier peut constituer un stock d'eau dans la couverture de surface s'identifiant à la réserve en eau facilement utilisable** (**RFU**), peut ruisseler à la surface de la (des) couche(s) imperméable(s) (**Rint**), ou peut repartir directement vers l'atmosphère par évaporation (**EV_{pluie}**). De plus, une part de l'eau de pluie n'atteint pas le sol, puisque les gouttes peuvent être interceptées par le feuillage de la végétation (Beauchamp, 2006). Une partie de cette eau interceptée est directement évaporée à partir de la plante (Cosandey, 1998), pendant et après la pluie (Beauchamp, 2006). Cette quantité d'eau évaporée fait également partie du terme **EV_{pluie}**. Une autre partie de l'eau interceptée atteint le sol par égouttage de la végétation (Cosandey, 1998). Enfin, une troisième partie circule le long des branches et ruisselle sur les troncs avant d'atteindre le sol (Cosandey, 1998). **Cependant**, de par la présence d'une ou plusieurs couches imperméables au-dessus du massif de déchets, l'eau de pluie est arrêtée à la surface de la première couche imperméable, sans pouvoir rentrer au contact du moindre déchet ; la pluie **P** est donc considérée comme nulle, dans les situations **c** et **d**, puisqu'elle ne joue aucun rôle dans le bilan hydrique du massif de déchets.

De ce fait, dans les situations **c** et **d**, il est écrit : **P = 0**.

En conclusion,

Situation a : $P = E + La + EV_{pluie}$

Situation b : $P = E + La + Rint + RU + EV_{pluie}$

Situation c : $P = 0$

Situation d : $P = 0$

B) L'évapotranspiration réelle (ETR)

Un second paramètre régissant le bilan hydrique est l'évapotranspiration réelle. Elle est notée **ETR** dans la littérature, et se définit comme la perte d'eau de l'ensemble des surfaces d'une végétation, à savoir le sol et les plantes, par deux processus distincts : l'évaporation, qui est un processus physique (passage de l'état liquide à l'état vapeur) ; et la transpiration, qui est un processus biologique (contrôle du passage à travers l'épiderme des feuilles). La somme de l'évaporation des sols et de la transpiration du couvert végétal forme l'évapotranspiration réelle (Villemin, 2014).

Il est important de bien faire la distinction entre l'**ETR** et l'**ETP**, l'évapotranspiration potentielle. L'**ETP** est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu de référence (le gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance (Villemin, 2014).

L'**ETR** dépend notamment de la culture considérée, du stade phénologique* de cette culture, du contenu en eau du sol ou encore des conditions météorologiques.

* La phénologie est l'étude scientifique des variations (durée, époque) que les divers climats font subir à la floraison et à la feuillaison des végétaux.

L'**ETP** ne dépend que des facteurs météorologiques (température, vent, hygrométrie, rayonnement solaire...), et est indépendant de la nature de la végétation et de la pluviométrie (Villemin, 2014).

L'évaporation des sols dépend du climat (rayonnement solaire, vent, ...) (Villemin, 2014). La transpiration se réalise au travers des stomates des feuilles des plantes, qui s'ouvrent et se ferment en fonction des besoins en eau de la plante.

Dans le cas d'un massif de déchets, l'évapotranspiration réelle doit être considérée comme la quantité d'eau s'échappant directement des déchets vers l'atmosphère par évaporation **ETR_{déchets}**, additionnée de la quantité d'eau s'échappant directement de la couverture vers l'atmosphère par évaporation ou/et transpiration **ETR_{couverture}** (dans le cas d'une alvéole recouverte).

Dans la situation **a**, seule l'**ETR_{déchets}** est considérée, étant en exploitation (donc en absence de couverture) (Bellenfant, 2001).

Dans la situation **b**, seule l'**ETR_{couverture}** est considérée, compte tenu que l'eau évaporée des déchets passe d'abord à travers la couverture semi-perméable du casier, avant de rejoindre l'atmosphère.

Dans les situations **c** et **d**, ni le terme **ETR_{déchets}** ni le terme **ETR_{couverture}** ne sont pris en compte dans le bilan hydrique. En effet, les déchets étant complètement isolés de l'atmosphère - se trouvant sous une ou plusieurs couche(s) imperméable(s) -, aucune évaporation de l'eau contenue dans les déchets n'est possible au sortir du massif. Toutefois, en faisant l'hypothèse que l'eau liquide contenue dans les déchets passe à l'état gazeux (ce qui reste envisageable), ce gaz serait collecté par les puits d'aspiration du biogaz.

En réalité, lorsqu'une couverture imperméable est présente (situations **c** et **d**) au-dessus d'un massif de déchets, l'eau de pluie ne pouvant pénétrer le massif de déchets, les différentes « voies » possibles de l'eau de pluie – suite à sa tombée -, à savoir **RFU**, **Rint**, **EV_{pluie}**, ne sont pas prises en compte dans le bilan hydrique (fait pour le massif de déchets). La **RFU** et **Rint** seront donc nuls, dans le bilan hydrique des situations **c** et **d**.

Aujourd'hui il est connu que sur un bassin versant, les 2/3 des précipitations sont reprises directement par évapotranspiration. Nous pouvons nous demander si tel est le cas, dans la situation où un casier de stockage est recouvert par une « fine » couverture semi-perméable (0,5 m d'épaisseur).

NB : La température régnant dans l'atmosphère au-dessus de l'ISDND est un paramètre influençant l'évapotranspiration réelle (Villemin, 2014).

En conclusion,

Situation a : $ETR = ETR_{\text{déchét}}$

Situation b : $ETR = ETR_{\text{couverture}}$

Situation c : $ETR = 0$

Situation d : $ETR = 0$

C) Le ruissellement (**Rext**, **Rint**)

Le ruissellement joue également un rôle important (Bellenfant, 2001), dans les entrées et les sorties du bilan hydrique. Deux types de ruissellement sont effectivement distingués.

Il existe d'abord un ruissellement de l'eau de pluie, depuis l'extérieur des alvéoles – sur les terrains situés au bord des casiers -, vers l'intérieur des alvéoles (Villemin, 2014). Au regard de la formule du bilan hydrique figurant dans le rapport du Cerema datant de 2014, ce ruissellement figurait sous la légende **Rint**. Néanmoins, au regard de la différente bibliographie trouvée, nous noterons ce ruissellement **Rext** dans la suite du rapport.

En réalité, dans une ISD classique, des cunettes (ou fossés) de récupération des eaux pluviales sont établies de chaque côté des alvéoles, de façon à ce que les eaux de ruissellement précédemment définies ne pénètrent aucune alvéole de déchet (Villemin, 2014). **Rext** est donc considéré comme nul dans le bilan hydrique, quel que soit la situation (situations **a**, **b**, **c** et **d**). Ces eaux en provenance de **Rext** ne sont à aucun moment en contact avec les déchets, et peuvent ainsi être acheminées vers un bassin de stockage par l'intermédiaire des fossés précédemment décrits. Là, elles sont traitées par décantation puis rejetées dans le milieu naturel en cas de conformité à la réglementation. En cas d'éventuelle non-conformité, les eaux sont dirigées vers une station d'épuration pour y être traitées.

En outre, il existe un ruissellement de l'eau de pluie - tombée au préalable sur le dôme formé par la couverture de l'alvéole - vers la périphérie de l'alvéole (Villemin, 2014). Au regard de la formule du bilan hydrique figurant dans le rapport du Cerema (2014), ce ruissellement figurait sous la légende **Rext**. Mais, au vue de la bibliographie, nous noterons ce ruissellement **Rint** dans la suite du rapport.

En première approximation, les eaux provenant de **Rint** peuvent s'écouler depuis un casier 1, vers un casier 2 localisé à la périphérie du casier 1. Donc théoriquement, le terme **Rint** devrait jouer un rôle au niveau des casiers ouverts ou recouverts d'une couverture semi-perméable. Mais, les fossés de collecte des eaux de ruissellement en présence sur le site, récupèrent également les eaux de **Rint**, en plus des eaux de **Rext**, les empêchant ainsi de pénétrer dans les alvéoles périphériques du casier considéré.

Rint est uniquement constaté lorsque le casier est recouvert de couche(s) semi-perméable(s) ou imperméable(s) (Villemin, 2014), comme c'est le cas dans les situations **b**, **c** et **d**. Cependant, il n'est pris en compte que dans le cas où une couverture semi-perméable recouvre les déchets (situation **b**), car dans ce cas, l'eau de pluie est en mesure de s'infiltrer à l'intérieur du massif de déchets ; il faut prendre en compte toutes les différentes « voies » possibles de l'eau de pluie suite à sa tombée (**Pi**, **Rint**, **RU**, **EV_{pluie}**) (cf. III A)), dans le bilan hydrique associé à la situation **b**.

Rint est considéré comme nul lorsque le casier est en cours de remplissage (situation **a**), puisque l'alvéole de déchets n'est pas recouverte.

Dans les situations **c** et **d**, marquées par la présence d'une couverture imperméable, **Rint** est également considéré comme nul car même si il existe, il ne pénètre pas dans les déchets de par la présence de la d'une couverture imperméable (ex. géomembrane étanche) (cf. II A)).

Un ruissellement important est généralement recherché dans la limite d'apparition des problèmes d'érosion, et pour la prévention des arrivées d'eau de surface extérieures à l'installation de stockage (Bellenfant, 2001).

Le ruissellement de l'eau pluviale est lié à la capacité du sol à absorber l'eau présente en surface – ou « infiltrabilité » du sol - et dépend de plusieurs facteurs (Bellenfant, 2001).

Le ruissellement dépend d'abord de l'intensité et de la distribution de la pluie (Department of the Environment, 1991). Il apparaît lorsque la capacité d'infiltration du sol est dépassée, à savoir lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau (CORPEN, 2007). Ce ruissellement par refus d'infiltration est appelé « ruissellement hortonien » (CORPEN, 2007). La capacité maximale d'infiltration du sol à absorber l'eau est supposée décroissante dans le temps. Le ruissellement se produit lorsque la capacité d'infiltration devient inférieure à l'intensité des précipitations. Ainsi, plus l'intensité de la pluie augmente, plus le ruissellement augmente (Bellenfant, 2001), dans le cas où le ruissellement se produit.

Le ruissellement est ensuite dépendant de l'état du sol en surface (Bellenfant, 2001). Au cours d'une averse, des croûtes de battance se forment sous l'action de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qui fragmentent les agrégats à la surface du sol (J. Peigne). Cette apparition de croûtes favorise le ruissellement, et la présence de végétation réduit leur impact, en interceptant les gouttes de pluie (Bellenfant, 2001).

La nature de la couverture joue également un rôle important sur la capacité de l'eau à ruisseler (Bellenfant, 2001). Plus elle est argileuse, plus sa perméabilité est faible, plus son infiltrabilité est faible (Bellenfant, 2001), et plus le ruissellement est important. Cependant, dans des climats très secs, l'apparition de fentes de retraits dans la structure des argiles favorise l'infiltration de l'eau (Bellenfant, 2001). De ce fait, le ruissellement est réduit. De plus, plus la pente de la couverture augmente, et plus le coefficient de ruissellement augmente (Bellenfant, 2001).

L'état d'humidification du sol est également un paramètre d'influence majeure sur le ruissellement de l'eau de pluie puisque plus le sol est humide avant une averse, et moins son infiltrabilité est élevée (Bellenfant, 2001).

Enfin, l'écoulement sur surfaces saturées se produit lorsque la capacité du sol à stocker l'eau est épuisée et lorsque la capacité à transmettre latéralement le flux d'eau est dépassée. L'eau s'écoulera alors en surface, ne pouvant plus s'infiltrer. Les conditions saturées à la surface du sol se développent particulièrement dans le cas d'une remontée de nappe (CORPEN, 2007). La présence d'un horizon peu perméable à faible profondeur (CORPEN, 2007) combinée à de fortes précipitations peuvent également être à l'origine de ce phénomène.

En conclusion,

Situation a : $R_{ext} = 0$; $R_{int} = 0$

Situation b : $R_{ext} = 0$; $R_{int} \neq 0$

Situation c : $R_{ext} = 0$; $R_{int} = 0$

Situation d : $R_{ext} = 0$; $R_{int} = 0$

D) L'absorption (L_a) et le relargage (L_d) des liquides contenus dans les déchets

Il est admis que les déchets contiennent une certaine quantité d'eau lors de leur mise en place dans les casiers de remplissage (Sauter *et al.*, 1986 ; Bellenfant, 2001 ; InVS, 2005 ; AMORCE, 2007 ; Villemin, 2014). Cette quantité d'eau peut être assimilée à la teneur en eau massique des déchets entrants, notée θ_m . Elle est propre au déchet (InVS, 2005) et dépend notamment de sa composition (Bellenfant, 2001). De plus, les déchets arrivants sur les ISDND peuvent être saturés en eau, car ils peuvent avoir reçu des eaux pluviales pendant leur stockage sur leur lieu de production, et lors de leur transport.

Le comportement hydrique du déchet, à savoir l'évolution de sa teneur en eau, peut être représenté par un système à « double porosité », lors de son stockage (*cf.* Figure 3) (Guyonnet *et al.*, 1996 ; Villemin, 2014). En effet, il existe une circulation rapide d'une partie de P_i , au travers de chemins

préférentiels d'écoulement, sans être absorbée par les déchets (Guyonnet *et al.*, 1996 ; Villemin, 2014). Cet écoulement apparaît sous la légende **E** dans la formule générale du bilan hydrique. Un emmagasinement de l'autre partie de **Pi**, au sein du déchet, suivi d'un relargage de cette eau selon une certaine vitesse, est également constaté (Guyonnet *et al.*, 1996 ; Villemin, 2014). La quantité de liquide emmagasiné au sein des déchets est notée **La**. Elle dépend de la capacité d'absorption des déchets, qui dépend elle-même de leur teneur en eau initiale (θ_m) et maximale¹ (Bellenfant, 2001).

Dans les situations **c** et **d**, le terme **La** est nul, en raison de l'incapacité de la pluie à s'infiltrer à travers la couverture de surface imperméable, et de l'incapacité de l'eau de **Rext**, à arriver jusqu'aux alvéoles (*cf.* III) C) ; les déchets ne pourront absorber aucun liquide(s).

Dans les situations **a** et **b**, le terme **La** existe, compte tenu de la possibilité d'infiltration de l'eau de pluie jusqu'aux déchets.

L'importance de l'emmagasinement de l'eau dans les déchets est fortement liée à l'épaisseur du massif de déchets (Guyonnet *et al.*, 1996). Plus l'épaisseur de déchets accumulés dans un casier de remplissage est grande, et plus l'eau de pluie infiltrée (**Pi**) a de chances de rencontrer un « site d'absorption » (Guyonnet *et al.*, 1996).

Le temps dit de demi-percolation, noté $T_{0,5}$, est le temps nécessaire pour que le stock d'eau emmagasiné dans le déchet se vide de moitié. Il est donc lié à la vitesse de relargage de l'eau absorbée par les déchets (Guyonnet *et al.*, 1996 ; Villemin, 2014). Le temps dit de demi-vidange, noté T_{HG} , est le temps nécessaire pour que la quantité d'eau qui n'est pas absorbée par les déchets se vide de moitié. Ce paramètre rend compte de la rapidité de certains écoulements, sans absorption par les déchets (Villemin, 2014).

Pendant le remplissage des casiers (situation **a**), un compacteur augmente le tassement des déchets présents sous ses roues. De ce fait, la part « d'eau libre »² contenue dans les déchets, due à θ_m et/ou à l'absorption d'eau par les déchets, peut se retrouver expulsée de ces derniers, en quantité plus ou moins variables. Ces quantités dépendent de la teneur en eau critique³ des déchets, que l'on notera θ_c (Bellenfant, 2001). En-dessous de la capacité au champ, les déchets ne libèrent pas d'eau (Belle, 2008 ; Villemin, 2014). Au-delà de cette teneur en eau, les déchets peuvent relarguer de l'eau et ainsi générer du lixiviat (Bellenfant, 2001 ; Belle, 2008 ; Villemin, 2014). La quantité totale de liquides relarguée par les déchets est notée **Ld**. Egalement, la biodégradation des déchets (situations **a**, **b**, **c** et **d**) peut entraîner une modification de la matrice solide et libérer une quantité de lixiviat que l'on appellera également **Ld**.

¹ Lorsque la teneur en eau maximale est atteinte, tout l'espace poreux est saturé en eau (Bellenfant, 2001).

² L'eau libre ou « l'eau gravitaire » est la fraction d'eau des déchets soumise à la seule force de gravité. Elle circule dans les vides (pores) et est mobilisable. Au contraire, « l'eau liée » ou « l'eau de rétention » est la fraction de l'eau maintenue dans les vides mais surtout à la surface des grains par des forces supérieures à celle de la gravité. Elle n'est donc pas mobilisable sans action extérieure comme la compaction par exemple.

³ La teneur en eau critique d'un déchet, également appelé « capacité au champ », peut être définie comme la capacité de rétention maximale en eau de celui-ci. Prenons l'exemple d'un déchet sec. Lorsque de l'eau lui est injectée, celui-ci se gorge d'eau : le déchet s'humidifie alors. Lorsqu'à un moment donné, une goutte d'eau injectée dans le déchet traverse ce dernier de bout en bout et en ressort à un endroit. La teneur en eau critique est alors atteinte, ce qui n'est pas encore l'état de saturation. La teneur en eau critique est fonction du type de déchet.

En conclusion, il n'est possible de quantifier directement les quantités de lixiviat absorbées (**La**) ou relarguées (**Ld**) par les déchets. Seul le bilan de ces deux termes peut être calculé à partir du résultat du bilan hydrique.

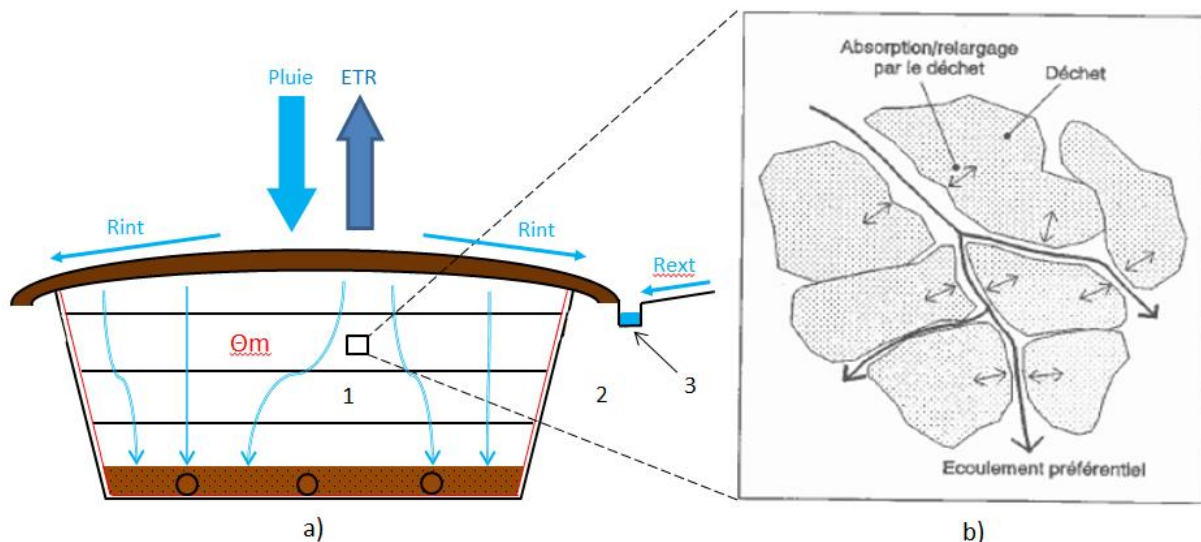


Figure 3: Bilan hydrique d'un casier de remplissage d'une ISDND (a), et représentation conceptuelle du déchet par un système à « double porosité » (b)
 (Sources : a) Quentin CAILLEUX, 2015 ; b) Guyonnet *et al.*, 1996)

E) La réserve en eau des couvertures de surface (RFU)

Dans le cas d'un recouvrement de casier par une couverture semi-perméable (situation **b**), une fois l' EV_{pluie} satisfaite, l'évolution temporelle d'une averse rend d'abord compte d'une infiltration de l'eau de pluie tombée dans la (les) couche(s) semi-perméable(s). Une fois la capacité de rétention de cette (ces) couche(s) atteinte - à savoir la réserve utile¹ (**RU**) -, l'eau de pluie continuant à tomber sur le dôme (formé par la couverture de surface) est apte à s'écouler à travers la (les) couche(s) de surface, pour s'infiltrer puis percoler dans le massif de déchets. La pluie infiltrée, puisqu'étant en excès pour satisfaire à la **RU**, fait partie de la « pluie efficace » (**Pe**) ou de l'excédent⁵. Une autre partie de la pluie efficace peut ruisseler à la surface de la couverture semi-perméable. Cette démarche suit le « bilan simplifié selon Thornthwaite », qui est repris dans le rapport d'Hugues VILLEMEN (2014), en annexe.

Dans le cas d'un recouvrement de casier par une couverture imperméable surmontée d'une couverture végétalisée (situations **c** et **d**), une fois l' EV_{pluie} satisfaite, l'évolution temporelle d'une averse rend compte d'un stockage de l'eau de pluie tombée dans la couche de terre végétale, jusqu'à la première couche imperméable. Aucune infiltration dans le massif de déchets n'est normalement possible, en raison de la présence de la couverture imperméable, qui « arrête » l'eau à sa surface. Une fois le stock maximum de la **RFU** atteint, les plantes ayant de quoi satisfaire leurs besoins en eau, la pluie continuant à tomber sur le dôme ruisselle abondamment sur celui-ci.

Dans la situation **a**, aucune couverture de surface n'est présente ; il n'existe donc pas de réserve en eau : **RFU ou RU = 0**.

Dans la situation **b**, l'eau de pluie étant capable de s'infiltrer dans le massif de déchets en traversant la couverture de surface, la **RU** doit apparaître dans la formule du bilan hydrique (*cf.* III) C)).

Finalement, dans les situations **c** et **d**, l'eau de pluie étant incapable de s'infiltrer dans le massif de déchets, la **RFU** est nulle et n'apparaît en aucun cas dans la formule du bilan hydrique (*cf.* III) B)).

En conclusion,

Situation a : RFU ou RU = 0

Situation b : RFU = RU

Situation c : RFU = 0

Situation d : RFU = 0

* En l'absence de plantes, la **RFU** est égale à la **RU** (Villemin, 2014).

³ La réserve utile (**RU**) en eau d'un sol correspond à la quantité d'eau que le sol est susceptible d'absorber ; autrement dit l'eau qui est utilisable par tous les végétaux en absence de précipitation(s). La **RU** est la quantité d'eau comprise entre l'humidité à la capacité au champ² et l'humidité au point de flétrissement⁴.

⁴ L'humidité au point de flétrissement correspond à la quantité d'eau contenue dans un sol pour laquelle l'eau est retenue avec une intensité supérieure aux forces de succion (d'aspiration) des racines. Elle peut être assimilée à la quantité d'eau liée. Si le sol atteint son point de flétrissement, la plante ne peut absorber l'eau du sol, ce qui amène au flétrissement et donc à la mort des plantes.

⁵ La « pluie efficace » ou excédent est la fraction d'eau de la pluie tombée génératrice d'écoulement, immédiat ou différé, superficiel ou souterrain. Elle concerne donc à la fois le ruissellement et l'infiltration. La pluie efficace est égale au résultat du calcul : $P - ETR$ (Beauchamp, 2006).

⁶ Par définition, la réserve en eau facilement utilisable par les plantes ou **RFU** correspond à la quantité d'eau du sol en dessous de laquelle une plante flétrit, c'est-à-dire la quantité d'eau en-dessous du point de flétrissement⁵. Les doses d'irrigation sont calculées à partir de la **RFU** puisque l'irrigation s'effectue dès lors que celle-ci est épuisée.

F) Le lixiviat collecté (Lc)

Dans le cadre de la gestion des ISDND, le contexte réglementaire est clair et précise que la hauteur de lixiviat en fond d'alvéole ne doit pas dépasser 30 cm (article 18 de l'arrêté du 09/09/1997 ; Bellenfant, 2001), quel que soit l'ISDND considéré, en raison de la charge hydraulique H , exprimée en mètres. En effet, la charge hydraulique en un point de mesure se définit comme la somme de la charge de gravité (en mètres) et de la charge hydrostatique ou de pression (en mètres) en ce point. Cela équivaut à la somme de la cote d'altitude du point considéré et de la pression exercée par la colonne d'eau surmontant ce point, lorsque le milieu est saturé en eau. Ainsi, au-delà d'une hauteur de lixiviat de 30 cm, la pression exercée sur la base de l'ouvrage est importante et pourrait entraîner une dégradation accélérée du dispositif d'étanchéité et induire une infiltration du lixiviat dans les nappes d'eaux souterraines, voire un enfoncement du sol en profondeur (subsidence). Dans ce dernier cas, une remontée de la nappe en surface peut avoir lieu. Dans les deux cas, le risque de contamination du sol et des nappes d'eaux souterraines est possible. Pour information, une colonne d'eau de 10 m de hauteur exerce une pression équivalente à 1 Bar soit 100 000 Pascals, à sa base.

Pour empêcher que la hauteur de lixiviat en fond d'alvéole ne dépasse 30 cm, le lixiviat est généralement collecté de manière continue, de deux façons : par pompage ou par gravité, avant d'être évacué vers un bassin de récupération (InVS, 2005). Afin de permettre l'écoulement naturel (le drainage) du lixiviat le plus au fond possible de l'alvéole, des drains recouverts d'une couche de graviers sont placés sur le fond de l'alvéole, juste au-dessus de la géomembrane. Cet écoulement est favorisé par la forme des casiers de stockage.

Par pompage, le lixiviat est collecté via des « puits de collecte » situés en point bas de l'ouvrage, puis déversé dans le bassin de récupération du lixiviat. Le tube de la pompe est immergé dans les liquides résiduels (Wahéo *et al.*).

Par gravité, un réseau de drains en matériaux compatibles avec la nature chimique du lixiviat permet de collecter ce dernier ayant percolé dans le massif de déchets. Il est ensuite évacué vers le bassin de récupération du lixiviat (Wahéo *et al.*).

Tout le lixiviat collecté graduellement est noté **Lc** dans le bilan hydrique et se mesure avec un débitmètre.

G) Le lixiviat réinjecté (Lr)

Pour les ISDND gérées en mode bioréacteur⁷, une partie du lixiviat présent dans le bassin de récupération est amenée à être réinjectée en priorité dans les alvéoles à couverture imperméable ou

semi-perméable – celles-ci étant peu ou pas alimentées en eau de pluie -, à différents temps. L'objectif principal de ce mode de gestion est d'humidifier les déchets en manque d'eau et de créer les conditions favorables à leur biodégradation (ADEME, 2007). La réinjection de lixiviat permet d'apporter des nutriments aux bactéries qui opèrent dans le massif de déchets pour accélérer le processus de biodégradation (Bellenfant, 2001). La quantité de lixiviat réinjectée progressivement dans les déchets au cours du temps est notée **Lr**. Pour que les déchets se dégradent normalement, une température optimale ainsi qu'une quantité d'eau suffisante sont indispensables.

L'autre partie du lixiviat peut être prétraitée sur site – dans ce cas, l'énergie du biogaz est utilisée pour chauffer les lixiviats et ainsi diminuer leur volume -, ou dirigée vers une station d'épuration pour traitement. Après traitement et contrôle de leur qualité, les eaux traitées sont rejetées dans le milieu naturel (Moulin *et al.*, 2008 ; InVS, 2005 ; AMORCE, 2007).

Dans le cas d'un casier géré en mode bioréacteur (situation **d**), il est nécessaire de connaître la teneur en eau des déchets, à tout instant *t*, afin d'injecter du lixiviat dans le massif, au bon moment, uniquement si besoin est. Si le déchet manque de liquide pour se biodégrader, il faudra réinjecter du lixiviat. Mais au contraire, si le déchet contient une teneur importante en liquide, la réinjection de lixiviat n'aura pas lieu.

La teneur en eau des déchets, à un instant *t*, dépend de leur teneur en eau initiale mais également des apports d'eau par la pluie.

⁷ La gestion d'une alvéole de déchets en mode bioréacteur trouve son importance en une maîtrise et une accélération des processus de biodégradation des déchets dans une enceinte confinée par le contrôle, par exemple, de l'humidité au sein du massif de déchets (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2010).

H) Le biogaz collecté (B)

Lors du remplissage des casiers, et durant le confinement post-exploitation des déchets, du gaz est produit par la fermentation des déchets stockés, notamment la dégradation de la matière organique naturelle contenue dans ces déchets (AMORCE, 2007 ; Wahéo *et al.*). Il s'agit du biogaz. Il peut contenir de l'eau d'où son intervention dans la formule générale du bilan hydrique. Des questions concernant sa possible saturation en eau se posent actuellement. Ainsi, d'après le rapport du Department of the Environment datant de 1991, repris par Gaël Bellenfant en 2001, ou encore le dossier de l'AMORCE datant de 2007, le biogaz produit par un casier est saturé en eau. Toutefois, ce genre de propos n'est pas complètement confirmé dans la bibliographie récente.

Le biogaz comprend essentiellement du méthane (CH₄) et du dioxyde de carbone (CO₂) (AMORCE, 2007 ; Wahéo *et al.*), deux gaz à effet de serre majeurs. De ce fait, pour pallier à toute nuisance envers l'environnement, un réseau de collecte du biogaz, via des puits d'aspiration, est mis en place au cœur des alvéoles de déchets (AMORCE, 2007 ; InVS, 2005), qu'elles soient couvertes ou non. Une fois le biogaz capté, celui-ci est traité par exemple par combustion grâce à une torchère (InVS, 2005). Dans le cas d'une quantité importante de biogaz, ce dernier peut être valorisé sous forme d'énergie (AMORCE, 2007 ; Wahéo *et al.*). Ainsi, la combustion produit de la chaleur, et l'énergie thermique peut être transformée en électricité (AMORCE, 2007) ou en vapeur.

La quantité de biogaz collecté par les différents puits d'aspiration apparaît sous la légende **B** dans la formule du bilan hydrique.

NB : Un manque d'informations apparaît clairement dans la littérature pour évaluer la quantité d'eau contenue dans le biogaz, et seules les phases solides (déchets) et liquides sont prises en compte généralement dans le calcul du bilan hydrique des ISDND.

I) Les défauts de l'ouvrage (EX, Kc, η, D)

Même si les réglementations sont strictement respectées par l'exploitant, des défauts peuvent être présents dès la mise en place de l'installation de stockage, ou bien apparaître avec le temps dans l'ouvrage de stockage des déchets.

Ainsi, si la géomembrane en PEHD n'est pas parfaitement conçue et manque de résistance ou/et si elle est percée en un endroit par le poids des déchets, du lixiviat sera en mesure de s'infiltrer au travers de la barrière passive (dans le substratum du fond de la décharge, à savoir l'argile). Cette possible infiltration de lixiviat, notée **EX** dans le bilan hydrique, devrait être prise en compte lors de son calcul. De plus, la perméabilité de la couverture (**Kc**) peut être faussée (situations **b**, **c** et **d**), si celle-ci n'est pas testée au préalable en laboratoire, ou si la couverture n'est pas installée convenablement. Ce qui affecterait directement et notamment le taux de ruissellement et d'infiltration de l'eau de pluie. Au fil du temps et des averses, on peut facilement imaginer que la perméabilité de la couverture de surface peut varier, de par un réarrangement des structures. Par exemple, la formation de croûtes de battance peut être à l'origine de ce genre de phénomène.

L'efficacité et donc le rendement du système de drainage et d'évacuation du biogaz et du lixiviat (Bellenfant, 2001), notée **η**, peut varier d'une alvéole à l'autre, ou simplement d'un site à un autre. Le rendement peut en effet dépendre du type de matériel et/ou du matériau utilisé, de la longueur des drains, ou encore de la position de ces derniers. Par conséquent, le bilan hydrique respectif de chacun des deux sites (ou alvéoles) en question ne serait pas identique, quand bien même les autres paramètres du bilan hydrique étaient les mêmes dans les deux cas.

Finalement, si les fossés censés capter les eaux provenant de **Rext** sont inefficaces, d'éventuels apports d'eau par ruissellement de l'extérieur vers l'intérieur du site peuvent survenir (Moulin *et al.*, 2008). Un débordement des cunettes de récupération des eaux de ruissellement peut également se produire (Moulin *et al.*, 2008), affectant vraisemblablement les bassins de récupération de lixiviats et le terme **Lc** du bilan hydrique. Ce terme est noté **D** dans la formule du bilan hydrique.

J) Conclusions

De manière générale, la formule du bilan hydrique est la suivante et se décline selon les différentes situations :

$$P + R_{ext} + L_r = ETR + RFU + R_{int} + L_c + B + L_a - L_d \text{ +/- défauts de l'ouvrage : EX, Kc, } \eta, D$$

Situation a :

Les équations déduites de A) à E) indiquent que : **Rext = 0 ; Rint = 0 ; ETR = ETR_{déchet} ; RFU ou RU = 0**

Dans la situation **a**, il n'y a pas de réinjection de lixiviat, d'où **Lr = 0**.

De plus, le casier ne possédant pas de couverture, le terme **Kc** ne peut exister, d'où **Kc = 0**.

L'équation finale du bilan hydrique, dans la situation **a**, est :

$$P = ETR_{déchet} + L_c + B + L_a - L_d \text{ +/- (EX, } \eta, D).$$

Situation b :

Les équations déduites de A) à E) indiquent que : **Rext = 0 ; Rint ≠ 0 ; ETR = ETR_{couverture} ; RFU = RU**

Dans la situation **b**, il n'y a pas de réinjection de lixiviat, d'où **Lr = 0**.

L'équation finale du bilan hydrique, dans la situation **b**, est :

$$P = ETR_{couverture} + RU + R_{int} + L_c + B + L_a - L_d \text{ +/- (EX, Kc, } \eta, D)$$

Situation c :

Les équations déduites de A) à E) indiquent que : **P = 0 ; Rext = 0 ; Rint = 0 ; ETR = 0 ; RFU = 0**

Dans la situation **c**, il n'y a pas de réinjection de lixiviat, d'où **Lr = 0**.

De plus, le terme **La** n'existe pas dans la situation **c**, d'où **La = 0**.

L'équation finale du bilan hydrique, dans la situation **c**, est :

$$0 = Lc + B - Ld +/- (EX, Kc, \eta, D)$$

Situation d :

Les équations déduites de A) à E) indiquent que : **P = 0 ; Rext = 0 ; Rint = 0 ; ETR = 0 ; RFU = 0**

Dans la situation **d**, il y a réinjection de lixiviat, d'où **Lr ≠ 0**.

De plus, le terme **La** n'existe pas dans la situation **d**, d'où **La = 0**.

L'équation finale du bilan hydrique, dans la situation **d**, est :

$$Lr = Lc + B - Ld +/- (EX, Kc, \eta, D)$$

Dans les situations **c** et **d**, l'addition de la quantité de lixiviat collecté (**Lc**) et de biogaz collecté (**B**) à l'intérieur des casiers correspond à la quantité totale de liquide expulsé des déchets (**Ld**).

IV) Quantification des paramètres du bilan hydrique

L'objectif, dans la suite du travail, est de quantifier les paramètres présents dans les différentes équations du bilan hydrique, en cherchant des méthodes de mesure pour chacun de ces paramètres, ou/et des moyens bibliographiques pour les évaluer.

A) La pluie (P)

a) Méthodes de mesures

Les précipitations (solides ou liquides) peuvent être mesurées directement sur le site de stockage, grâce à l'implantation d'un **pluviomètre** (Laborde, 2000). Le pluviomètre indique la pluie globale précipitée dans l'intervalle de temps séparant deux relevés. Le pluviomètre est généralement relevé une fois par jour. La hauteur de pluie lue le jour *j* est attribuée au jour *j-1* et constitue sa « pluie journalière ».

Si la station pluviométrique est éloignée ou difficile d'accès, il est recommandé de recourir au pluviomètre totalisateur, qui reçoit les précipitations sur une longue période, et dont la lecture se fait par mesure de la hauteur d'eau recueillie ou par pesée. En cas de présence de neige ou de grêle, une fusion est réalisée avant la mesure.

Le pluviomètre est un appareil qui comporte un impluvium défini par une surface réceptrice limitée par une collerette cylindrique ; l'eau traversant cette surface est dirigée par un entonnoir vers un seau récepteur (Laborde, 2000). Si durant un intervalle de temps Δt , on a récupéré un volume *V* à travers la surface réceptrice *S*, la hauteur de pluie $H_{\Delta t}$ tombée est : (Laborde, 2000)

$$H_{\Delta t} = V / S$$

Dans la pratique, chaque pluviomètre est adjoint à une éprouvette graduée (fonction de la surface réceptrice *S*) qui permet la lecture directe de $H_{\Delta t}$ en $1/10^{\text{ème}}$ de mm (Laborde, 2000).

Le site du pluviomètre doit être représentatif, et doit être caractérisé par l'absence d'obstacles à proximité.

La pluie tombée sur le site peut également être mesurée par un **pluviographe**. Ces appareils sont destinés à l'enregistrement de la hauteur de pluie cumulée en fonction du temps (Laborde, 2000). Le pluviographe se distingue du pluviomètre par le fait que la précipitation, au lieu de s'écouler directement dans un récipient collecteur, passent d'abord dans un dispositif particulier, tel qu'un réservoir à flotteur ou des augets, qui permet l'enregistrement automatique de la hauteur instantanée de précipitation. L'enregistrement, permanent et continu, permet de déterminer la hauteur de précipitation, ainsi que sa répartition dans le temps donc son intensité. Les pluviographes fournissent des diagrammes de hauteurs de précipitations cumulées en fonction du temps.

Il existe deux principaux types de pluviographes : le pluviographe à augets basculeurs et le pluviographe à siphon (Laborde, 2000).

Pour le pluviographe à siphon, l'accumulation de la pluie dans un réservoir cylindrique est enregistrée par l'élévation d'un flotteur. Lorsque le cylindre est plein, un siphon s'amorce et le vide rapidement. Les mouvements du flotteur sont enregistrés par un tambour rotatif à vitesse constante, entouré d'un papier, et déterminent le tracé du pluviogramme.

Le pluviographe à augets basculeurs comporte, en dessous de son entonnoir de collecte de l'eau, une pièce pivotante dont les deux compartiments peuvent recevoir l'eau tour à tour (augets basculeurs). Quand un poids d'eau déterminé s'est accumulé dans un des compartiments, la bascule change de position : le premier auget se vide et le deuxième commence à se remplir. Les basculements sont comptés soit mécaniquement avec enregistrement sur papier enroulé autour d'un tambour rotatif, soit électriquement par comptage d'impulsions, par exemple par le système MADD. Ce dernier est un appareil permettant l'acquisition d'évènements en temps réel.

Les pluviographes à augets basculeurs sont actuellement les plus précis et les plus utilisés en Europe.

Les normes OMM (1996) préconisent que la surface réceptrice des pluviomètres et des pluviographes soit horizontale et située à 1,50 m au-dessus du sol, pour une mesure correcte de la pluie. Les effets du vent créent, en effet, un déficit en eau, lorsque le pluviomètre est en position élevée. Cette hauteur de 1,50 m permet d'éviter les rejaillissements, et de placer facilement l'appareil.

Enfin, l'utilisation d'un **nivomètre** est possible, lorsqu'il neige en période hivernale. Un nivomètre est un appareil destiné à mesurer la quantité (ou hauteur) de neige tombée, mais aussi son état (Laborde, 2000).

Des trois appareils décrits ci-dessus, le pluviomètre paraît être le plus complet - mesurant à la fois les précipitations solides et liquides -, et le plus simple à prendre en main. D'autant plus que dans notre cas, le tracé d'un diagramme des précipitations ne nous est d'aucune utilité.

b) Données bibliographiques

Autrement que par des mesures, l'achat de données de précipitations à Météo France peut être envisagé par les exploitants d'ISDND, afin de quantifier le paramètre pluie du bilan hydrique.

c) Conclusion

Aujourd'hui, il semblerait que la plupart des exploitants d'installations de stockage de déchets achètent des données de précipitations à Météo France. Selon moi, le meilleur moyen de quantifier précisément le paramètre pluie est de mettre en place un pluviomètre sur la totalité des sites de stockage. Cela paraît réalisable, étant donné le faible coût de l'appareil (de 2 à 100 € pour la plupart). De plus, les données achetées à Météo France ne s'avère pas forcément être la meilleure solution, compte tenu de l'emplacement des ISDND par rapport à la localisation géographique des données Météo France. Ces données, récupérées au plus près du lieu où se situe une ISD, sont sûrement obtenues au mieux à plusieurs kilomètres de l'installation. En France, cette distance n'est pas négligeable, en raison de la grande variation des précipitations, d'un endroit à un autre, et selon les climats et les saisons.

La mesure sur site paraît être la solution la plus adaptée à une quantification précise du paramètre pluie.

B) L'évapotranspiration réelle (ETR)

a) Méthodes de mesure

Afin de quantifier l'évapotranspiration au niveau des déchets ($ETR_{\text{déchets}}$) et de la couverture végétale ($ETR_{\text{couverture}}$) (si elle est présente) par des méthodes de mesure, un lysimètre peut être mis en place sur la couverture du casier de stockage (Bellenfant, 2001 ; Laborde, 2000). Un lysimètre est un récipient étanche enterré, à parois verticales, remplie par une portion de déchets. Le principe de la mesure repose sur la réalisation d'un bilan hydrique, sur ce casier lysimétrique, qui isole un volume de déchets (Bellenfant, 2001).

Les lixiviats infiltrés en fond de casier lysimétrique sont drainés pour une prise en compte dans le bilan, et sont enregistrés à la sortie des drains (Bellenfant, 2001), grâce à un débitmètre. En surface, un collecteur récupère les eaux de ruissellement dont le débit est aussi enregistré (Laborde, 2000) par un débitmètre. Finalement, les apports d'eau de pluie sont mesurés avec un pluviomètre (Laborde, 2000), tandis que le stock d'eau contenu dans le casier lysimétrique pourrait être mesuré par une mesure de masse, en posant l'ensemble sur une balance.

Cette technique de mesure présente néanmoins plusieurs inconvénients. Tout d'abord, une mauvaise connaissance du stock en eau des déchets existe de par les difficultés de mesure associées (Bellenfant, 2001). De plus, il paraît compliqué voire irréalisable, pour l'exploitant, de mettre en place un lysimètre dans chacun de ses casiers de remplissage, en raison de la complexité du matériel, des mesures de chacun des paramètres, et de son envergure – par exemple, dans la thèse de Gaël Bellenfant (2001), les lysimètres sont décrits par une surface d'une soixantaine de mètres carrés -. Enfin, l'hétérogénéité de la qualité des déchets dans les casiers rend d'autant plus compliquée cette méthode.

La mise en place d'un bac à évaporation (Laborde, 2000) sur la couverture de surface du casier de remplissage constitue un moyen intéressant pour estimer la transpiration du couvert végétal ($ETR_{\text{couverture}}$). Afin de corriger l'évaporation apparente des précipitations, le bac doit être associé à un pluviomètre, de même dimension. Le bac devra également être entouré d'un grillage pour éviter que des animaux viennent y boire (Laborde, 2000).

b) Données bibliographiques

Les données bibliographiques sont présentées en Annexe 5.

Finalement, afin de faciliter la tâche aux exploitants d'ISDND, un moyen de quantifier l'ETR d'un site de stockage, en fonction du climat (donc de la température), pourrait être d'utiliser les bases de données (ou chroniques) à Météo France, constituées de valeurs d'ETP. Dans la mesure du possible, l'idéal serait de récupérer des mesures d'ETP propres à chaque position géographique en France (Nord, Sud, Est, et Ouest). Ces valeurs seraient ensuite appliquées aux ISDND selon la localisation respective de ces dernières. Par exemple, une installation de stockage implantée au Nord de la France utiliserait les chroniques journalières ou mensuelles d'ETP réalisées au Nord de la France.

L'ETR serait enfin calculé à partir de l'ETP, selon l'une des méthodes précédemment décrites.

Une utilisation de valeurs moyennes sur une longue période, tout en suivant ce cheminement, semble être une solution acceptable pour une utilisation de l'ETR dans le calcul du bilan hydrique des ISDND.

c) Conclusion

L'utilisation de bases de données d'ETP selon la localisation des régions françaises semble convenir idéalement à une quantification de l'ETR pour le bilan hydrique.

C) Le ruissellement (Rint, Rext)

a) Méthodes de mesure

Le terme **Rext** étant nul dans les quatre situations de casier, il n'est pas utile de tenter de le quantifier. En revanche, l'exploitant d'une installation de stockage aurait besoin de quantifier du mieux qu'il peut le paramètre **Rint**, qui apparaît dans le bilan hydrique de la situation **b**, définie dans la troisième partie de ce rapport (cf. J)). Pour ce faire, les fossés de collecte des eaux de ruissellement, mis en place tout autour des casiers de stockage, sont équipés de débitmètre(s).

Par exemple, les fossés acheminent les eaux de ruissellement vers un système de mesure constitué d'un canal Venturi, d'une sonde à ultrasons, d'un FMU – c'est-à-dire un boîtier convertissant le signal en un volume -, et d'un Memolog pour l'enregistrer dans une carte PCMCIA (Bellenfant, 2001). « Le canal Venturi est un caniveau réalisé en fibre de verre permettant des écoulements à surface libre. Il est suffisamment court pour que les pertes par frottements entre la section d'entrée et la section contractée de l'écoulement soient négligeables » (Bellenfant, 2001). La sonde à ultrasons est placée au-dessus de l'eau, est activée électriquement par le FMU et envoie une impulsion ultrasonique à travers l'air en direction de l'eau (Bellenfant, 2001). Cette impulsion est réfléchiée par la surface. L'écho est renvoyé vers la sonde, et est converti en un signal électrique (Bellenfant, 2001). La durée de parcours de l'impulsion, à savoir le temps entre l'émission et la réception de cette dernière, est proportionnel à la distance entre la sonde et l'eau (Bellenfant, 2001). Cette distance est d'ailleurs déterminée par la formule : $D = c * t / 2$, avec c , la vitesse du son et t , la durée de parcours (Bellenfant, 2001). Le FMU retranscrit ensuite le signal en une hauteur de lame d'eau ou en débit si la courbe caractéristique du canal Venturi lui est rentrée, à savoir la relation hauteur / débit (Bellenfant, 2001). Enfin, le data-manager « memo-log » saisit des valeurs de mesures analogiques grâce à quatre canaux d'entrée (Bellenfant, 2001). « Il permet de combiner ou linéariser les valeurs, de les afficher, de surveiller des seuils, et de mémoriser les données sur la carte mémoire » (Bellenfant, 2001).

Pour réaliser l'ensemble des mesures sur le ruissellement dans les fossés, il s'agirait d'entretenir ces derniers afin d'éviter qu'ils se bouchent et débordent, et de curer le canal pour éviter une accumulation de sédiments (Bellenfant, 2001).

En réalité, lors des mesures de ruissellement dans les fossés, il faudrait tenir compte de la pluie tombée directement dans ce dernier (à sa surface libre), si le canal est ouvert. La pluie serait soustraite à la valeur mesurée par le débitmètre. La construction de canaux fermés paraît être une bonne solution pour remédier à ce problème.

En principe, les fossés de collecte peuvent être constitués d'eau provenant d'un unique **Rext**, et de **plusieurs Rint**, puisque chaque casier du site peut être affecté par les ruissellements **Rint** en provenance des casiers voisins (cf. Figure 5). D'autant plus que chaque casier est caractérisé par un **Rint** propre. Toujours est-il qu'un moyen doit être trouvé pour séparer les eaux venant de **Rext**, de **Rint** du casier considéré, et de **Rint** de son casier voisin. Pour répondre à ces attentes, la construction de trois fossés, isolés de l'atmosphère (fermés), en périphérie des casiers situés le plus en bordure du site de stockage, peut être envisagée. De même, la construction de deux fossés entre chaque alvéole, peut être proposée. Dans le premier cas, trois systèmes de drainage devront être mis en place, l'un collectant les eaux de **Rext**, un autre récupérant les eaux de **Rint** du casier considéré, et le dernier drainant les eaux de **Rint** du casier voisin au casier considéré. Dans le second cas, deux systèmes de drainage devront être installés : l'un collectant les eaux de **Rint** du casier considéré, l'autre ralliant les eaux de **Rint** de son casier voisin.

Un moyen déjà utilisé et présenté dans un écrit de O. Planchon (1991), peut aussi servir à mesurer le ruissellement. Grâce à la mise en place d'un mini-piège, la quantité d'eau de ruissellement franchissant un segment de versant, matérialisé par une rigole* perpendiculaire à la pente, est mesurée, après chaque averse (Planchon, 1991). En disposant plusieurs mini-pièges le long de la pente, une relation peut être faite entre le ruissellement et la position du mini-piège, caractérisée par une longueur de pente (Planchon, 1991). Cela permet également de remarquer si l'eau de ruissellement s'est infiltrée ou non pendant son parcours. Si ce n'est pas le cas, alors le ruissellement doit être une fonction croissante de la longueur de pente (Planchon, 1991).

La rigole est reliée à une petite fosse, dans laquelle est disposé un bidon. Ce bidon permet de recueillir l'eau (Planchon, 1991). Après une averse, trois cas sont possibles : le bidon peut être vide, peut contenir de l'eau sans avoir débordé, ou peut avoir débordé (Planchon, 1991). En considérant toutes les averses d'une période, le nombre de fois où chacun des trois états a été observé pour chaque mini-piège, peut être calculé (Planchon, 1991). Ce nombre s'exprime en pourcentage du nombre total d'averses observées (Planchon, 1991).

Chaque mini-piège est caractérisé par trois nombres, dont la somme est égale à 100 % (Planchon, 1991). Le nombre d'averses (%) après lesquelles le mini-piège a été « vide », « plein », ou « débordé » peut être représenté sur un diagramme ternaire.

* Une rigole est un petit canal ou fossé creusé dans le sol pour l'écoulement.

b) Données bibliographiques

Les données bibliographiques sont présentées en Annexe 6.

c) Conclusion

Dans l'optique de quantifier le paramètre ruissellement, une mesure sur site paraît être suffisante. Cette méthode ne demande pas de matériel particulier à mettre en place, si ce n'est creuser des fossés ou mettre en place des mini-pièges. La méthode calculatoire est également moins précise qu'une mesure réalisée directement sur le terrain, puisqu'elle prend en compte plusieurs paramètres dont le seuil de ruissellement (**b**), qui intègre la **RU** (difficile à estimer). Le coefficient de ruissellement varie également dans des intervalles plus ou moins grands, ce qui rend difficile la précision des calculs.

D) L'absorption (L_a) et le relargage (E_d) des liquides contenus dans les déchets

Comme abordé dans le III) D) de ce rapport, il n'est pas possible de quantifier, par des méthodes de mesure, les quantités de lixiviat absorbées (L_a) ou relarguées (L_d) par les déchets. Seul le bilan de ces deux termes peut être calculé à partir du résultat du bilan hydrique.

E) La réserve en eau des couvertures de surface (RU)

a) Méthodes de mesure

Au vu de l'équation finale du bilan hydrique des situations **a** à **d**, la **RFU** n'a pas besoin d'être quantifiée, puisque qu'elle n'apparaît dans aucune des formules. En revanche, il est essentiel de chercher à quantifier la **RU**, afin de calculer le bilan hydrique dans la situation **b**.

Au vu de la bibliographie trouvée, certaines méthodes de mesure, utilisées pour mesurer l'humidité du sol, pourraient être déployées sur le terrain, dans le but d'estimer convenablement la **RU** de la couverture de surface des casiers de stockage. C'est le cas de la mesure par pesées, de la sonde à neutrons, de la sonde TDR (Time Domain Reflectometry), ou du tensiomètre. La mesure par rétrodiffusion des rayons infrarouges, la mesure par absorption de micro-ondes, ou encore les mesures de la permittivité diélectrique et de la résistivité électrique pourraient très bien être également envisagées dans cette optique.

Cependant, le sol est un milieu différent des déchets, et il est impossible d'effectuer des mesures correctes et représentatives de la **RU** d'une couverture de casier de stockage de déchets, sur le terrain.

b) Données bibliographiques

Les données bibliographiques sont présentées en Annexe 7.

c) Conclusion

Bien que la RU puisse être calculée par la formule citée dans le paragraphe précédent (cf. IV) E) b)), le meilleur moyen d'estimer précisément la RU de la couverture semi-perméable de surface reste, selon nous, de la déduire à partir des autres termes du bilan hydrique, une fois que ces derniers sont tous connus.

F) Le lixiviat collecté (Lc), le biogaz collecté (B) et le lixiviat réinjecté (Lr)

a) Méthodes de mesure

La quantité de lixiviat collectée par pompage ou gravité (Lc), la quantité de lixiviat réinjectée au sein du massif de déchets (Lr), et la quantité de biogaz collectée (B) sont directement évaluées par l'intermédiaire d'un débitmètre hydraulique (Lc, Lr), et d'un débitmètre pour gaz (B).

b) Conclusion

L'unique manière de quantifier les paramètres Lc, B et Lr du bilan hydrique repose sur une mesure sur site.

G) Les défauts de l'ouvrage (EX, Kc, η , D)

Les éventuels défauts de l'ouvrage ne peuvent être mesurés ou observés directement sur le terrain. Pourtant, des fuites importantes peuvent par exemple se produire à travers une couverture de surface imperméable, ou sur les flancs d'un casier de stockage, surestimant ou sous-estimant alors significativement les quantités de lixiviat collecté.

De ce fait, nous nous proposons d'effectuer le calcul du bilan hydrique avec une incertitude de 5 %, pour tenir compte de ces différents paramètres. Malheureusement, en cas de non problème avec ces termes, l'incertitude serait nulle et le bilan hydrique serait exact. Dans l'autre sens, en présence de multiples complications, l'incertitude pourrait s'élever jusqu'à une valeur de 95 voire 99 %.

Conclusion

En conclusion, le bilan hydrique d'une installation de stockage de déchets est un outil complexe à mettre en œuvre, compte tenu de l'échelle à laquelle s'effectue le travail. A la seule considération d'une alvéole de déchets, le bilan hydrique fait appel à peu de paramètres, en atteste le rapport du CEREMA sur le bilan hydrique d'une alvéole de déchets. En revanche, à notre échelle d'étude, à savoir pour l'ensemble des alvéoles de stockage d'un site industriel, le nombre de paramètres à prendre en compte pour calculer le bilan hydrique est beaucoup plus important. Dans un premier temps, la difficulté du travail résidait du fait de la présence d'une multitude de paramètres à identifier puis à évaluer, en fonction des entrées et des sorties de liquide de l'ouvrage. Dans un second temps, il a fallu chercher à quantifier chaque paramètre de ce bilan, et à proposer une méthode de mesure la plus adéquate qui soit, pour chacun d'entre eux. Cette seconde étape n'a pas été un franc succès, en raison de l'existence de plusieurs paramètres dont la quantification est délicate. Le manque de bibliographie récente sur ce sujet est une difficulté de cette étape, autant que le manque d'appareils de mesures applicables aux installations de stockage de déchets, ce qui constitue un vice à une bonne évaluation du calcul du bilan hydrique.

Durant le premier mois et demi de stage accompli au sein de l'équipe MP2 « Mesures Physiques pour les Milieux Poreux » à l'Irstea, j'ai pu appréhender la difficulté d'aborder un sujet de recherche, tel que celui proposé. J'ai également pu prendre conscience de la démarche scientifique à avoir, lorsqu'un travail de recherche est posé.

Au cours de mes deux mois et demi de stage restants, des visites d'installation de stockage de déchets sont prévues en région Rhône-Alpes, et en particulier envisagées dans les départements de l'Isère, de la Drôme, du Rhône et/ou de la Loire. Ces sorties sur le terrain me permettront personnellement d'avoir un aperçu réel de ce qu'est une ISDND, tant au niveau de la représentation que de la gestion à l'échelle d'un site. Ces visites vont nous permettre de discuter directement avec les exploitants des installations pour comprendre comment ils abordent la quantification du bilan hydrique et quels sont les outils ou moyens qu'ils emploient pour le calculer. Respecte-t-il correctement les réglementations ? Qu'attendent-ils du guide méthodologique (ou document source) que nous envisageons de réaliser ? Ces questions et bien d'autres seront abordées avec eux lors de ces différentes virées. Des rencontres avec les DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) devraient également avoir lieu en régions Rhône-Alpes et Ile-de-France. Pour préparer ces entrevues avec les DREAL, nous avons eu l'idée de faire puis de leur envoyer une fiche d'enquête, contenant des questions qui se dressent à présent devant nous. Par exemple, nous souhaiterions savoir si les cunettes de récupération sont bien mises en place dans chaque installation. De même, il semblerait que de l'eau pluviale soit réinjectée dans le massif de déchets pour des raisons de sécurité – afin de prévenir des problèmes d'incendies en été – sur un site en Rhône-Alpes : est-ce que ce mode de gestion est plus universel qu'il n'y paraît ? D'autres questions restent posées concernant la saturation en eau du biogaz, la période sur laquelle s'effectue le calcul du bilan hydrique (mensuelle, annuelle ?) ou encore sur le type de débitmètre utilisé sur le terrain pour les mesures des lixiviats collectés ou des eaux de pluie. Enfin, nous aimerions en savoir plus sur les paramètres incontournables du bilan hydrique, la sensibilité et la variabilité régionale des termes du bilan.

Obtenir une ou plusieurs réponses à ces différentes questions nous aiderait à mieux appréhender la manière dont s'opère le bilan hydrique sur site, et à assister ultérieurement efficacement les gestionnaires et les inspecteurs des installations classées.

Bibliographie

Rapports / Mémoires / Revues :

Annexe 1 : Calcul/estimation de la recharge [En ligne], 24 p., disponible sur http://www.reseau.eaufrance.fr/webfm_send/2242

AMORCE, Octobre 2007. Dossiers Déchets : Les Installations de Stockage de Déchets [En ligne], Série Technique N°22, 34 p., disponible sur http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/2d/c0/2dc04308-1855-4404-9a6e-18b1cc4bd1d1/dt22.pdf

Barrès M., Bonin H., Brossier G. *et al.*, Avril 1990. Etude de la modélisation des fonctions assurées par une décharge sous-projet P9 contrat n°88.087.C.120 – Etude en installation pilote de l'écoulement de l'eau à travers un déchet – *Rapport final du BRGM*. In : 4^è programme CCE de Recherche et Développement « Protection de l'Environnement » [En ligne]. Rapport n°R3889 ENV 4S 90, 84 p., disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-30889-FR.pdf>

Chassagnac T., Décembre 2007. Etat des connaissances techniques et recommandations de mise en œuvre pour une gestion des installations de stockage de déchets non dangereux en mode bioréacteur – *Etude réalisée pour le compte de l'ADEME et la FNADE* [En ligne], 48 p., disponible sur http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/51260_guide_bioreacteur.pdf

CORPEN, 2007. Annexes : Les fonctions environnementales des zones tampons – Protection des eaux [En ligne], p.77-176 (100 p.), disponible sur http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_brochure_zones_tampons_annexes.pdf

Djiré H., 2010. Etude de l'évolution de la biodégradation des Déchets Non Dangereux stockés en Bioréacteur, en fonction des conditions d'injections de lixiviats – *Mémoire pour l'obtention du Master en ingénierie de l'eau et de l'environnement option eau et assainissement* [En ligne], 39 p., disponible sur http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=599

Glandier S., 2002. Risques sanitaires liés aux fuites de lixiviats des centres de stockage de déchets ménagers et assimilés – *Mémoire de fin d'études* [En ligne], 92 p., disponible sur <http://fulltext.bdsp.ehesp.fr/Ensp/Memoires/2002/igs/glandier.pdf>

InVS, 2005. II) Fonctionnement d'un centre de stockage [En ligne], 16 p., disponible sur <http://www.invs.sante.fr/publications/2005/dechets/pdf/1-2.pdf>

Lallemand-Barrès A., Sauter M., Août 1986. Etude du bilan hydrique de décharges industrielles – calcul du bilan hydrique - *Rapport Confidentiel BRGM et ANRED* [En ligne]. 86 SGN 624 EAU, 129 p., disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/86-SGN-624-EAU.pdf>

Planchon O., 1991. Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Paris : Éd. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Partie II : Ruissellement, Pluviométrie, Bilan hydrique - Chapitre 6 : La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles mesures et perspectives de modélisation, p.59-75, disponible sur http://www.bibliotheque.auf.org/doc_num.php?explnum_id=467

VILLEMIN H., Août 2014. Bilan hydrique des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux – Application au cas de Saint-Quentin-sur-Isère – *Rapport établi au sein du CEREMA dans le cadre d'un stage ENTPE*, 50 p.

Articles :

Moulin P., Renou S., Poulain S. *et al.*, 2008. Lixiviat de centre de stockage : déchet généré par des déchets [En ligne]. *L'eau, l'industrie, les nuisances*. N°310, p.37-43, disponible sur http://www.researchgate.net/profile/Philippe_Moulin3/publication/259443696_Lixiviat_de_centre_de_stockage_dchet_gnr_par_des_dchets/links/00b4952b9b456b226b000000.pdf

Pirron T., Ouvry J-F., Touze-Foltz N. *et al.*, 2012. Performance d'un géosynthétique bentonitique dans une couverture d'installation de stockage de déchets après six ans en service [En ligne]. *Sciences Eaux & Territoires*. N°08, p.48-52, disponible sur <http://www.set-revue.fr/sites/default/files/archives/Pirron.pdf>

SYDEVOM, après 2010. ISDND Les Parrines – Bilan hydrique du site (modèle MOBYDEC) [En ligne]. 7 p., disponible sur <http://www.sydevom04.fr/library/PARRINES/DDAE%20ENQUETE%20PUBLIQUE/pi%C3%A8ce%20n%C2%B02/annexe%2024/annexe-24-rapport-mobydec.pdf>

Zahrani F., Gourdon R., Revin P. *et al.*, après 2004. Approches du bilan hydrique de deux centres de stockage des déchets ménagers dans les pays en développement : cas de Go-Cat (Vietnam) et Essaouira (Maroc), 7 p., disponible sur http://inpact.inp-toulouse.fr/archives/WasteEng05/FullText_H/274_fzahrani_05_02_09.pdf

Extraits de livres :

Billard Hervé, Juillet 2001. Centres de stockage des déchets – Exploitation. Ed. Les techniques de l'ingénieur, traité Environnement. Chapitre 2, Collecte et traitement des lixiviats, Connaissance des lixiviats, p. 4-8

Le Lamy Environnement – Les Déchets, après Juillet 2001. Ed. Wolters Kluwer. Partie 2 – Gestion des déchets, Etude 259 – Filières d'élimination des déchets (filières 17, 18 ,19, 20), Section V – Mise en décharge (filière 20) – Les centres de stockage, Sous-section III – Production et traitement des lixiviats et du biogaz, 259-55 : Bilan hydrique d'un centre de stockage [En ligne], disponible sur <http://www.wk-hsqe.fr/preview/BeDhHIDgKpFjFjMCGBe/editionXHTML/dechets/259-55 - bilan hydrique d un centre de stockage/259-55 - bilan hydrique d un centre de stockage>

Cours :

Beauchamp Jacques, Université de Picardie Jules Verne, L'eau souterraine – éléments d'hydrogéologie (Hydrogéologie). Consulté le 20/06/2015, disponible sur <https://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/hydrogeo.htm>

Beauchamp Jacques, Juillet 2006. Université de Picardie Jules Verne, L'eau et le sol (Pédologie). Consulté le 20/06/2015, disponible sur <https://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/eau-sol.htm>

Chapitre 4 : Encroûtement et compactage du sol. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre4/II.DiagnosticChap4.html>

Chapitre 4 : Evaporation et interception. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre4/chapitre4.html>

Chapitre 6 : Le stockage et ses variations. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre6/chapitre6.html>

Chapitre 7 : La mesure hydrologique. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html4>

Chapitre 10 : Les processus hydrologiques. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre10/chapitre10.html>

Duchemin B., Introduction au calcul des besoins en eau et de l'évapotranspiration de cultures selon la méthode FAO Allen *et al.* 98. Consulté le 21/06/2015, disponible sur <http://trema.ucam.ac.ma/Irrimed/sudmed/activites/coursDuchemin0603.pdf>

Jae K. (Jim) Park, Water balance. University of Wisconsin-Madison. PowerPoint, disponible sous 427-Water Balance.pptx

Laborde J-P., 2000. Eléments d'hydrologie de surface, 192 p., Consulté le 21/06/2015.

Massachusetts Institute of Technology (MIT) OpenCourseWare, 2004. Lecture 19 : Landfill hydrology, Consulté le 21/06/2015, disponible sur <http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-34-waste-containment-and-remediation-technology-spring-2004/lecture-notes/lecture19.pdf>

Projet :

Wahéo E., Claveyrollas C., après 2007. Projet BEIERE - Etude de l'implantation d'un Centre de Stockage de Déchets Ultimes (CSDU) en Guadeloupe [En ligne]. Disponible sur <http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0708/beiere/5/html/Projet%20bin%F4me%202/CSDU%20-%20plan.html>

Arrêtés / Décrets / Circulaires :

LE MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT, 2012. Circulaire DPP/SD/SEI/YG/MM n° 1364 du 16/10/84 relative à la mise en décharge de déchets industriels | AIDA [En ligne], BOMET n° 282-85/8, disponible sur http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/8457

Le Président de la République. Loi n°2013-431 du 28 Mai 2013 portant diverses dispositions en matière d'infrastructures et de services de transports (1). NOR : DEVX1240360L, disponible sur http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=2CF2E8888B3D82263FF540ABFEB7A56B.tpdila13v_3?cidTexte=JORFTEXT000027469717&dateTexte=20150621

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, ET DE L'ÉNERGIE, en cours de révision. Arrêté du [] relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, ET DE L'ÉNERGIE, 29 Décembre 2013. Décret n°2013-1273 du 27 décembre 2013 relatif au Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA). NOR : DEVD1323621D, disponible sur <http://legifrance.gouv.fr/eli/decret/2013/12/27/DEVD1323621D/jo/texte>

Thèse :

Bellenfant, Gaël, 2001. Modélisation de la production de lixiviat en centre de stockage de déchets ménagers [En ligne]. *Thèse de l'Ecole Doctorale RP2E. Génie civil – Hydrosystèmes – Géotechnique*. INPL de Nancy, 178 p., disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00419919/document>

Sites Internet :

Cosandey Claude, Juillet 1998. Interception, CNFSH. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/FRDIC/DICINTER.HTM>

Cosandey Claude, Septembre 2000. Réserve hydrique / Réserve hydrologique, CNFSH. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICRESHH.HTM>

Définition Charge hydraulique, site d'aquaportail. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://www.aquaportail.com/definition-5238-charge-hydraulique.html>

Description de CEREMA, site viadeo. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://fr.viadeo.com/fr/company/cerema>

Enfouissement des déchets ménagers ultimes en centre d'enfouissement technique, VALTOM. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://www.valtom63.fr/Enfouissement-dechets.html>

L'eau dans le sol, site AFIDOL. Consulté le 20/06/2015, disponible sur [http://www.afidoltek.org/index.php/L%27eau dans le sol](http://www.afidoltek.org/index.php/L%27eau%20dans%20le%20sol)

Margat J., Novembre 1996. Pluie ou précipitation efficace (ou utile), CNFSH. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/FRDIC/DICPLUIE.HTM>

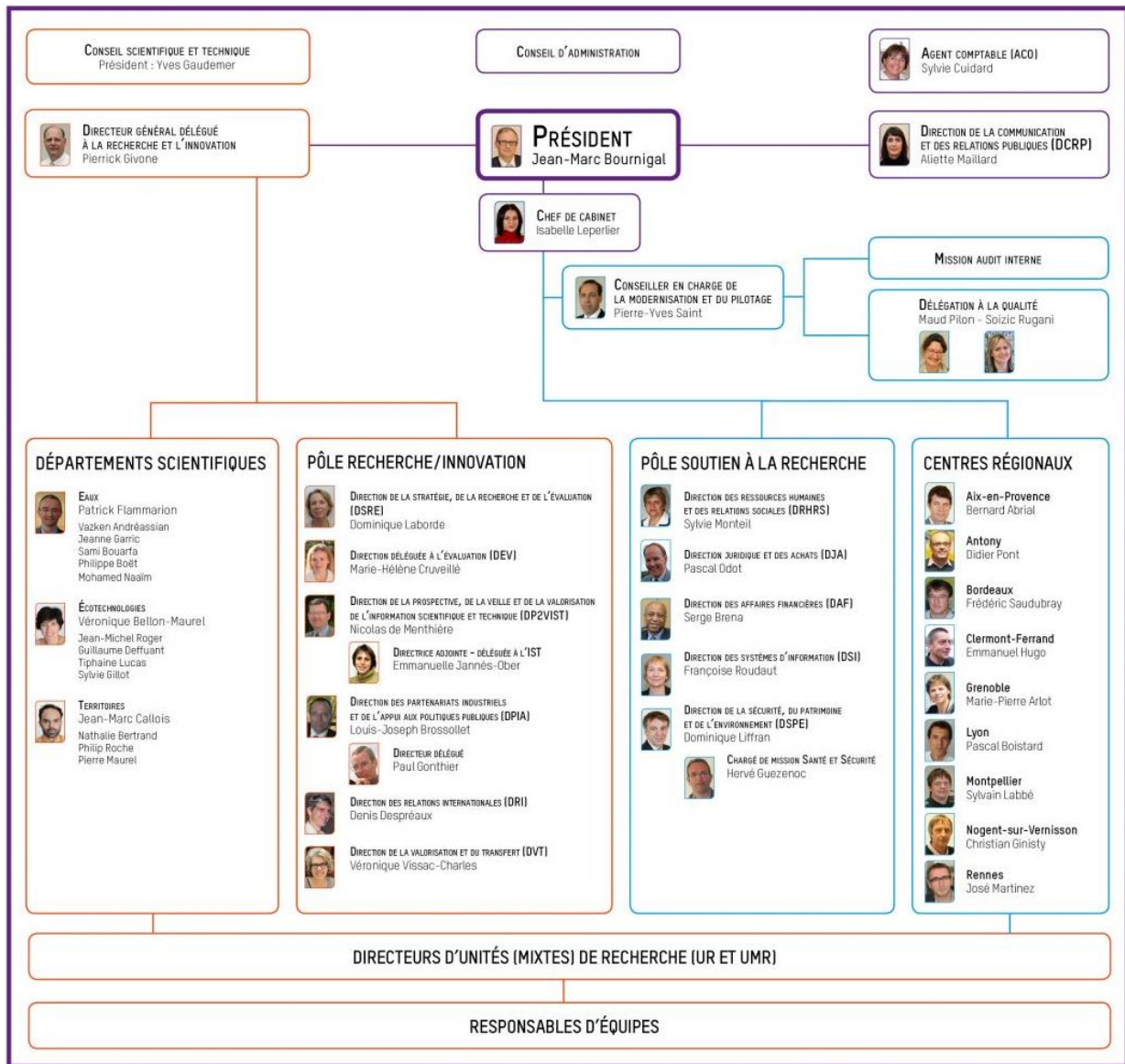
Peigne Joséphine, 2014. Processus écologiques – Comment calculer la réserve utile du sol ?, site UVED. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/CALculRU.html>

Peigne Joséphine, 2014. Processus écologiques – La battance, site UVED. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/Battance.html>

Prévention des risques – Gestion des déchets – Traitement des déchets – Stockage de déchets non dangereux, 2010. Site du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Consulté le 20/06/2015, disponible sur <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Cas-particulier-de-certaines.html>

Annexe 1 : Organigramme de l'IRSTEA (Mars 2015)

(<http://www.irstea.fr/linstitut/organisation/organigramme>)



Annexe 2 : Organigramme de la Direction territoriale Centre-Est (Septembre 2014)



Direction territoriale Centre-Est

DIRECTION

Directeur
Dominique THON
04 72 14 33 05



Directeur adjoint
Denis SCHULTZ
04 72 14 30 08



CHARGÉS DE MISSION

Communication
Laure PASQUIER
04 72 14 30 09



Qualité
Marc CECILION
04 72 14 30 06



Développement durable
Philippe GRAVIER
04 74 27 51 27



Septembre 2014

DÉPARTEMENT MOBILITÉS (BION)

Directrice du département
Frédérique CHAZE
04 72 14 31 25

Directeur adjoint
Christophe BETIN : 04 72 14 31 61

Exploitation et gestion dynamique des trafics
Frédéric MURARD : 04 72 14 32 27

Territoires et offres de transports
Gaëlle CHAPRON : 04 72 14 32 62

Sécurité, planification & analyse des déplacements
Eric PASQUIER : 04 72 14 31 48

Évaluation des politiques et des systèmes de déplacements
Olivier RICHARD : 04 72 14 31 82

Gestion de la connaissance-Communication
Géraldine BONNET : 04 72 14 31 50

DÉPARTEMENT CONSTRUCTION AMÉNAGEMENT PROJET (L'ISLE-D'ARDEAU)

Directrice du département
Anne GRANDGUILLOT
04 74 27 51 07

Directeurs adjoints
Marc OURNAC : 04 74 27 51 53
Pascal MAGNIÈRE : 04 74 27 53 50

Pilotes de grands projets
Patrick LANDRY : 04 74 27 53 92
David NCOGOSIAN : 04 74 27 53 30

Aménagement et conception des infrastructures
Pascal BALMEFRIZOL : 04 74 27 53 11

Usagers et partage de la voirie
Celia RENNESSON : 04 74 27 51 31

Aménagement villes et quartiers
Gersende FRANC : 04 74 27 53 34
Olivier BACHELARD : 04 74 27 51 71

Usages et performances du bâtiment
Cédric LENTILON : 04 74 27 51 22

Maitrise de l'énergie et transfert d'air dans les bâtiments
Myriam OLMIER : 04 74 27 51 61

DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT TERRITOIRES CLIMAT (L'ISLE-D'ARDEAU)

Directeur du département
Marc MEYER
04 74 27 53 04

Directeur adjoint
Philippe GRAVIER : 04 74 27 51 27

Montagne
Claire FAESSEL-VIROLE : 04 74 27 51 05

Biodiversité et eau
Virginie BILLON : 04 74 27 53 56

Évaluations environnementales et économie de l'environnement
Charlotte LEBRIS : 04 74 27 53 55

Déchets, sols pollués et eaux souterraines
Laurent ESENLOIR : 04 72 14 31 91

Environnement et santé
Xavier OLMY : 04 74 27 51 74

Territoires et changement climatique
Noëlle FORST : 04 74 27 51 65

Cohérence territoriale et cohésion sociale
Fédéric BRUDE : 04 74 27 51 05

DÉPARTEMENT LABORATOIRE D'AUTUN (AUTUN)

Directeur du département
Eric JANOT
03 85 86 67 01

Directeur adjoint
Christophe AUBAGNAC : 03 85 86 67 02

Groupe Ouvrages d'art - Géotechnique - Risques
Christophe AUBAGNAC : 03 85 86 67 02

Risques naturels - Géotechnique - Géophysique - PAT OUIH
Amandine LEMAIRE p.i. : 03 85 86 67 63

Gestion durable des ouvrages d'art
Jean-Claude WENDLING : 03 85 86 67 50

Matériaux - Structures - Collage et composites ERA 43
Jérémy ROBI : 03 85 86 67 25

Groupe infrastructures de transports
Patrick VALLANT : 03 85 86 67 03
Ann ELAZOUI : 03 85 86 67 36

Matériaux - ERA 30
Louise WENDLING : 03 85 86 67 51
Oumayma MARZOUC : 03 85 86 67 94

Auscultation et gestion du patrimoine
Pascal HUEZ : 03 85 86 67 54

Caractérisation et études sur les matériaux
Alan ELAZOUI : 03 85 86 67 92

Techniques et matériaux de terrassement
Ludovic MAARD : 03 85 86 67 13

Groupe Bâtiment - Acoustique
Sabrina TALON : 03 85 86 67 11

Perméabilité à l'air, énergie et risques
Samh URKIC p.i. : 03 85 86 67 49

Contrôle, instrumentation, bâtiment
État exemplaire
Gediz CAUDRON : 03 85 86 67 60

Acoustique environnementale et gaz à effet de serre
Laëtitia LACOUTURE : 03 85 86 67 30

DÉPARTEMENT LABORATOIRE DE CLERMONT-FERRAND (CLERMONT-FERRAND)

Directrice du département
Dominique DELOUIS
04 73 42 10 05

Directeurs adjoints
Maëlle CHAÏNE : 04 73 42 10 77
Alexandre QUER : 04 73 42 10 41

Groupe Risques - Environnement - Infrastructures
Maëlle CHAÏNE : 04 73 42 10 77

Chargée de missions Eau déchets
Catherine NEEL : 04 73 42 10 27

Hydroscystèmes et corridors fluviaux
David GOUTLAND : 04 73 42 11 41

Géotechnique-Terrassements-Risques
Benoit NAGEL : 04 73 42 10 96

Matériaux-Infrastructures
Caroline MAUDUIT : 04 73 42 10 63

Groupe Construction - Mobilités
Alexandre QUER : 04 73 42 10 41

Chargé de missions Bâtiments
Jean-Luc PAUMIER : 04 73 42 10 56

Mobilité durable et sécurité
Michèle COLOMB : 04 73 42 11 29
Fédéric BERNARDIN : 04 73 42 10 87

Ecoconstruction-Acoustique
Pilar LESAGE : 04 73 42 10 58

Structures et ouvrages d'art
Richard VASSIERE : 04 73 42 11 42

DÉPARTEMENT LABORATOIRE DE LYON (BION)

Directeur du département
Gilles GAUTHIER
04 72 14 33 00

Directeur adjoint
David DAGUILLON : 04 72 14 33 03

Groupe Risques rocheux et mouvements de sols
Geneviève ROLL : 04 72 14 31 34

Référents techniques risques
Jean-Paul DURANTON : 04 72 14 32 74
Pierre GUILLEMIN : 04 72 14 32 78

DR29 - Risques géologiques et géotechniques
Siegfried MAILLINO : 04 72 14 32 84

Géomatériaux
Fabrice ROJAT : 04 72 14 32 15

Risques
Laurent DURBOIS : 04 72 14 32 79

Géomécanique
Agnes JOSEPH : 04 72 14 32 22

Groupe Sécurité-Appareils grand rendement - Instrumentation
Nicolas NUYTTENS : 04 72 14 32 93

gestion durable du patrimoine
Christophe SOULIE : 04 72 14 33 34

Adhérence - Sécurité - ERA 12
Thomas BERTHOIS : 04 72 14 32 01

Instrumentation-Electrométrie - Mesures
Nicolas GRENARD : 04 72 14 33 51

Groupe Ouvrages d'art structures et matériaux durables
Sylvie ARNAUD : 04 72 14 32 16

Animateur régional NFPE
Référént Béton
Michael DESRENS : 04 72 14 32 11

Comportement des matériaux et des structures - ERA 24
Adrien HOUEL : 04 72 14 32 22

Chimie et protection des structures
Serge HAMPARIAN : 04 72 14 32 10

Pathologie des structures et diagnostic
Pierre ROSENLE : 04 72 14 32 41

DIVISION Ouvrages d'Art
Didier GERMAIN : 04 72 14 32 35

SECRETARIAT GÉNÉRAL

Secrétaire générale
Dominique CHABARD
04 72 14 30 07

Adjoint, chargé de mission, mise en place du siège du Cerema
Guillaume ISA : 04 72 14 30 62

Conseiller de gestion
Jean-Claude FERRI : 04 72 14 30 79

Ressources humaines-formation
Laurence BAUDIER : 04 72 14 30 91

Prévention sécurité
Richard HESTROFFER : 04 72 14 31 05

Informatique
Laurent DUFLOT : 04 72 14 30 31

Moyens généraux
Jean-Paul VIVIANI : 04 72 14 30 92

SERVICE FINANCIER ET COMPTABLE SUD-EST

Michele MENTON
04 72 14 31 93

Bureau financier Centre-Est
XXXXXX

Annexe 3 : Localisation des implantations du CEREMA en France



- Siège du Cerema à Bron
 - direction des politiques publiques, des programmes et de la production
 - direction scientifique et technique et des relations européennes et internationales
 - direction de la communication et de la diffusion des connaissances
 - direction des ressources humaines
 - direction de l'administration générale et des finances
 - direction des systèmes d'information
 - agence comptable principale
 - mission qualité
- Direction technique Infrastructures de transport et matériaux
- Direction technique Eau, mer et fleuves

● Direction technique Territoires et ville

■ Directions territoriales

- Centre-Est
- Est
- Ile-de-France
- Méditerranée
- Normandie-Centre
- Nord-Picardie
- Ouest
- Sud-Ouest

■ Autres sites des directions territoriales (laboratoires,...)

Annexe 4 : Extrait de la convention cadre de partenariat entre IRSTEA et le CEREMA sur la thématique « Déchets »

<i>Binôme en charge :</i>	
Sylvain MOREAU (Irstea – Antony)	Laurent EISENLOHR (Cerema – DterCE)
<i>Axes de collaboration :</i> Les réflexions menées dans le cadre de cette thématique se concentrent sur la gestion et les impacts des déchets solides issus des activités industrielles et de la production des ménages. Les sujets de partenariats sont au nombre de 5 et recoupent les axes de collaboration suivants : <ol style="list-style-type: none">1. Bilan hydrique des installations de stockage des déchets ;2. Sorties du statut de déchets (boues, sédiments, BTP) ;3. Valorisation agricole des sédiments ;4. Stabilisation des déchets ;5. Filières de déchets organiques en ville.	
<i>Objectifs identifiés :</i> Les axes de travail retenus pour la période 2015-2018 sont au nombre de 3, ils ont été définis comme les plus aboutis pour engager une collaboration entre les 2 établissements. La concrétisation du partenariat dépend, en partie, de sa capacité à identifier et dégager des sources de financements : projets de recherche, thèse, Master II, MEDDE, collaboration avec les opérateurs « déchets ». AXE 1 : Bilan hydrique des installations de stockage de déchets L'application concerne les installations de stockage de déchets (ISD) en exploitation ou ayant cessé l'activité ainsi que les anciens dépôts sauvages. La finalité est l'élaboration d'un document opérationnel présentant les modalités de calcul d'un bilan hydrique à l'échelle d'une ISD. Ce guide serait destiné aux exploitants, aux bureaux d'études et aux services instructeur de l'État. <i>AXE 2 : Stabilisation des massifs de déchets</i> Les résultats de l'étude précédente sur le bilan hydrique permettront de disposer d'éléments indispensables pour aborder la notion de stabilisation des massifs de déchets dans le cadre d'un partenariat permettant la conduite d'une thèse en lien avec des opérateurs industriels du domaine des déchets. Le sujet concerne l'étude de la stabilité des massifs de déchets stockés qui selon leur nature peut être dépendante notamment de la compréhension des phénomènes hydriques, des modèles de biodégradation des différentes fractions de déchets présentes, des modes de gestion de l'ouvrage de stockage et de nombreux autres paramètres. On peut identifier 2 typologies de stabilité interdépendantes : l'une associée à une notion de structure mécanique et l'autre à un état de biodégradabilité. Pour les installations de stockage de déchets non dangereux, seules des mesures conduites sur les biogaz et les lixiviats sont à ce jour exploitées pour évaluer la stabilité de ces ouvrages. <i>AXE 3 : Filière de valorisation des déchets organiques en ville</i> L'objectif de cet axe est l'étude de la gestion de proximité des déchets organiques en milieu urbain avec des approches sur les technologies (Irstea) ainsi que sur l'organisation des filières (Cerema). L'intérêt de la collaboration pourrait résider dans le mélange du compost produit en milieu urbain avec d'autres types de déchets disponibles pour produire et mettre à disposition une « terre végétale » nécessaire pour différents types de support de culture urbain. L'année 2015 serait consacrée à un temps de réflexion pour analyser les questions d'intérêt commun puis initier un programme de travail sur le sujet.	

Annexe 5 : Données bibliographiques pour l'évapotranspiration potentielle ETP et l'évapotranspiration réelle ETR

La formule de Thornthwaite, essentiellement basée sur les températures de l'air, permet d'évaluer l'ETP, selon : (Laborde, 2000)

$$ETP = 16 * \left(10 * \frac{t}{I}\right)^a * K$$

Avec : $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,5}$ et $I = \sum_1^{12} i$

$$a = \frac{1,6}{100} * I + 0,5$$

t, la température moyenne mensuelle du mois considéré

ETP, l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau)

K, un coefficient d'ajustement mensuel

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S
K	0,73	0,78	1,02	1,15	1,32	1,33	1,33	1,24	1,05

Mois	O	N	D
K	0,91	0,75	0,70

D'autres formules (Turc, Penman) permettent également d'évaluer l'ETP (Laborde, 2000). Cependant, le nombre de paramètres utilisés par la formule de Penman (différentes températures, hydrométrie, rayonnement global, albédo,...) fait que cette dernière est rarement employée, compte tenu des mesures réalisables.

Quant à la formule de Turc, celle-ci nécessite la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale, selon : (Laborde, 2000)

$$ETP = 0,4 * \frac{t}{t + 15} * (I_g + 50) * K$$

Avec : ETP, l'évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau)

t, la température moyenne mensuelle de l'air (en °C)

I_g, la radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en calorie/cm²/jour)

K, un coefficient égal à 1 si l'humidité relative Hr est supérieure à 50 % (généralement le cas sous nos climats), sinon $K = 1 + \frac{50 - Hr}{70}$

Si la radiation globale n'est pas mesurée, elle peut être évaluée à partir de la durée d'insolation h par la formule : (Laborde, 2000)

$$I_g = I_g A \left[0,18 + 0,62 \frac{h}{H}\right]$$

Avec : I_gA, la radiation globale théorique (en cal/cm²/jour)

H, la durée théorique des jours du mois

I_gA et H seront déterminées en fonction de la latitude et du mois, grâce à des abaques, ou les formules de la forme : (Laborde, 2000)

$$H = 362,7 + 0,201 \text{ lat} + (4,085 \text{ lat} - 80,99) * \cos(30,01 i - 188,9)$$

$$I_g A = 1035 - 9,078 \text{ lat} + (7,050 \text{ lat} + 49,90) * \cos(29,92 i - 182,5)$$

La formule de Turc peut faire appel à de nombreux termes, difficiles à estimer, tels que la radiation globale ou la durée d'insolation. Il n'est donc pas aisé de mettre cette formule en application.

En ce qui concerne l'évaluation de l'ETR, la formule de Turc permet d'évaluer l'ETR annuelle moyenne d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle, comme suit : (Laborde, 2000)

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec : $L = 200 + 25 t + 0,05 t^3$

ETR, l'évapotranspiration réelle (en mm/an)

P, la hauteur annuelle de pluie (en mm)

T, la température annuelle (en °C)

Cette formule ne fournit que l'ordre de grandeur de l'ETR (Laborde, 2000). Elle permet l'estimation du « déficit d'écoulement », qui ne se rapproche de l'ETR que pour des bassins versants étendus (Laborde, 2000).

Grâce à la méthode de Thornthwaite et Matter (1955), l'ETR peut être évalué à partir de l'ETP (Bellenfant, 2001). Cette méthode prend en compte l'évapotranspiration potentielle (ETP) ainsi que la pluviométrie, et considère que l'ETR est égale à l'ETP corrigée (ETP_c).

La formule est la suivante : $ETP_c = ETP * K_c$

Avec : K_c, un coefficient tenant compte des pratiques culturales

ETP, l'évapotranspiration potentielle (mm)

ETP_c, l'évapotranspiration potentielle corrigée (mm)

La valeur du coefficient cultural K_c dépend du stade de développement, du type de culture, du type de sol, et du climat (B. Duchemin).

L'ETR peut être obtenue par une autre méthode, s'intitulant : « **Bilan simplifié selon Thornthwaite** » (Villemin, 2014 ; Bellenfant, 2001 ; Laborde, 2000). Cette méthode se base notamment sur la notion de RFU. Elle admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau, la RFU, et que cette eau peut être reprise pour la transpiration des plantes. La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 – la RFU est alors vide - et RFU max – c'est-à-dire la capacité maximale de la RFU, variant elle-même de 0 à 200 mm suivant les sols et les sous-sols – (Laborde, 2000).

Le bilan simplifié de Thornthwaite admet qu'il faut avoir satisfait l'ETR, avant de considérer qu'il n'y ait de l'écoulement (ruissellement et/ou infiltration). Il faut également compléter la RFU, avant de considérer l'écoulement (Laborde, 2000).

Le bilan simplifié selon Thornthwaite est établi à l'échelle mensuelle, à partir de la connaissance de P, de l'ETP, et de la RFU max, de la manière suivante (Laborde, 2000) :

Si $P > ETP$, alors :

- $ETR = ETP$
- L'excédent d'eau, de valeur $P - ETP$, est affecté à la RFU. Si la quantité d'eau stockée dans la RFU atteint la RFU max (la RFU est alors complète) mais qu'il reste encore un excédent, alors cette eau excédentaire est affectée à l'écoulement.

Si $P < ETP$, alors :

- Toute la pluie est évaporée, et, dans le but de satisfaire à l'ETR, la RFU de la fin du mois précédent perd de l'eau par évapotranspiration, en une quantité telle qu'elle soit égale à l'eau à rajouter à P pour satisfaire pleinement l'ETR, soit :
 - $ETR = P + \min(RFU_{m-1}, ETP - P)$

Le terme $\min(RFU, ETP - P)$ signifie que la quantité d'eau prélevée à la RFU du mois précédent ($m-1$) est égale à la quantité $ETP - P$ du mois considéré.

- La quantité d'eau stockée dans la RFU à la fin du mois considéré correspond à : $RFU_m = 0$ (si elle se vide) ou $RFU_m = RFU_{m-1} + P_m - ETP_m$.
- Si la $RFU = 0$, la quantité $ETP - ETR$ représente la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Pour établir ce bilan, il faut connaître la RFU maximale, ainsi que l'état de la RFU à la fin du mois antérieur au début de l'établissement du bilan.

Si la RFU doit être pleine un jour, ce sera à la fin de la période durant laquelle elle a pu se remplir, à savoir à la fin du dernier mois où $P > ETP$ (Laborde, 2000).

Sous nos latitudes, l'humidité est considérée comme assez importante en Janvier, pour considérer que la RFU est à RFU max (Villemin, 2014).

Une fois le bilan établi pour chaque mois, l'ETR annuelle est évaluée en calculant la somme des 12 ETR mensuelles (Laborde, 2000).

Annexe 6 : Données bibliographiques pour le ruissellement Rint

Une quantification du terme **Rint** peut se faire par la connaissance du coefficient de ruissellement* (**Cr**), puisque le ruissellement dépend essentiellement de ce dernier, qui dépend lui-même en grande partie de la texture et du type de sol. En atteste l'annexe 8. La pente joue également un rôle non négligeable sur le coefficient de ruissellement (*cf.* Annexe 8) (Bellenfant, 2001). Dans notre cas d'étude (situation **b**), **Rint** dépend du coefficient de ruissellement de la couverture semi-perméable.

La méthode rationnelle permet d'estimer le ruissellement, une fois **Cr** connu, selon : (Bellenfant, 2001)

$$Q = Cr * Pe * S$$

Avec : Q, le volume de ruissellement (m³)

Cr, le coefficient de ruissellement

Pe, la pluie efficace (m)

S, la surface (m²)

En allant plus loin, Nolting *et al.* présentent, en 1995, une évolution de la formule précédente, sous la forme :

$$Q = Cr * (P - b) * S$$

Avec : Q, le volume de ruissellement (m³)

Cr, le coefficient de ruissellement

P, la précipitation efficace (m)

b, le seuil de ruissellement

S, la surface (m²)

Le seuil de ruissellement **b** intègre l'**ETR** et le stockage d'eau en surface (**RU**) (Bellenfant, 2001).

Le coefficient de ruissellement **Cr** intègre la pente et le stockage d'eau en surface (**RU**) (Bellenfant, 2001).

Cette méthode rationnelle modifiée est plus réaliste que la méthode rationnelle classique, même si le seuil de ruissellement est difficile à déterminer (Bellenfant, 2001). Ce dernier dépend en effet du type de sol, de son état de surface, et de son humidité (Bellenfant, 2001).

* Le coefficient de ruissellement est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée (dite « pluie nette ») et la hauteur d'eau précipitée (dite « pluie brute »). Il est compris entre 0 et 1, et est déjà connu dans de nombreux cas, en atteste les différents tableaux présentés en annexe 8.

Annexe 7 : Données bibliographiques pour la réserve utile RU

Le calcul de la réserve utile requiert des humidités dites caractéristiques du sol (J. Peigne). Celles-ci permettent de connaître l'humidité du sol lorsque l'eau devient en excès, et l'humidité du sol lorsque l'eau devient non utilisable par la plante étant trop liée au sol (J. Peigne).

Il existe deux grandes humidités caractéristiques du sol.

La première est l'humidité à la capacité au champ (J. Peigne). Pour rappeler ce qui a été dit en amont, cette humidité correspond à la quantité maximale d'eau que peut contenir un sol dans sa porosité, sans pour autant que l'eau soit en excès et percole (J. Peigne). Elle est notée Hcc.

La seconde humidité, dénommée « humidité au point de flétrissement », correspond (pour rappel) à la quantité d'eau au-dessous de laquelle la plante n'a plus accès à l'eau, car l'eau est trop liée au sol (J. Peigne). Cette humidité est notée HpF_{4,2}.

La RU est la quantité d'eau qui se situe entre Hcc et HpF_{4,2} (cf. III) E)).

L'humidité du sol peut être calculée sous la forme d'une humidité massique Hm (en %) (J. Peigne) :

$$Hm (\%) = \left(\frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse de sol sec}} \right) * 100$$

Afin de calculer la RU en mm d'eau, il faut transformer l'humidité massique (Hm en %) en hauteur d'eau (hmm en mm) (J. Peigne). Pour ce faire, la formule à utiliser est la suivante : (J. Peigne)

$$hmm (mm) = Hm (\%) * z (mm) * da * 10^{-2} = Hm (\%) * z (dm) * da$$

Avec : Hm, l'humidité massique du sol
z, la profondeur de sol
da, la densité apparente du sol

La RU peut ensuite être calculée avec la formule suivante : (J. Peigne)

$$RU = (Hcc - HpF_{4,2}) * da * z$$

Avec : RU, la réserve utile (mm)
Hcc, l'humidité à la capacité au champ massique (%)
HpF_{4,2}, l'humidité au point de flétrissement massique (%)
da, la densité apparente du sol*
z, la profondeur de sol considérée (dm)

* La densité apparente du sol correspond à la masse du sol par unité de volume du sol sec en place.

On peut imaginer qu'une telle formule est applicable à une couverture de casier, cette dernière pouvant être considérée comme un sol.

Annexe 8 : Quelques coefficients de ruissellement (Cr) trouvés dans la littérature

Type de surface (S)	Coefficient de Ruissellement (C)
Pleine terre	0,20
Terre végétale sur dalle	0,40
Toiture terrasse gravillonnée	0,70
Toitures	0,95
Voiries, allées et parking	0,95

Type de surface	Coefficient de ruissellement (Cr) compris entre
Zone d'activités tertiaires centres villes autres	0,70 / 0,95 0,50 / 0,70
Zone résidentielle pour 1 pavillon ensemble de pavillons détachés ensemble de pavillons attachés	0,30 / 0,50 0,40 / 0,60 0,60 / 0,75
Zone industrielle	0,50 / 0,90
Cimetières - Parcs	0,10 / 0,25
Zone de jeux	0,25 / 0,35
Rue et trottoirs asphalte béton pavé	0,95 0,95 0,85
Pelouse (sol sablonneux) pente < 2 % 2 % < pente < 7 % pente > 7 %	0,05 / 0,10 0,10 / 0,15 0,15 / 0,25
Pelouse (sol terreux) pente < 2 % 2 % < pente < 7 % pente > 7 %	0,13 / 0,17 0,18 / 0,22 0,25 / 0,35

Valeurs des coefficients de ruissellement en fonction du type de surface

<u>Occupation du sol</u>	<u>Coefficient de ruissellement</u>
- Commercial	0,70 < C < 0,95
- Résidentiel	
aménagement	0,30 < C < 0,50
collectifs	0,50 < C < 0,75
habitats dispersés	0,25 < C < 0,40
- Industriel	0,50 < C < 0,80 à 0,90
- Parcs et jardins publics	0,10 < C < 0,25
- Terrains vagues	0,05 < C < 0,15 à 0,20
- Terres agricoles	
drainées	0,10 < C < 0,13
non drainées	0,03 < C < 0,07 à 0,10
<u>Type de surface</u>	
- Pavage, chaussées revêtues, pistes ciment	0,70 < C < 0,95
- Toitures et terrasses	0,75 < C < 0,95
- Sols imperméables avec végétation	
pente < 2 %	0,13 < C < 0,18
pente = 2 à 7 %	0,18 < C < 0,22 à 0,25
pente > 7 %	0,25 < C < 0,35
- Sols perméables avec végétation	
pente < 2 %	0,05 < C < 0,10
pente = 2 à 7 %	0,10 < C < 0,15
pente > 7 %	0,15 < C < 0,20

Conditions de surface	Coefficient de ruissellement
Couverture gazon :	
Sol sableux, plat, 2 %	0.05-0.10
Sol sableux, moyenne, 2-7 %	0.10-0.15
Sol sableux, forte pente 7 %	0.15-0.20
Sol lourd, plat, 2 %	0.13-0.17
Sol lourd, moyen 2-7 %	0.18-0.22
Sol lourd, forte pente 7 %	0.25-0.35
d'après CHOW V.T. Hand book of applied hydrology. New-York. Mc Graw-Hill 1964	