



# Travail de fin d'étude

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

## Promotion 62

### Année 2016-2017

---

Voie d'approfondissement :  
Environnement – Génie des cours d'eau et des littoraux

Soutenu le 31/08/2017

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Rafael ANGULO-JARAMILLO
- Tuteurs : Frédéric CHERQUI - Catherine FRANCK-NEEL - David GOUTALAND
- Expert : Lionel LE PENVEN

Par

**Titouan Flaux**

## **Approche systémique de la gestion des eaux pluviales**

-

*Etude des apports de la modélisation systémique pour l'aide à la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales*

**Organismes d'accueil**  
**Cerema Centre-Est – INSA Lyon**



## Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Flaux		
Prénom	Titouan		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	Cerema Centre-Est, Clermont-Ferrand		
Nom des Tuteurs	Frédéric CHERQUI, Catherine FRANCK-NEEL, David GOUTALAND		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Approche systémique de la gestion des eaux pluviales		
Titre (anglais)	System dynamics-based approach of stormwater management		
Résumé (français)	<p>L'objectif de ce travail est d'évaluer l'intérêt de l'approche de modélisation systémique pour aider la gestion des techniques alternatives (TA) d'infiltration des eaux pluviales, en intégrant l'influence des pratiques d'entretien des gestionnaires sur le long terme.</p> <p>Après présentation des fondements et avantages de l'approche systémique, un modèle a été élaboré sur la base d'un ouvrage existant de rétention-infiltration (Django Reinhardt, Chassieu). Le modèle simule le fonctionnement global de l'ouvrage (Perméabilité, volume utile...) sur le long terme (15 ans) et fournit des résultats exprimés en termes de tendances d'évolution des performances par rapport à l'état initial de l'ouvrage.</p> <p>La généralisation du modèle à d'autres types d'ouvrages d'infiltration (noue, petit bassin) est discutée.</p> <p>A ce stade du travail, le modèle systémique élaboré nécessite d'être confronté à la vision des gestionnaires pour le valider et le compléter, puis le faire évoluer vers un outil décisionnel.</p>		
Résumé (anglais)	<p>This work aims at assessing the interests of the systemic modeling approach for helping management of the sustainable urban drainage systems (SUDS), and especially their maintenance schedule over the long term.</p> <p>After presenting the foundations and advantages of the systemic approach, a model has been developed to simulate an existing retention-infiltration structure (Django Reinhardt, Chassieu). The model simulates the overall structure behavior (permeability, useful volume, etc.) over the long term (15 years) and provides results expressed in terms of trends in performance compared to the initial state.</p> <p>The generalization of the model to other types of infiltration structures (ditch, small basin) is discussed.</p> <p>At this stage of the work, the developed systemic model remains a predictive tool. Its validation, improvement and then evolvment towards a decision-making tool require a confrontation with the vision of the managers.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Systémique, modélisation, techniques alternatives, entretien, eaux pluviales		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	System dynamics, modeling, Sustainable urban drainage systems, maintenance, stormwater		
Termes géographiques (français)	Agglomération lyonnaise / France métropolitaine		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	74	7 (32)	27

## **Avant-propos**

Ce travail exploratoire a été mené dans le cadre d'un projet de thèse encadré par le Cerema Centre-Est en collaboration avec l'INSA de Lyon. Il vient clôturer trois années d'études à l'ENTPE dont une passée en double cursus Master Mécanique des Fluides et Energétique auprès de l'Université Claude Bernard – Lyon 1.

### ***Remerciements***

Je tiens tout d'abord à remercier mes trois tuteurs de TFE, sans qui tout ce travail n'aurait jamais été possible. Merci à eux trois pour leur soutien indéfectible et pour l'aide précieuse qu'ils ont toujours su m'apporter durant ces cinq mois. Merci à eux d'avoir été présents en toutes circonstances, bravant vacances, jours fériés et horaires déraisonnables.

Un grand merci à Catherine FRANCK-NEEL et à David GOUTALAND pour leurs nombreuses visites à Lyon et leur accueil toujours chaleureux à Clermont-Ferrand. Merci à eux pour leur optimisme et leur bienveillance incroyables qui ont rendu ce TFE plus que plaisant.

Merci aussi bien sûr à Frédéric CHERQUI de m'avoir ouvert les portes du DEEP et d'avoir toujours été là pour répondre à toutes mes interrogations et me guider sans relâche dans l'avancée de mon travail. Son expertise et ses conseils inestimables m'ont toujours permis d'avancer dans mes recherches de manière très fluide.

Je tiens aussi à remercier M. Lionel LE PENVEN et M. Rafael ANGULO-JARAMILLO qui ont été disponibles et d'une patience infinie tout au long de ces cinq mois, et dont les réponses à mes mails ne se sont jamais fait attendre.

Un grand merci bien sûr à ma famille qui a su avec beaucoup de ténacité endurer de (très) longues semaines sans me voir tout au long de l'été. Un deuxième grand merci à toi qui partage ma vie et (un peu trop) mes sautes d'humeur, et avec qui j'ai passé les plus beaux moments de cet été.

Une petite pensée à Gabin pour la bouffée d'air bretonne, à Isabelle pour les barbecues à forte teneur en bonne ambiance, à Pierre et Rémi pour leur incroyable habileté à me sortir la tête du guidon juste avant que je ne m'y cogne et à Charles, Antoine, et tous les collègues de 3A assignés à TPE pour les soirées AoE qui savaient si merveilleusement clôturer nos journées.

<b>Avant-propos .....</b>	<b>3</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>3</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>8</b>
<b>I- Vers une gestion patrimoniale des ouvrages de gestion des eaux pluviales .....</b>	<b>9</b>
<b>a. Des techniques alternatives pour répondre à l'imperméabilisation des sols .....</b>	<b>9</b>
i. Problématique de l'imperméabilisation des sols .....	9
ii. Besoin de gestion des eaux pluviales .....	10
iii. Techniques alternatives de gestion des eaux pluviales.....	11
iv. Typologie des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales .....	12
<b>b. Connaître pour entretenir.....</b>	<b>14</b>
<b>c. Modéliser pour connaître.....</b>	<b>15</b>
<b>d. Limites de la modélisation classique.....</b>	<b>15</b>
<b>II- Approches de la modélisation systémique.....</b>	<b>17</b>
<b>a. Fondements de la systémique .....</b>	<b>17</b>
<b>b. Confrontation entre les approches analytique et systémique.....</b>	<b>17</b>
i. Dichotomie analytique/système.....	17
ii. Vision statique et vision dynamique .....	18
iii. Avantages et inconvénients de l'approche systémique .....	19
iv. Applicabilité au sujet d'étude.....	20
<b>c. Les différents modèles proposés par la systémique .....</b>	<b>20</b>
i. Le modèle cognitif .....	20
ii. Le modèle prévisionnel .....	20
iii. Le modèle décisionnel.....	21
iv. Le modèle normatif .....	21
<b>d. Processus de modélisation.....</b>	<b>21</b>
i. Ordre de conception .....	22
ii. Eléments structurels d'un modèle .....	22
iii. Eléments fonctionnels d'un modèle .....	23
iv. Diagramme causal.....	23
v. Boucles de rétroaction.....	24
vi. Diagrammes flux-réservoirs .....	25
vii. Comportement archétypaux des sous-systèmes.....	26
<b>III- Modélisation d'un bassin de rétention-infiltration .....</b>	<b>28</b>
<b>a. Présentation du site Django-Reinhardt .....</b>	<b>28</b>
i. Situation et caractéristiques du site .....	28
ii. Intérêts du site d'étude choisi.....	29
<b>b. Définition des frontières du système à étudier.....</b>	<b>30</b>
<b>c. Finalités du modèle .....</b>	<b>30</b>
i. Finalité du modèle cognitif .....	31
ii. Finalité du modèle prédictif .....	31
<b>d. Elaboration du modèle cognitif .....</b>	<b>31</b>
i. Le bloc « dispositif de collecte des eaux pluviales » du modèle cognitif.....	34
ii. Le bloc « bassin de rétention » (BR).....	34

iii.	Le bloc « bassin d’infiltration » (BI).....	35
iv.	Le bloc « exutoires » du modèle cognitif.....	36
<b>e.</b>	<b>Elaboration du modèle prédictif .....</b>	<b>36</b>
i.	Base de données du modèle prédictif.....	37
ii.	Interface de saisie du paramétrage par le gestionnaire.....	39
iii.	Partie fonctionnelle du modèle prédictif.....	41
<b>f.</b>	<b>Paramétrisation du modèle prédictif.....</b>	<b>43</b>
ii.	Définition des paramètres initiaux du modèle.....	43
iii.	Résultats de la simulation du scénario de référence.....	44
iv.	Etude de l’influence de paramètres importants.....	51
<b>g.</b>	<b>Discussion sur le modèle .....</b>	<b>57</b>
<b>IV-</b>	<b><i>Généralisation du modèle à d’autres ouvrages.....</i></b>	<b>59</b>
<b>a.</b>	<b>Conditions d’adaptabilité du modèle .....</b>	<b>59</b>
<b>b.</b>	<b>Bassin de rétention situé sur le territoire de plaine commune – Pierrefitte .....</b>	<b>59</b>
i.	Présentation du site .....	59
ii.	Résultats de la simulation.....	60
<b>c.</b>	<b>Noüe située sur le territoire de Plaine-Commune – Pierrefitte .....</b>	<b>61</b>
i.	Présentation du site .....	62
ii.	Résultats de la simulation.....	62
<b>d.</b>	<b>Discussion sur les résultats.....</b>	<b>64</b>
<b>e.</b>	<b>Possibilités de généralisation du modèle.....</b>	<b>64</b>
<b>V-</b>	<b><i>Identification des bénéfices et limites de l’approche retenue.....</i></b>	<b>67</b>
<b>a.</b>	<b>Utilisation du modèle en lien avec les pratiques d’entretien .....</b>	<b>67</b>
i.	Identification des causes de dysfonctionnement d’un ouvrage .....	67
ii.	Identification des pratiques d’entretien optimales.....	67
iii.	Adéquation des techniques d’entretien mises en place.....	68
iv.	Evaluation qualitative de l’impact d’un nouvel équipement .....	68
v.	Evaluation qualitative de l’impact d’un changement dans l’environnement.....	68
<b>b.</b>	<b>Analyse critique de l’approche retenue .....</b>	<b>69</b>
<b>c.</b>	<b>Perspectives de recherches.....</b>	<b>69</b>
i.	Généralisation du modèle à d’autres fonctions.....	69
ii.	Développement des modèles décisionnels et normatifs .....	72
	<b><i>Conclusion.....</i></b>	<b>73</b>
	<b><i>Bibliographie .....</i></b>	<b>74</b>
	<b><i>Annexes .....</i></b>	<b>76</b>

## Table des figures

Figure 1 : Schéma de l'influence de l'imperméabilisation des sols sur la fonction d'infiltration des eaux pluviales (source : Soil Science Society of America, 2014)	9
Figure 2 : Accroissement des surfaces artificialisées sur le sol européen entre 2010 et 2030 (Source : European Environment Agency, 2016)	10
Figure 3 : Vue d'artiste d'un espace intégrant des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales : Berges du lac, Bordeaux – Christian DEVILLERS	11
Figure 4 : Comparaison entre approche analytique et approche systémique (source : Le Macroscopie Joël DE ROSNAY 1975)	18
Figure 5 : Eléments structurels d'un modèle systémique	23
Figure 6 : Eléments fonctionnels d'un modèle systémique	23
Figure 7 : Exemple d'une boucle de rétroaction positive – Volume d'un réservoir d'eau potable (Source : Mirchi et al., 2012)	25
Figure 8 : Exemple d'une boucle de rétroaction négative – Volume d'un réservoir d'eau potable (Source : Mirchi et al., 2012)	25
Figure 9 : Exemple de diagramme flux-réservoir (Source : Leal-Neto, 2006)	26
Figure 10: Représentations graphiques des comportements archétypaux de sous-systèmes (Adapté de : Sterman JD. - 2000)	27
Figure 11: Localisation de l'ouvrage de rétention / infiltration Django Reinhardt : a) position par rapport au bassin versant de la zone industrielle (source : Goutaland, 2008), b) morphologies et volumes des deux bassins	28
Figure 12 : Schéma de principe du fonctionnement du bassin Django-Reinhardt, Chassieu	29
Figure 13: Modèle cognitif du bassin de rétention-infiltration Django Reinhardt – Version agrandie en annexe 3	33
Figure 14 : vue détaillée des blocs correspondant au dispositif de collecte des eaux pluviales et au bassin de rétention	34
Figure 15 : vue du modèle cognitif - bassin de collecte des eaux pluviales et Bloc Bassin de Rétention	35
Figure 16 : extrait de la base de données du modèle prédictif – exemple de l'élément « Taux de contamination HC BR »	38
Figure 17 : Extrait de l'interface gestionnaires – section « Paramètres d'entretien »	40
Figure 18: Modèle prédictif du bassin de rétention-infiltration Django Reinhardt – Version agrandie en annexe 4	42
Figure 19 : évolution du volume de sédiments dans le BR au cours du temps ( $m^3$ )	45
Figure 20 : évolution du volume de sédiments dans le BI au cours du temps ( $m^3$ )	45
Figure 21 : évolution de la végétation au cours du temps dans le BR (en pourcentage de la végétation maximale)	46
Figure 22 : évolution de la végétation au cours du temps dans le BI (en pourcentage de la végétation maximale)	47
Figure 23 : : évolution du volume utile du BR au cours du temps (en pourcentage du volume total)	48
Figure 24 : : évolution du volume utile du BI au cours du temps (en pourcentage du volume total)	48
Figure 25 : évolution de la pollution du BR par les hydrocarbures au cours du temps (en g)	49
Figure 26 : évolution de la pollution du BI par les hydrocarbures au cours du temps (en g)	49
Figure 27 : évolution du taux de perméabilité du bassin d'infiltration au cours du temps (en pourcentage de la perméabilité à la conception)	51
Figure 28 : Comparaison de l'évolution du volume utile du BR entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec présence d'un dégrilleur (à droite)	52
Figure 29 : Comparaison de l'évolution du taux de perméabilité entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec présence d'un dégrilleur (à droite)	52
Figure 30 : Comparaison de l'évolution du stock d'hydrocarbures du BI entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec présence d'un déshuileur (à droite)	52
Figure 31 : Comparaison de l'évolution du taux de perméabilité du BI entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une surverse annuelle de 30 % (à droite)	53

Figure 32 : Comparaison de l'évolution du stock d'hydrocarbures du BI entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une surverse annuelle de 30 % (à droite)	53
Figure 33 : Comparaison de l'évolution de la perméabilité du BI entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec un curage du BR annuel (à droite)	54
Figure 34 : Exemple du paramétrage de l'interface utilisateur pour une augmentation progressive de 20% du volume d'eau reçu par l'ouvrage au bout de 2 ans	55
Figure 35 : Exemple du paramétrage de l'interface utilisateur pour une augmentation instantanée de 20% du volume d'eau reçu par l'ouvrage au bout de 2 ans	55
Figure 36 : Comparaison de l'évolution du volume de sédiments dans le BR au cours du temps entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une augmentation du bassin versant artificialisé de 20 % au bout de deux ans BR annuel (à droite)	56
Figure 37 : Figure : Comparaison de l'évolution du remplissage journalier moyen de sédiments pour le BR au cours du temps entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une augmentation du bassin versant artificialisé de 20 % au bout de deux ans BR	56
Figure 38 : Comparaison de l'évolution du taux de perméabilité du Bi au cours du temps entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une augmentation du bassin versant artificialisé de 20 % au bout de deux ans BR annuel (à droite)	57
Figure 39: Schéma de la vue aérienne du Mail Brassens (Source : Agence ATM - Plaine Commune - Carnet d'entretien - Mail Brassens (ZAC des Poètes) – Pierrefitte	60
Figure 40 : Evolution des paramètres de contrôle pour le bassin de rétention de Pierrefitte : a) Volume de sédiments (en m3) – b) Volume utile restant (en pourcentage du volume initial) – c) Stock d'hydrocarbures (en g) – d) Perméabilité (en pourcentage de la perméabilité initiale)	61
Figure 41 : Schéma de la vue aérienne de l'allée de l'Europe (Source : Agence ATM - Plaine Commune - Carnet d'entretien - ZAC Briais Pasteur – Pierrefitte sur Seine)	62
Figure 42 : Evolution des paramètres de contrôle pour la noue de l'allée de l'Europe : a) Volume de sédiments (en m3) – b) Volume utile restant (en pourcentage du volume initial) – c) Stock d'hydrocarbures (en g) – d) Perméabilité (en pourcentage de la perméabilité initiale)	63
Figure 43 : Diagramme représentant les différentes fonctions de service que peut posséder une technique alternative de gestion des eaux pluviales (source : Cherqui et Barraud et al., 2016)	70

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre vision statique et vision dynamique (Extrait de : Le Macroscopie Joël DE ROSNAY 1975)	19
Tableau 2 : Analyse des avantages et inconvénients de l'approche systémique	19
Tableau 3 : Légende de la base de données du modèle systémique	39
Tableau 4 : Adéquation du modèle systémique pour la simulation du comportement des techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales	66

## Liste des annexes

Annexe 1 : Version textuelle de la base de données du modèle prédictif	76
Annexe 2 : Interface utilisateur du modèle prédictif – Paramétrée pour le bassin Django Reinhardt	95
Annexe 3 : Modèle Cognitif	101
Annexe 4 : Modèle Prédictif	102
Annexe 5 : Hypothèses et méthode pour le calcul de la perméabilité des ouvrages d'infiltration (Dicantot, 2016)	103
Annexe 6 : Tableau de résumé des études menées sur le bassin Django Reinhardt	104
Annexe 7 : Mode d'emploi du modèle prévisionnel	105

## Introduction générale

Ce travail de master explore l'approche systémique appliquée aux ouvrages de gestion des eaux pluviales. Il a pour objectif de montrer la pertinence de l'approche systémique dans l'aide à la gestion des techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales. Il vise également à montrer qu'il est possible de connecter le modèle systémique aux actions d'entretien de ces dernières.

Cette étude fait suite au travail de **Dicanot (2016)**, qui portait sur la modélisation hydraulique d'un ouvrage d'infiltration. Ce travail nous permet de disposer d'une base de connaissances sur les ouvrages d'infiltration des eaux pluviales et nous a aussi permis d'identifier un outil de modélisation (Vensim PLP) servant à l'établissement de modèles analytiques simplifiés. En vue de compléter le travail déjà fourni, nous chercherons à dépasser le cadre analytique pour travailler de manière systémique, en considérant le fonctionnement d'un ouvrage dans son ensemble. Nous nous intéresserons plus précisément aux résultats que la modélisation systémique nous permet d'obtenir et à leur intérêt dans le cadre du développement d'un outil opérationnel de planification destiné aux gestionnaires des TA, ainsi qu'à l'applicabilité des résultats obtenus à différents types d'ouvrages d'infiltration des eaux pluviales.

Afin d'y parvenir, nous avons procédé à l'étude des TA, de leur fonctionnement et des performances hydrauliques et environnementales attendues de ces derniers. Nous avons ensuite mené un travail de recherche sur la démarche systémique et ses applications possibles, afin de déterminer son adaptabilité au domaine de la gestion des eaux. Nous avons alors pu développer deux modèles d'un ouvrage type : le bassin de rétention-infiltration Django Reinhardt, situé à Chassieu.

- Le premier permet la clarification du fonctionnement et l'identification des interactions prédominantes entre ses équipements
- Le second permet, au moyen de paramètres simples fournis par le gestionnaire de l'ouvrage, de déterminer l'évolution à long terme des performances hydrauliques de ainsi que de son impact environnemental.

A l'issue de cette phase de modélisation, notre objectif a été d'élargir la portée du modèle à d'autres ouvrages que le bassin Django Reinhardt. Nous avons donc effectué des simulations de fonctionnement de plusieurs autres ouvrages dont nous connaissons bien les caractéristiques afin d'évaluer la cohérence des résultats obtenus. Cette étape nous a permis de vérifier l'adaptabilité du modèle à des ouvrages différents de celui ayant servi à sa conception.

Enfin, nous avons réalisé une analyse critique de l'application de la systémique à la modélisation des ouvrages de gestion des eaux pluviales. A l'occasion de cette dernière partie, nous avons aussi cherché à identifier des pistes de réflexions pour l'amélioration du modèle dans le domaine de l'aide à la gestion des techniques alternatives.



# I- Vers une gestion patrimoniale des ouvrages de gestion des eaux pluviales

## a. Des techniques alternatives pour répondre à l'imperméabilisation des sols urbains

### i. Problématique de l'imperméabilisation des sols

« L'imperméabilisation des sols est le recouvrement permanent d'une parcelle de terre et de son sol par un matériau artificiel imperméable tel que l'asphalte ou le béton » (**Union Européenne, 2012**). Ce phénomène est généralement observable au sein des villes et communautés d'agglomération et s'accroît le plus souvent avec la taille de l'agglomération (figure 1).

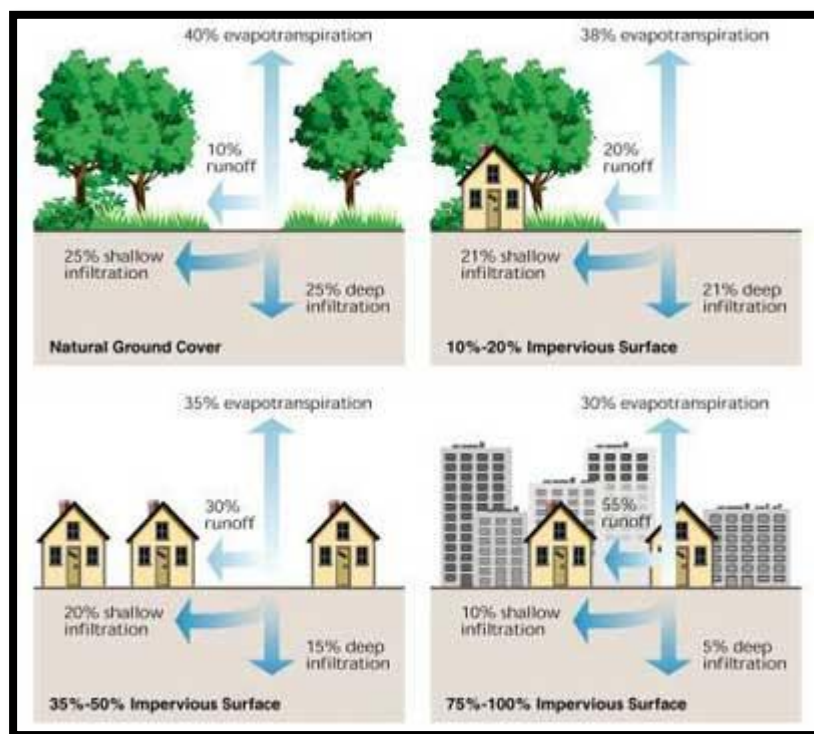


Figure 1 : Schéma de l'influence de l'imperméabilisation des sols sur la fonction d'infiltration des eaux pluviales (source : Soil Science Society of America, 2014)

L'augmentation de la part urbaine de la population européenne s'est accompagnée d'un étalement des grandes aires urbaines, et la tendance des quinze prochaines années reste à la croissance dans la grande majorité des pays européens (**Figure 2**).

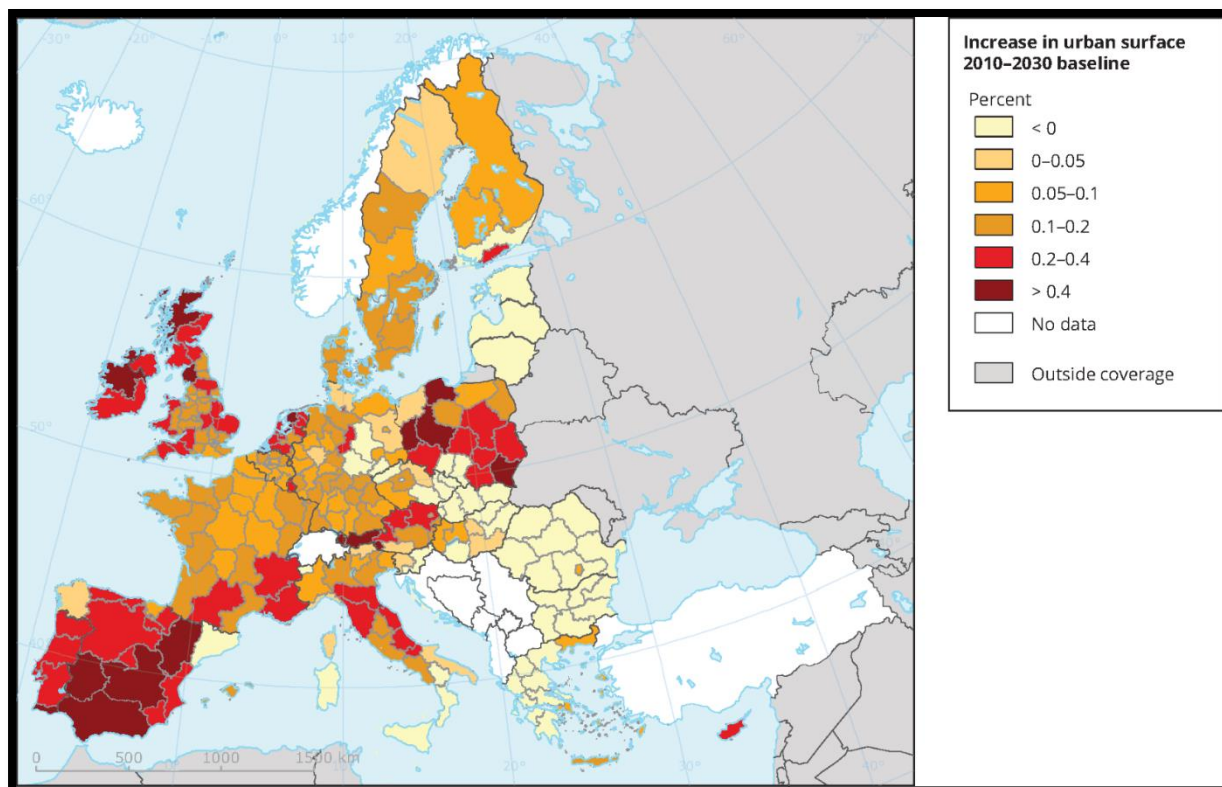


Figure 2 : Accroissement des surfaces artificialisées sur le sol européen entre 2010 et 2030 (Source : European Environment Agency, 2016)

L'imperméabilisation est vectrice du dérèglement de nombreuses fonctions naturelles des sols urbains, telle que la fonction de fertilité pour les services de production alimentaire, de préservation de la biodiversité et d'amélioration du paysage, et surtout de la fonction d'infiltration pour gérer les eaux pluviales.

## ii. Besoin de gestion des eaux pluviales

La réponse au besoin de gestion des eaux pluviales a durant de nombreuses années été l'imperméabilisation intentionnelle des sols, puis la collecte de ces eaux et son acheminement à l'exutoire au moyen d'un réseau de canalisations souterrain. Toutefois, avec la croissance des aires urbaines, les masses d'eau et les réseaux de collecte et d'acheminement des eaux pluviales (EP) ont atteint des dimensions posant un certain nombre de problèmes :

- Tout d'abord, la concentration des flux à l'exutoire par les réseaux entraîne une modification du régime des rivières ainsi qu'une pollution accrue par l'acheminement massif à l'aval de la zone urbanisée des eaux de lessivage des surfaces imperméabilisées.
- La concentration des flux génère aussi une augmentation du risque d'inondation par débordement en cas d'événement dont l'intensité dépasse celle prévue par le dimensionnement du réseau.
- Les réseaux d'évacuation des eaux pluviales en milieu urbain sont aussi une source de nuisances. En effet, le transit de volumes importants d'eaux de ruissellement est vecteur d'odeurs incommodantes pour les riverains. De plus, leur entretien nécessite de lourds travaux en surface générant nuisances sonores et perturbation de la circulation.

- Enfin, les nuisances associées aux travaux ne sont que la partie visible des problèmes qu'entraîne la maintenance de ce mode de gestion des eaux pluviales, puisque le fait que les réseaux soient enterrés et donc invisibles les rend difficiles à maintenir. Ainsi, les coûts d'exploitation et de réhabilitation sont très élevés, et la maintenance est le plus souvent maintenue au strict minimum.

### *iii. Techniques alternatives de gestion des eaux pluviales*

Les concepts de "gestion intégrée des eaux pluviales" et de "techniques alternatives de gestion des eaux pluviales" se sont développées en réponse à l'urbanisation des territoires et à l'imperméabilisation progressive des sols (AELB-Sepia, 2013), dans l'objectif de rendre la ville plus "perméable". Ces techniques alternatives aux réseaux de collecte ont vocation à réduire les débits de pointes générés par les pluies et à traiter les volumes d'eau entrants à la source, en privilégiant leur infiltration sur place. Elles réduisent à la fois les débits et hauteurs des lames d'eau transférés par ruissellement sur les surfaces imperméabilisées et atténuent donc les crues. Ainsi, la quantité d'eau acheminée à l'exutoire par le réseau de collecte des eaux pluviales est nettement réduit, de même que les risques de saturation des canalisations. Cela diminue ainsi le besoin de continuellement prolonger et remettre à niveau le réseau de canalisations souterraines pour drainer des surfaces urbaines toujours plus importantes et absorber des pluies plus intenses.



Figure 3 : Vue d'artiste d'un espace intégrant des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales : Berges du lac, Bordeaux – Christian DEVILLERS

Les techniques dites alternatives sont de fait devenues la norme dans les grands espaces urbains. On a constaté en très peu de temps une augmentation considérable du nombre

d'ouvrages correspondants, ainsi qu'une grande diversité sans pour autant connaître les différences de performances de chacun de ces types d'ouvrages.

#### *iv. Typologie des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales*

Parmi la grande diversité de nouveaux ouvrages développés pour une gestion alternative des eaux pluviales, on compte la famille des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales (CERTU, 1998). Cette étude s'intéresse majoritairement aux ouvrages suivants :

##### **- Les bassins d'infiltration des eaux pluviales**

Parmi les bassins d'infiltration, on distingue les bassins en eau, qui conservent une lame d'eau en permanence, et les bassins secs, qui sont vides la majeure partie du temps. Les bassins d'infiltration peuvent se présenter sous des aspects très divers, et avoir d'autres fonctions que le stockage de l'eau (terrains de sport, lieux de promenades...). Un bassin d'infiltration peut aussi être équipé, à l'amont, d'un bassin de décantation dont le rôle est de dépolluer l'eau avant son infiltration.

Les bassins d'infiltration sont situés à l'exutoire d'un ouvrage d'arrivée d'eau. Lors d'un événement pluvieux, ils doivent être capables de stocker l'eau le temps de l'événement, puis de la restituer progressivement à la nappe par infiltration dans le sol.

La mise en place d'un bassin est généralement la réponse aux besoins de gestion des eaux pluviales de surfaces assez étendue. Ainsi, il est commun que les bassins d'infiltration soient mis en œuvre pour accueillir les eaux pluviales à l'échelle d'un quartier ou d'une zone d'activité.

##### **- Les noues d'infiltration**

Une noue est un fossé large et peu profond, disposant de rives en pentes douces. Sa fonction principale est de stocker l'eau issue d'un événement pluvial mineur, mais elle peut aussi canaliser un écoulement issu d'un événement pluvial plus important. Le stockage et l'écoulement de l'eau se font à l'air libre. L'eau peut être collectée dans la noue au moyen de canalisations (toitures, chaussées...) ou directement par ruissellement (terrains adjacents à la noue).

Les noues, tout comme les bassins, peuvent infiltrer l'eau directement, mais certaines d'entre elles disposent aussi d'un exutoire vers un réseau plus volumineux ou une autre TA. Sur les terrains présentant une pente forte, des cloisons peuvent être disposées au fond de la noue afin de réduire la vitesse de l'écoulement et ainsi de favoriser l'infiltration

Les noues sont traditionnellement des ouvrages de plus petite taille que les bassins d'infiltration, elles ne peuvent donc pas être utilisées pour la gestion des eaux pluviales à l'échelle d'un quartier. Leur morphologie les rend tout particulièrement adaptées à la collecte des eaux pluviales des infrastructures routières.

##### **- Les tranchées**

Une tranchée est un ouvrage en général étroit et peu profond servant à retenir les eaux pluviales. Contrairement aux noues, elle peut disposer d'un revêtement en

surface selon son usage. L'eau y est amenée par des avaloirs de collecte ou bien par infiltration à travers l'enrobé de surface si celui-ci est drainant.

Le principe d'infiltration de l'eau pluviale, pour les tranchées, est le même que pour les noues, et il est aussi possible d'équiper une tranchée de cloisons pour les mêmes raisons.

Leur morphologie permet aux tranchées, tout comme aux noues, d'être utilisées pour la collecte de l'eau issue du ruissellement sur les voiries. Toutefois, la possibilité de leur adjoindre un revêtement de surface en fait aussi de bonnes candidates pour l'infiltration des eaux pluviales sur de petites parcelles, telles que des parkings.

#### - **Les puits**

Les puits sont des excavations profondes et étroites. Ils sont utilisés lorsqu'il est nécessaire de creuser jusqu'à une profondeur importante pour atteindre les couches perméables du sol.

La morphologie des puits limite considérablement leur potentiel de collecte des eaux pluviales. Ainsi, ils sont le plus souvent associés à d'autres TA plus étendues. Le cas échéant, ces dernières permettront la collecte des eaux pluviales et leur acheminement jusqu'au puit, et celui-ci assurera le débit de fuite.

Les puits présentent l'avantage d'être des ouvrages simples de conception ne demandant que peu d'entretien, et disposant d'un très bon potentiel d'intégration au tissu urbain de par leur faible emprise au sol. Il est toutefois nécessaire d'être prudent dans leur utilisation, car une infiltration par un ouvrage plus proche de la nappe implique un risque accru de polluer cette dernière.

#### - **Les chaussées à structure réservoir**

La particularité des chaussées à structure réservoir est qu'elles ont pour but principal le support de la circulation en surface. L'infiltration des eaux pluviales est une de leurs fonctions secondaires. Le ruissellement de l'eau se fait par les vides des matériaux constituant la chaussée jusque dans un réservoir aménagé dans le corps de la chaussée.

L'évacuation des eaux peut ensuite se faire comme pour la tranchée et la noue, vers un exutoire plus important ou directement par infiltration par le sol.

La chaussée à structure réservoir présente l'avantage de s'insérer sans consommer d'espace en milieu urbain, elle diminue considérablement les risques de flaques sur la chaussée et procure ainsi une meilleure adhérence pour les usagers. Toutefois, son usage peut se révéler compliqué notamment l'hiver, et un colmatage requérant un lavage par jets à haute pression peut rapidement survenir.

#### - **Les toitures végétalisées**

Les toitures végétalisées sont un exemple un peu particulier de techniques alternatives. Elles consistent en la pose d'un substrat végétalisé sur le toit d'un bâtiment. Cette technique a pour objectif de réduire le ruissellement immédiatement à la source en offrant un espace de stockage de l'eau. Une fois l'événement pluvieux terminé, l'eau sera ensuite évacuée par évaporation ou évapotranspiration. Pour un événement pluvieux plus intense, le substrat dispose d'une couche de drainage servant à évacuer l'excès d'eau ne pouvant être stocké vers les gouttières.

Les toitures végétalisées sont des techniques relativement compliquées à mettre en œuvre, elles nécessitent un toit plat ou en pente très faible et l'utilisation d'un substrat très léger et peu compact afin de ne pas engendrer une surcharge trop importante sur la structure. Elles offrent cependant des utilisations secondaires intéressantes, comme la possibilité d'aménager la toiture en jardin.

Les toitures végétalisées sont réalisables seulement à l'échelle d'un bâtiment, et ne bénéficient pas de l'apport en eau d'un bassin versant. Leur utilisation est donc plutôt adaptée au traitement des eaux pluviales à l'échelle de la parcelle.

Tous ces ouvrages présentent aussi l'avantage de capter une partie de la pollution générée par lessivage des surfaces imperméabilisées et ainsi de garantir la restitution d'une eau de meilleure qualité à la nappe (**Revue set gpi assainissement réseaux, 2016**).

#### b. Connaître pour entretenir

« *La gestion patrimoniale (GP) dans le secteur de l'eau peut être décrite comme gérer l'ensemble des éléments d'une infrastructure pour minimiser le coût total de possession et maintenance, tout en fournissant le niveau de service attendu par les usagers* » (**Schulting, F. L. and Alegre, H., 2007**). La gestion patrimoniale d'un ouvrage est donc fortement liée à la prise en compte de ses dysfonctionnements, de l'évolution de ses performances au cours du temps ou encore de l'impact des pratiques d'entretien de ses gestionnaires. Elle doit donc afin d'être efficace bénéficier d'outils de planification et de gestion à long terme en adéquation avec ses exigences et ses objectifs.

L'apparition des techniques alternatives étant relativement récente dans l'histoire de l'assainissement et du traitement des eaux pluviales, les gestionnaires de ces ouvrages manquent parfois des connaissances et du recul nécessaire afin d'adopter des pratiques d'entretien adéquates. L'étude menée par **Thomas et al.** en Australie a montré que sur huit collectivités interrogées au sujet de l'entretien de leurs Tas, seules trois « *ont été capables de fournir des données sur l'état de leurs ouvrages.* » Cela est d'autant plus marqué que chaque ouvrage, de par son environnement et sa conception, risque de rencontrer des problèmes très différents des autres, et requerra donc une prise en charge adaptée de son entretien.

Les différences dans le fonctionnement des ouvrages de gestion des eaux pluviales peuvent être dues, dans un premier temps, à des différences structurelles d'une TA à l'autre. La présence ou l'absence d'un bassin de décantation, de végétation, etc, entraîne des comportements hydrauliques différents, et les causes pouvant entraîner des baisses de performances sont aussi nombreuses qu'il y a de façons de concevoir un ouvrage. Le second facteur déterminant dans le fonctionnement des TA est le terrain sur lequel elles sont positionnées. La conductivité hydraulique, la pente, la nature du sous-sol et celle des activités pratiquées en surface du bassin versant sont autant de caractéristiques qui influent sur l'acheminement et l'infiltration de l'eau (**ANR, 2014**)

D'après **Cherqui et al. (Revue set n°20)** « *cette complexité nécessite donc une nouvelle organisation et coordination au sein des collectivités.* » Ainsi, il semble nécessaire pour optimiser le fonctionnement des TA d'adapter leur entretien en fonction des besoins de ces derniers et des contraintes qu'impose leur environnement. Pour cela, il nous faut parfaire notre connaissance des techniques alternatives afin de parvenir à identifier les pratiques d'entretien à mettre en œuvre pour garantir le bon fonctionnement de ces dernières.



c. Modéliser pour connaître

La modélisation permet de simuler le fonctionnement d'un ouvrage. Cela s'avère utile pour tester plusieurs stratégies de maintenance et en examiner les conséquences sur les performances de l'ouvrage. Cependant, le modèle devra satisfaire plusieurs conditions afin d'être utilisables aux fins décrites précédemment.

Tout d'abord, la diversité et la généralisation rapide de l'utilisation des techniques alternatives dans la gestion des eaux pluviales impose un système de modélisation flexible. Il devra non seulement permettre la simulation de deux ouvrages similaires soumis à un environnement différent, mais aussi la modélisation d'ouvrages structurellement très différents les uns des autres.

Le modèle a de plus vocation à être utilisable directement par les gestionnaires des TA, tant pour régler une situation problématique constatée sur l'ouvrage que pour prévoir l'évolution de ses performances. Le modèle devra donc rendre compte des interactions entre les différents équipements de l'ouvrage afin de procurer au gestionnaire la connaissance fonctionnelle de son ouvrage. Cela lui permettra notamment d'identifier les principaux leviers d'action permettant de solutionner les dysfonctionnements rencontrés sur son ouvrage. Il devra de plus anticiper l'évolution des performances avec le temps, et ainsi guider son utilisateur dans l'ajustement des pratiques d'entretien afin de garantir le bon fonctionnement de son ouvrage. Enfin, le modèle devra être accessible par tous les gestionnaires et ainsi proposer une interface simple et intuitive.

d. Limites de la modélisation classique

La modélisation traditionnelle, dite « analytique », vise à approcher le comportement d'un ouvrage à l'aide d'équations décrivant les phénomènes physiques mis en œuvre. Dans le cas d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales, il s'agira par exemple de modéliser le comportement hydraulique de l'ouvrage en prenant en compte les flux entrants liés à la pluie, le stockage et les flux sortants par évaporation, évapotranspiration (végétation), déversement ou infiltration. Ce type de modélisation pose cependant différents problèmes lorsque l'on considère le fonctionnement à long terme de ces ouvrages et leur entretien.

Comme nous l'avons déjà évoqué, le parc des techniques alternative de gestion des eaux pluviales est composé d'une multitude d'ouvrages très différents (taille, composition, forme...), et développer des modèles numériques pour chacun d'entre eux demanderait un temps considérable. De plus, un changement dans l'environnement de l'ouvrage ou dans sa structure rendrait le précédent modèle obsolète. Le second inconvénient de ce type de modélisation réside dans la prise en compte de l'évolution temporelle des ouvrages (pousse de la végétation, comblement progressif par les sédiments...) et l'intégration des pratiques d'entretien ou des connaissances que possèdent les gestionnaires de leur ouvrage est plus compliquée, car ce ne sont pas nécessairement des données quantifiables et intégrables à un modèle analytique. Ce type de modélisation devient en effet limité quand il s'agit de prendre en compte des systèmes moins « maîtrisés » comme les systèmes vivants (par exemple, croissance de la végétation et impact sur les performances de l'ouvrage), les systèmes sociaux (par exemple liés à la fréquentation des ouvrages par les publics urbains, ou aux pratiques d'entretien).

Enfin, la complexité des modèles analytiques impose aux gestionnaires ne disposant pas directement de la compétence informatique nécessaire d'avoir recours à un intermédiaire pour la simulation et l'exploitation des résultats. Il est par conséquent nécessaire de trouver une alternative à la modélisation classique afin de pouvoir satisfaire aux exigences décrites dans la partie précédente.

Cette étude choisit d'étudier la modélisation dite « systémique » comme alternative possible à la modélisation analytique dans l'aide à la décision et à la gestion patrimoniale des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. Cette forme de modélisation propose une approche radicalement différente de l'approche classique citée auparavant, et fera l'objet d'une description détaillée dans la deuxième section de ce rapport.



## II- Approches de la modélisation systémique

### a. Fondements de la systémique

L'approche systémique prend sa source dans la prise de conscience d'une complexification progressive du monde et notamment des systèmes qui le composent. Un système peut être défini comme « *un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but.* » (Cambien, 2007)

La systémique a pour objectif de fournir des outils permettant la compréhension de systèmes de plus en plus complexes. Elle repose sur une méthodologie de représentation intégrant les composants du système, l'environnement de ce dernier et les échanges de matériau et d'information existant entre ces composants. Ces représentations, bien qu'elles doivent être les plus exhaustives possible afin d'être fidèles à la réalité du système, doivent être suffisamment lisibles pour faciliter son appréhension.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement et la méthodologie de la modélisation systémique, nous allons commencer par établir une comparaison entre cette dernière et l'approche « classique » analytique.

### b. Confrontation entre les approches analytique et systémique

Avant de nous pencher sur le fonctionnement même de la modélisation systémique, il est essentiel d'identifier ses principales différences avec l'approche classique.

#### i. Dichotomie analytique/système

Contrairement à la démarche analytique, qui permettra la compréhension détaillée et la plus exacte possible de chaque composant d'un système, la démarche systémique cherche à se concentrer sur les liens et les interactions qui régissent le fonctionnement du système tout entier. Elle ne recherche pas la précision absolue sur les origines des interactions ou sur les détails du fonctionnement des composants individuellement, mais entend donner une connaissance opérationnelle découlant de la perception globale du système en action. Comme la modélisation analytique, la systémique permet d'intégrer la durée, l'évolution au cours du temps des caractéristiques du système et ainsi de prendre en compte l'irréversibilité de certains phénomènes mais cette dernière permet également de modifier simultanément des groupes de variables tout en conservant la cohérence du système, ce que la modélisation analytique ne permet de faire que pour des systèmes très simples. Dans l'objectif de modéliser des systèmes de très haute complexité, la systémique se révèle donc être l'outil le plus adapté.

Cette dichotomie entre approche analytique et approche systémique est résumée par le systémicien **Joël DE ROSNAY (1975)** :

<b>Approche analytique</b>	<b>Approche systémique</b>
Isole : se concentre sur les éléments.	Relie : se concentre sur les interactions entre les éléments.
Considère la nature des interactions.	Considère les effets des interactions.
S'appuie sur la précision des détails.	S'appuie sur la perception globale.
Modifie une variable à la fois.	Modifie des groupes de variables simultanément.
Indépendante de la durée : les phénomènes considérés sont réversibles.	Intègre la durée et l'irréversibilité.
La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie.	La validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité.
Modèles précis et détaillés, mais difficilement utilisables dans l'action (exemple : modèles économétriques).	Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base aux connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action (exemple : modèles du Club de Rome).
Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles.	Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes.
Conduit à un enseignement par discipline (juxta-disciplinaire).	Conduit à un enseignement pluridisciplinaire.
Conduit à une action programmée dans son détail.	Conduit à une action par objectifs.
Connaissance des détails, buts mal définis.	Connaissance des buts, détails flous.











Figure 4 : Comparaison entre approche analytique et approche systémique (source : Le Macroscopie Joël DE ROSNAY 1975)

L'approche systémique permet donc de solutionner un certain nombre de problèmes posés par l'approche analytique. Elle a toutefois ses limites, et il est essentiel de garder à l'esprit que la systémique ne peut remplacer le raisonnement analytique, elle ne fait que le compléter. Il est donc nécessaire pour développer un modèle pertinent de concilier la vision statique adaptée à la modélisation des systèmes simples avec la vision dynamique nécessaire au développement d'un modèle systémique complexe.

## ii. Vision statique et vision dynamique

La constitution d'un modèle systémique requiert d'adopter une vision dynamique du système considéré. Afin de mieux appréhender les fondements de la vision dynamique, nous allons de nouveau effectuer une comparaison avec les outils de l'approche analytique au moyen du tableau suivant, lui aussi extrait du Macroscopie (DE ROSNAY, 1975).

Tableau 1 : Comparaison entre vision statique et vision dynamique (Extrait de : Le Macroscopie Joël DE ROSNAY 1975)

	Vision statique (systèmes simples)		Vision dynamique (systèmes complexes)
	Solide		Fluide
	Force		Flux
	Système fermé		Système ouvert
	Causalité linéaire : -Stabilité -Rigidité -Solidité		Causalité circulaire : -Stabilité dynamique -Etat stationnaire -Renouvellement continu
	Equilibre de forces		Equilibre de flux
	Comportement des systèmes : -Prévisible -Reproductible -Réversible		Comportement des systèmes : -Imprévisible -Irreproductible -Irréversible

On observe à nouveau une opposition entre les outils de l'approche analytique et ceux de l'approche systémique. Au contraire de la démarche analytique qui est conçue pour l'étude de forces agissant sur des solides en système fermé suivant une causalité linéaire, la vision dynamique facilite l'étude de flux d'éléments fluides dans des systèmes ouverts selon une causalité circulaire. Un modèle systémique cherche donc non pas l'atteinte d'un équilibre de forces, mais celui d'un équilibre de flux, et sera plus adapté pour la simulation de systèmes imprévisibles subissant des modifications irréversibles et irreproductibles.

### iii. Avantages et inconvénients de l'approche systémique

Tableau 2 : Analyse des avantages et inconvénients de l'approche systémique

Avantages	Inconvénients
Fournit des outils pour la représentation graphique des systèmes, favorisant ainsi leur modélisation qualitative	Il est possible de développer des boucles de causalité erronées
Facilite une modélisation flexible et transparente	Il est ainsi possible de développer des modèles erronés si on les base sur des boucles de causalité erronées
Facilite une compréhension du système dans sa globalité	Demande une grande expérience pour développer une description suffisamment complète du système
Fournit des schémas comportementaux et des tendances à long terme	Demande une approche interdisciplinaire pour corréliser les données les unes aux autres à cause de la multiplicité des sous-systèmes
Facilite une communication claire de la structure et des résultats du modèle	Présente une difficulté pour la quantification des sous-systèmes,

	notamment socio-économiques
Favorise une vision partagée du système	
Facilite l'analyse des points de défaillance	
Permet le choix des politiques de gestion	

iv. Applicabilité au sujet d'étude

Les ouvrages de gestion des eaux pluviales sont des systèmes complexes constitués de plusieurs systèmes simples interconnectés, l'approche systémique semble donc présenter un certain intérêt dans le cadre de leur étude.

La systémique propose de plus des modèles facilitant l'identification des conséquences potentielles de perturbation des systèmes considérés ainsi que la compréhension des points d'action privilégiés pour l'apport de solutions durables aux problèmes rencontrés. L'approche systémique présente en ce sens un intérêt opérationnel dont ne dispose pas la modélisation analytique. C'est cette même caractéristique de l'approche systémique qui lui permet de faciliter l'orientation des politiques de gestion.

Enfin, la systémique, en ce qu'elle ne s'appuie pas sur la précision des détails mais sur la perception globale du fonctionnement du système et des ordres de grandeur des relations entre ses composants, permet l'intégration de la connaissance des gestionnaires de l'ouvrage. En effet, cette dernière repose souvent sur une compréhension générale du système et de son fonctionnement, et se présente par conséquent sous la forme d'apports non quantifiables et donc impossibles à intégrer dans un modèle analytique.

c. Les différents modèles proposés par la systémique

Les outils fournis par la systémique permettent l'obtention de différents types de modèles, dont nous allons décrire les objectifs et évoquer les modes de conception.

i. Le modèle cognitif

Le modèle cognitif est le premier stade de la modélisation systémique. Il consiste en une représentation simplifiée d'un système composé exclusivement des composants qui lui sont essentiels.

Ce type de modélisation a pour seul et unique but de clarifier le fonctionnement d'un système complexe en rendant compte des interactions existant entre tous les composants. Les modèles obtenus ne peuvent être utilisés pour simuler numériquement le comportement de l'ouvrage, et leur principal objectif est de clarifier le fonctionnement des systèmes considérés en en donnant une vision épurée. A ce titre, ces modèles ne comportent pas de détail du fonctionnement interne de chaque composant afin de ne pas les encombrer outre mesure.

ii. Le modèle prévisionnel

Le modèle prévisionnel permet, à partir de la situation présente du système, de déduire son comportement futur.

Il peut être utilisé dans un premier temps à des fins de contrôle, pour anticiper l'évolution des performances de l'ouvrage au cours du temps et s'assurer de sa viabilité sur le long terme, ou anticiper les potentielles défaillances rencontrées en l'état actuel de maintenance de l'ouvrage. Le cas échéant, le modèle pourra être utilisé pour tester différents scénarii et constituera ainsi un moyen de tester l'efficacité de diverses stratégies d'entretien concernant l'ouvrage.

Il s'agira contrairement au cas précédent d'un modèle qui devra intégrer le comportement de chacun de ses éléments constitutifs séparément, et son influence sur les autres éléments. Ce type doit permettre, moyennant un paramétrage initial, d'effectuer une simulation rendant compte de l'évolution temporelle de ses caractéristiques.

### *iii. Le modèle décisionnel*

Le modèle décisionnel est un outil d'aide à la décision. Il doit permettre de fournir au décideur un certain nombre de schémas qui lui permettront de traiter le plus rapidement possible des problèmes en apparence très complexes ou des informations trop abondantes et/ou diverses.

Il doit être capable d'analyser intégralement les paramètres d'une situation donnée, et d'y associer une situation la plus similaire possible affiliée à un schéma d'action prédéfini. Il doit cependant être suffisamment exhaustif pour garantir l'efficacité des réponses apportées dans la situation précise rencontrée par son utilisateur. Un modèle satisfaisant ces conditions facilitera au gestionnaire de l'ouvrage l'adaptation de la gestion de l'ouvrage dans le but d'en optimiser les performances sur le long terme.

### *iv. Le modèle normatif*

Le modèle normatif est une forme plus poussée du modèle décisionnel. Il s'agit donc aussi d'un outil d'aide à la décision, mais celui-ci sera plus adapté au cas de la gestion d'une situation de crise.

Ce type de modèle est beaucoup plus contraignant et directif que le modèle décisionnel, et il est intéressant de le développer pour la gestion de situation à très fort enjeu, où il est nécessaire d'apporter une réponse bien précise à chaque configuration envisageable du système. Un modèle normatif devra donc prendre en compte indépendamment chaque composant du système, et fournir une réponse unique et parfaitement adaptée à chaque configuration envisageable.

## d. Processus de modélisation

Avant toute chose, il sera nécessaire de définir le plus clairement possible la finalité du modèle, les sorties attendues et leur potentielle utilité pour les gestionnaires. Il est aussi essentiel de fixer les frontières du système que l'on souhaite considérer, afin de limiter le nombre de sous-systèmes à détailler. Tout ce qui n'est pas compris à l'intérieur des frontières du système sera uniformément considéré comme le milieu extérieur.

Dans un second temps, il s'agira de représenter le modèle, en choisissant ses éléments et en définissant leurs interactions. Durant cette étape, nous agencerons le modèle de manière à le rendre le plus lisible possible.

Il est ensuite nécessaire de déterminer le comportement du modèle, en fixant les invariants, les contraintes et les variables que nous pourrions modifier afin d'observer le comportement du modèle dans différentes configurations.

Enfin, la dernière étape consiste en la simulation du modèle afin d'en déterminer la cohérence. Il existe deux types de simulations possibles afin de confirmer l'efficacité du modèle : la simulation heuristique et la simulation algorithmique. La simulation algorithmique peut être utilisée pour perfectionner le modèle en quantifiant plus précisément les relations entre les éléments du système. La simulation heuristique quant à elle consiste en la recherche de tous les scénarii possibles, et notamment les scénarii extrêmes, afin de tester le modèle et d'en valider le comportement pour toutes les situations possibles.

### *i. Ordre de conception*

Bien que chaque modèle évoqué précédemment dispose d'un rôle différent, ils n'en sont pas pour autant indépendants les uns des autres. Nous allons ici tenter d'établir un ordre de conception optimal dans le cas où chacun de ces modèles doit être développé.

Le modèle cognitif constitue la première étape de modélisation du système. Il s'agit d'une simple description du système, de ses équipements et des interactions qui les lient. Développer le modèle cognitif avant les autres permettra de mieux appréhender la constitution du système, le rôle de chacun de ses composants et les flux principaux qui en régissent le fonctionnement.

Le modèle prévisionnel s'impose comme seconde étape de notre modélisation. Il consistera en l'ajout d'éléments de modélisation secondaires ainsi qu'en l'affinement de toutes les interactions du système. Il s'agira ensuite de quantifier le comportement de chaque sous-système ainsi que les flux les reliant les uns aux autres, afin d'obtenir un modèle fonctionnel capable d'opérer des simulations numériques.

Si le modèle décisionnel ne vient qu'après le modèle prévisionnel, c'est que son efficacité dépend considérablement de ce dernier. En effet, les données de sortie du modèle prévisionnel seront les paramètres d'entrée du modèle décisionnel. Celui-ci devra être en mesure de lire les résultats fournis et de les interpréter pour en déduire la réponse adaptée à fournir au gestionnaire.

Enfin, le modèle normatif ne sera à développer qu'en dernier recours, pour traiter le cas particulier des situations de crise.

### *ii. Éléments structurels d'un modèle*

**Éléments structurels du modèle**

**Représentation graphique**





❖ Une limite servant à définir les frontières du modèle	
❖ Des éléments ou composants pouvant être dénombrés ou assemblés en familles	
❖ Des réservoirs dans lesquels les éléments peuvent être stockés comme de la matière, de l'énergie ou des informations	
❖ Un réseau de communication permettant d'échanger la matière, l'énergie ou l'information	
❖ Des sources fournissant les composants du système depuis l'extérieur Des puits extrayant les composants du système vers l'extérieur	

Figure 5 : Eléments structurels d'un modèle systémique

iii. Eléments fonctionnels d'un modèle



Eléments fonctionnels du modèle	Représentation graphique
❖ Des flux, modélisés par des débits	Q
❖ Des vannes contrôlant les débits	
❖ Des délais, résultant des différentes vitesses de circulation des éléments au sein du réseau	//
❖ Un temps de stockage dans les réservoirs résultant des délais de circulation	
❖ Des boucles d'information ou des boucles de rétroaction, permettant un feedback vers l'amont et ainsi une régulation du comportement du système	

Figure 6 : Eléments fonctionnels d'un modèle systémique

iv. Diagramme causal

Les diagrammes causaux sont l'outil le plus élémentaire de la modélisation systémique. Il s'agit d'un diagramme rendant compte des connexions entre les éléments d'un système ainsi que de leur nature. Il existe deux types de relations causales possibles :

- Relation causale positive



Tout changement dans l'état de la variable A entraîne un changement dans le même sens dans l'état de la variable B.

$$\frac{\partial A}{\partial B} > 0$$

- Relation causale négative



Tout changement dans l'état de la variable A entraîne un changement dans le sens inverse dans l'état de la variable B.

$$\frac{\partial A}{\partial B} < 0$$

Ces relations ne sont pas nécessairement quantifiées, elles ne servent qu'à donner une idée de toutes les interactions régissant le comportement des sous-systèmes les uns par rapport aux autres. Le diagramme causal d'un système sert aussi à identifier les boucles de rétroaction régissant le comportement du système.

#### v. Boucles de rétroaction

La modélisation d'un système suffisamment complexe peut entraîner l'apparition de boucles de rétroaction. Tout comme pour les relations causales, on observera deux types de boucles de rétroaction.

Les boucles de rétroaction positives apparaissent lorsque le changement dans l'état d'une variable entraîne par l'intermédiaire d'autres éléments un changement de cette même variable dans le même sens.



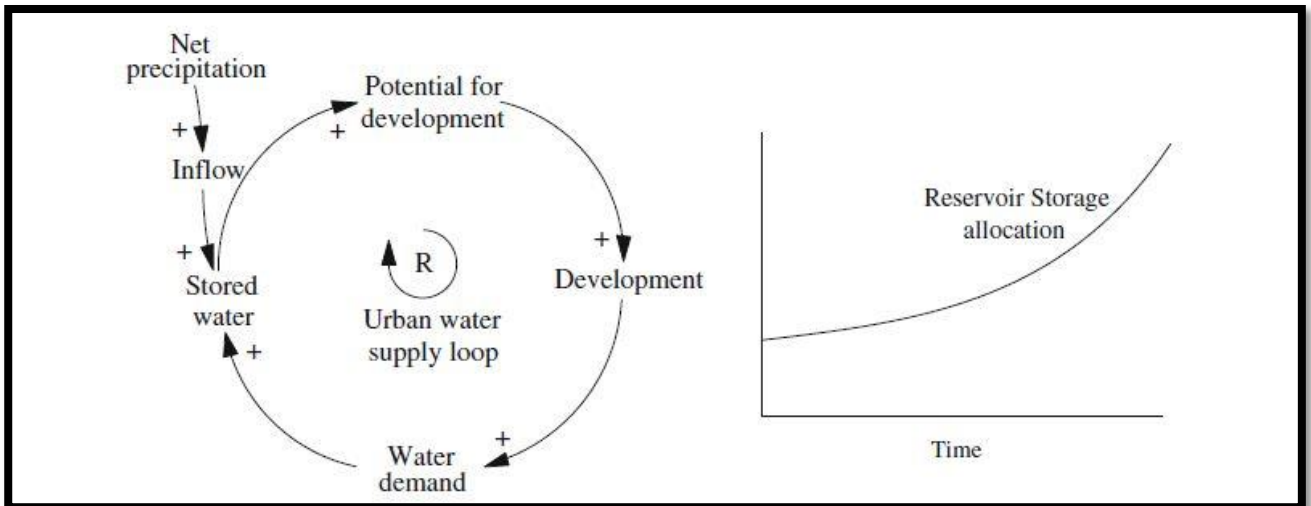


Figure 7 : Exemple d'une boucle de rétroaction positive – Volume d'un réservoir d'eau potable (Source : Mirchi et al., 2012)

Les boucles de rétroaction positives (**figure 7**) engendrent des variations dans les caractéristiques des variables concernées de plus en plus rapides au cours du temps et peuvent entraîner une explosion ou un effondrement du sous-système considéré.

Les boucles de rétroaction négatives apparaissent lorsque le changement dans l'état d'une variable entraîne par l'intermédiaire d'autres éléments un changement de cette même variable dans le sens inverse.

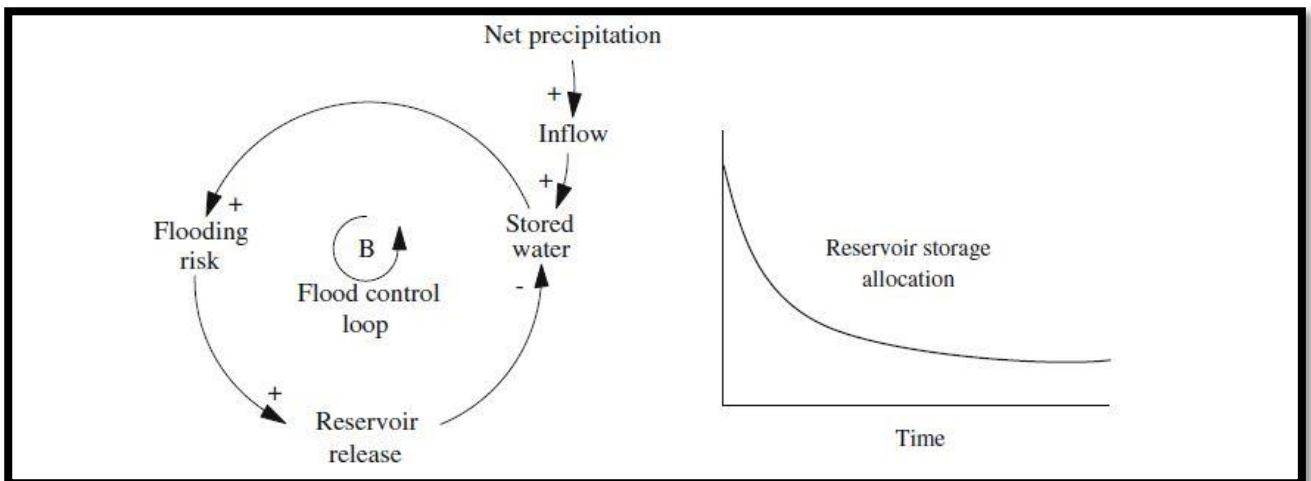


Figure 8 : Exemple d'une boucle de rétroaction négative – Volume d'un réservoir d'eau potable (Source : Mirchi et al., 2012)

Les boucles de rétroaction négatives (**figure 8**) engendrent des variations dans les caractéristiques des variables concernées de plus en plus lentes au cours du temps et entraînent une stabilisation du sous-système considéré autour d'une valeur optimale.

vi. Diagrammes flux-réservoirs

La seconde étape de la modélisation systémique consiste en l'établissement des diagrammes « flux-réservoirs » (**figure 9**). Ces derniers sont constitués de boîtes représentant les réservoirs dans lesquels pourront s'accumuler les éléments de flux du système. Ces éléments sont acheminés des sources aux réservoirs puis entre les différents réservoirs par les variables de flux, qui déterminent notamment l'intensité des débits considérés. Enfin, ces mêmes variables de flux peuvent être influencées par des variables d'états elles-mêmes interconnectées entre elles par des diagrammes causaux. On obtient ainsi des diagrammes semblables à celui représenté sur la figure suivante.

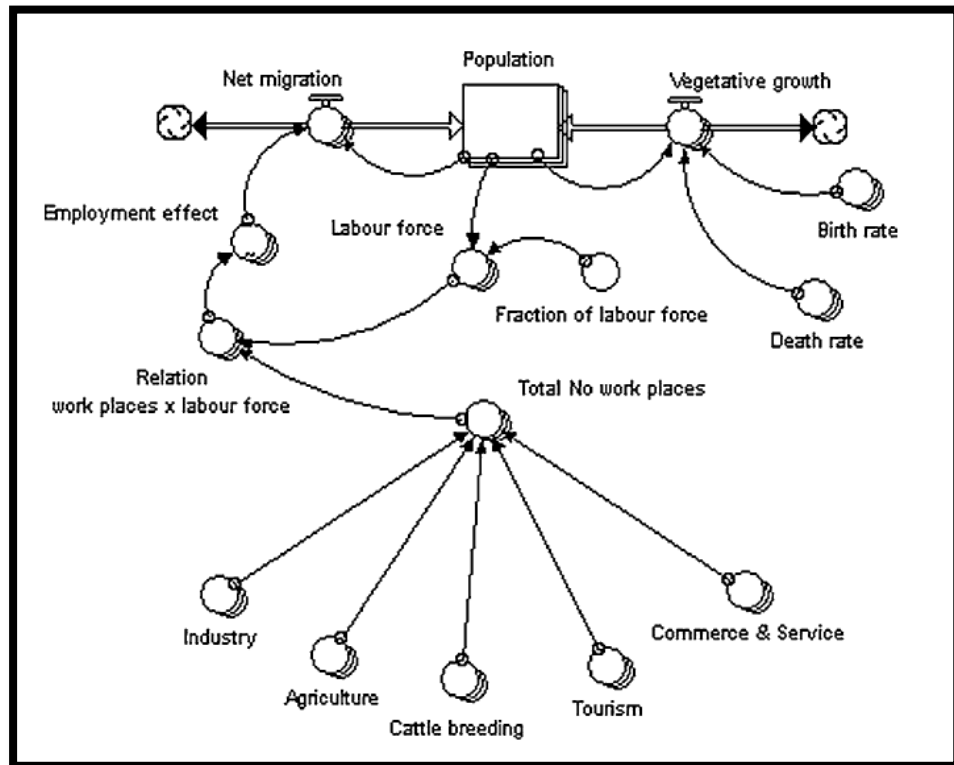


Figure 9 : Exemple de diagramme flux-réservoir (Source : Leal-Neto, 2006)

### vii. Comportement archétypaux des sous-systèmes

Les boucles de rétroaction présentent le plus souvent des comportements caractéristiques schématisés sur la **figure 10**.

Les comportements « Exponential growth » et « Goal seeking » ont déjà été identifiés à l'occasion de la partie précédente comme étant respectivement les résultats d'une boucle de rétroaction positive seule et d'une boucle de rétroaction négative seule.

Un comportement oscillatoire peut aussi être observé si les composantes correctives du sous-système considéré agissent avec un certain délai qui entraîne un va-et-vient autour de la valeur cible du système. Il est aussi possible d'obtenir une croissance en S dans l'éventualité où les composantes régulatrices du système finissent par prendre le pas sur les boucles de rétroaction positives seulement après le dépassement d'une valeur cible. Le comportement

« Oscillating overshoot » est une combinaison du comportement « Oscillation » et « S-shaped growth ».

Enfin, il existe un dernier cas qui concerne plus particulièrement les variables de stock. Il s'agit du comportement archétypal « Overshoot and collapse » au cours duquel on observera une croissance exponentielle dans un premier temps menant jusqu'à un pic après lequel la variable décroîtra. Ce genre de courbe peut être observée dans le cas où une ressource serait définitivement épuisée, ou un réservoir durablement rempli.

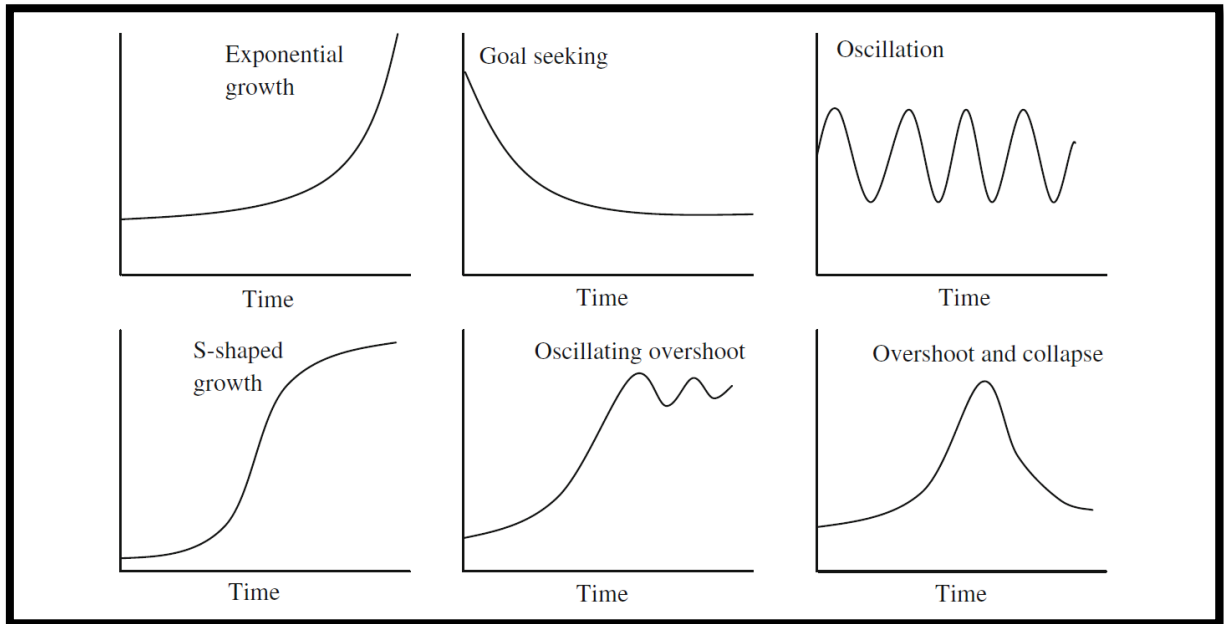


Figure 10: Représentations graphiques des comportements archétypaux de sous-systèmes (Adapté de : Sterman JD. - 2000)

### III- Modélisation d'un bassin de rétention-infiltration

L'ouvrage retenu pour l'élaboration des modèles cognitifs et prédictifs est le bassin de rétention-infiltration Django-Reinhardt qui a été instrumenté et suivi par l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU). Ce chapitre présente successivement :

- Les caractéristiques du bassin Django Reinhardt
- La justification du site choisi
- La définition des frontières d'étude
- Le modèle cognitif réalisé puis sa déclinaison en modèle prédictif
- L'analyse critique des résultats de simulation obtenus pour le site d'étude

#### a. Présentation du site Django-Reinhardt

##### i. Situation et caractéristiques du site

Le site Django Reinhardt est situé à Chassieu, dans la région lyonnaise, à l'exutoire d'une zone industrielle de 185 hectares dont le coefficient d'imperméabilisation est d'environ 70% (Gonzalez-Merchan, 2012). Il est composé d'un bassin de rétention-décantation imperméable de 32'000 m<sup>3</sup> et d'un bassin d'infiltration de 61'000 m<sup>3</sup> (figure 11).

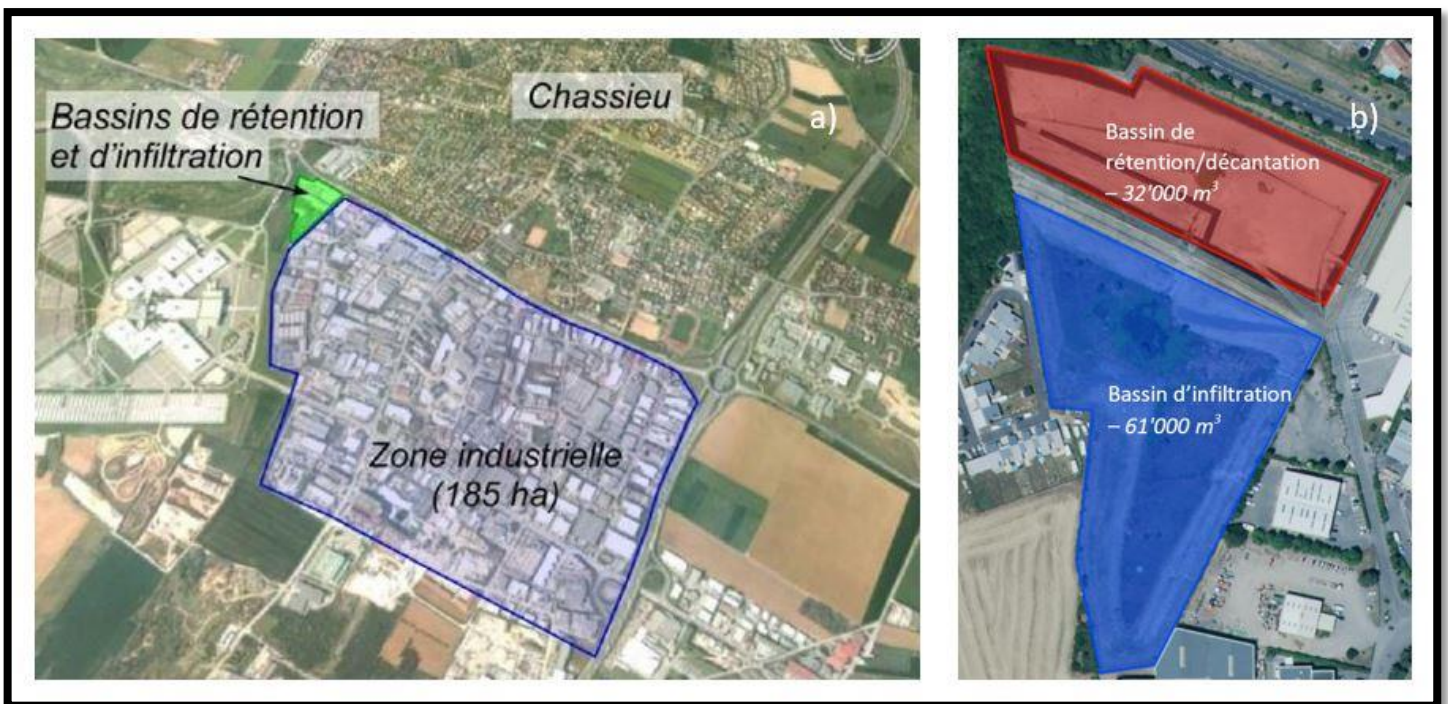


Figure 11: Localisation de l'ouvrage de rétention / infiltration Django Reinhardt : a) position par rapport au bassin versant de la zone industrielle (source : Goutaland, 2008), b) morphologies et volumes des deux bassins

Le fonctionnement de l'ouvrage est détaillé dans la **figure 12**. Les eaux pluviales sont d'abord drainées par un réseau de canalisations qui les acheminent jusqu'au bassin de rétention/décantation. Ce dernier sert de volume de stockage, permettant ainsi de réguler l'arrivée de l'eau dans le bassin d'infiltration, mais il a aussi pour vocation de permettre la sédimentation des matières en suspension ainsi que la séparation / décantation des hydrocarbures. Cette dernière est réalisée au moyen d'une cloison siphonide à l'exutoire du bassin de rétention.

Après son séjour dans le bassin de rétention, l'eau transite à travers un régulateur de débits vers le bassin d'infiltration où elle sera infiltrée vers la nappe sous-jacente. Le bassin d'infiltration dispose aussi d'une arrivée d'eau qui peut être utilisée en cas de maintenance ou de curage du bassin de rétention. Le cheminement préférentiel de l'eau à l'intérieur du bassin de rétention s'explique par la présence de cunettes de guidage de l'eau qui ont été conçues pour augmenter le temps de séjour de l'eau dans le bassin de rétention lors d'événements pluvieux de faible intensité.

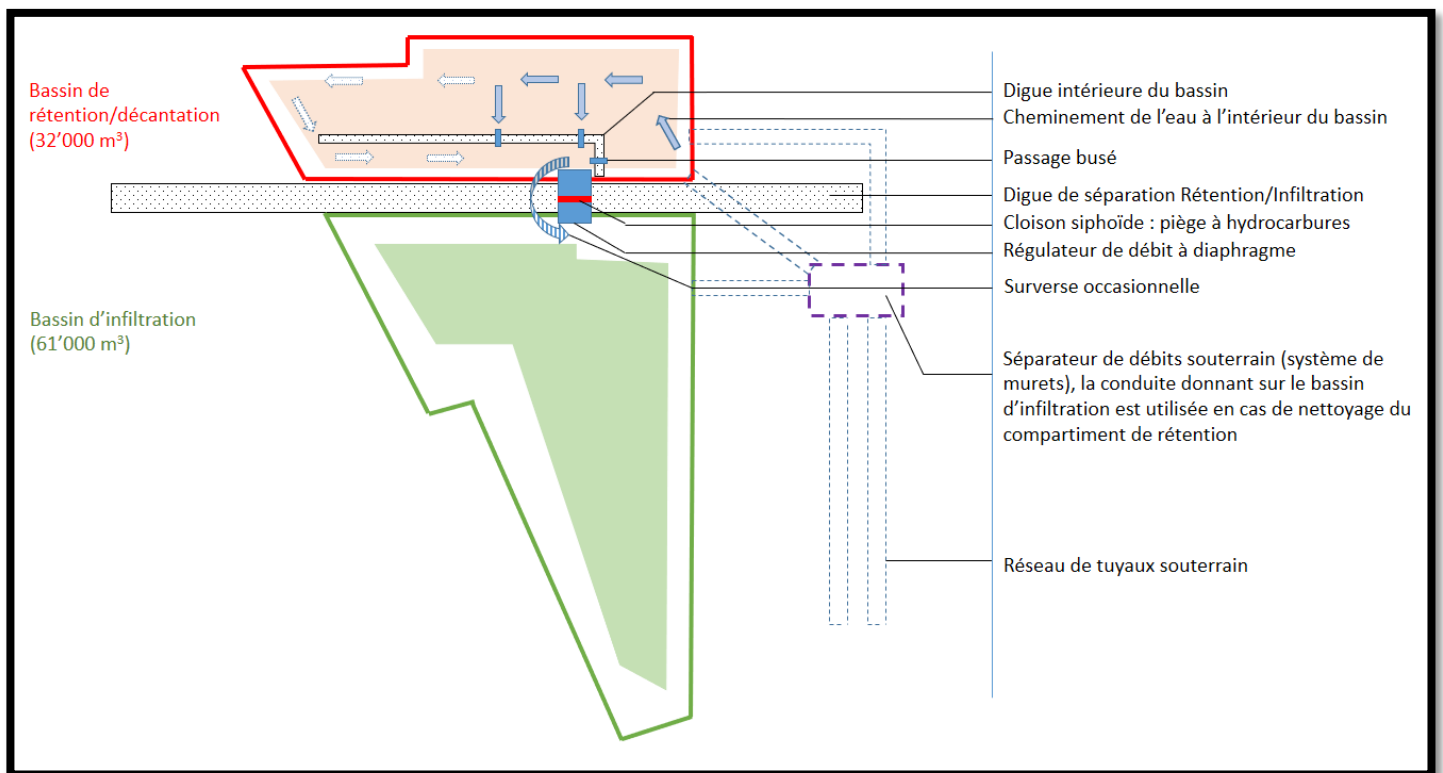


Figure 12 : Schéma de principe du fonctionnement du bassin Django-Reinhardt, Chassieu

## ii. Intérêts du site d'étude choisi

Les dimensions du bassin Django Reinhardt en font un ouvrage très volumineux et assez inhabituel dans le paysage des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. En effet, le parc des TA est majoritairement composé d'une multitude d'ouvrage de taille plus modeste drainant des bassins versants moins étendus. Toutefois, le choix de cet ouvrage s'est imposé pour deux raisons.

Tout d'abord, cet ouvrage présente l'intérêt d'avoir un compartiment spécifique pour la rétention des eaux pluviales et un compartiment spécifique pour leur infiltration : chaque compartiment pourra donc être modélisé indépendamment. Il dispose d'un grand nombre de dispositifs que l'on peut retrouver au niveau des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales tel qu'un séparateur d'hydrocarbure, et des régulateurs de débit. Une fois le modèle élaboré, il sera donc possible de l'adapter à de nombreux autres types d'ouvrages en le simplifiant.

Dernièrement, cet ouvrage est très bien documenté puisqu'il a fait l'objet de nombreuses études (**Annexe 6**) et de mesures en continu depuis 2000 des flux d'eau et de polluants entrant et sortant du bassin de rétention ([http://www.graie.org/othu/ptsite\\_2.htm](http://www.graie.org/othu/ptsite_2.htm)) et de relevés ponctuels de l'accumulation des sédiments ou d'évolution de la végétation (**Saulais, 2011**). Le bassin d'infiltration est muni d'une mesure en continu des débits, de la turbidité, de la conductivité électrique et de la température de l'eau en entrée. Un pluviomètre et un solarimètre sont aussi disposés sur le site (**Gonzalez-Merchan, 2012**). De nombreuses études ont de plus déjà été menées autour de ce bassin, et les résultats de ces dernières pourront permettre de vérifier la fonctionnalité et la cohérence du modèle. Cet ouvrage a également servi de support pour le master de **Dicanot (2016)**.

#### b. Définition des frontières du système à étudier

Etant donné que l'un des objectifs principaux est de permettre une évaluation de l'évolution de la performance de l'ouvrage, le système modélisé doit intégrer la couche filtrante ainsi que l'ensemble des constituants du bassin d'infiltration pouvant avoir une influence sur sa perméabilité (végétation, volume de stockage, couche de sédiments). L'entrée de l'eau dans le bassin d'infiltration se fait majoritairement par le bassin de rétention au moyen du régulateur de débit. C'est pourquoi le modèle doit intégrer l'ensemble des composants du bassin de rétention ainsi que les équipements permettant les transferts d'eau du bassin de rétention vers le bassin d'infiltration (surverse, régulateur de débits). Afin de déterminer la quantité et qualité de l'eau entrant dans le bassin de rétention, il faudra prendre en compte les caractéristiques du bassin versant, ainsi que le traitement subi lors du transport de l'eau via le réseau de canalisations.

La filtration des polluants par l'ouvrage de rétention-infiltration est l'un des critères principaux de son efficacité. Outre le traitement des sédiments, l'influence des composants agissant sur la concentration d'hydrocarbures dans l'eau ainsi que celle des composants de traitement des hydrocarbures (cloison siphonide) seront prises en compte.

Enfin, comme la finalité du modèle est d'aider la gestion patrimoniale de l'ouvrage, et non de prédire les flux d'eau et de polluants allant vers la nappe, l'étude se concentrera exclusivement sur le fonctionnement des bassins de rétention et d'infiltration et ne prendra donc pas en compte la nappe phréatique. En revanche, le modèle devra intégrer les opérations d'entretien et de maintenance opérées par le gestionnaire : curage, fauchage ou faucardage de la végétation, nettoyage des dégrilleurs, vidange de la cloison siphonide etc.

#### c. Finalités du modèle

#### *i. Finalité du modèle cognitif*

Le modèle cognitif a pour vocation de rendre compte le plus simplement possible du fonctionnement du système modélisant en précisant les influences relatives de tous les sous-systèmes inclus dans les frontières du modèle définies en partie b. Il servira aussi de base pour l'élaboration du modèle prédictif et devra donc être le plus exhaustif possible dans sa description des interactions entre les éléments du système modélisé.

Le modèle cognitif doit aussi être conçu de sorte à rester adaptable à d'autres types d'ouvrages plus simples en supprimant les composants qui ne sont pas présents sur ces ouvrages.

#### *ii. Finalité du modèle prédictif*

Le modèle prédictif doit permettre de modéliser le plus fidèlement possible le comportement de l'ouvrage modélisé. Il devra donc disposer d'un nombre suffisant de paramètres d'entrée pour permettre aux gestionnaires d'adapter le plus possible le modèle à une évolution de l'ouvrage ou de son environnement.

A ce stade d'élaboration du modèle prédictif, l'objectif est de vérifier qualitativement la pertinence globale des simulations, en particulier en surveillant l'évolution de certains paramètres de contrôle sur le long terme et différents scénarii d'entretien ou de maintenance de l'ouvrage. Le modèle prédictif intégrera donc une partie permettant de surveiller l'accumulation des sédiments ainsi qu'une partie permettant de surveiller l'accumulation des hydrocarbures dans l'ouvrage. Il devra aussi intégrer les opérations d'entretien des ouvrages et leurs actions sur les sous-systèmes. Il devra être conçu pour réaliser des simulations sur plusieurs années.

Le modèle prédictif devra lui aussi être adaptable à d'autres types d'ouvrages plus simples et ainsi proposer un paramétrage par défaut permettant de ne pas tenir compte des équipements qui ne sont pas présents sur ces ouvrages.

#### *d. Elaboration du modèle cognitif*

Le modèle cognitif a été réalisé à l'aide du logiciel Vensim PLP développé par la société Ventana Systems.

La **figure 13** permet de segmenter ce modèle en quatre blocs principaux : le bassin de collecte des eaux pluviales, le bassin de rétention-décantation, le bassin d'infiltration et les exutoires.

Les différents types de composants fonctionnels du système modélisé sont regroupés par catégories :

- **Les composants de collecte et d'acheminement de l'eau pluviale** représentés par des boîtes circulaires ;
- **Les composants de traitement**, représentés par des boîtes hexagonales. A chaque composant de traitement sera affilié un rôle (ex : dispositifs de rétention – *retenir les sédiments dans le bassin de rétention*) et une efficacité (ex : 0.5 – *les dispositifs de rétention permettent de retenir 50 % des sédiments contenus dans l'eau dans l'ouvrage*) ;

- **Les fonctions d'état de l'ouvrage**, le plus souvent caractérisées par des taux de variation, sont représentées par les boîtes rectangulaires.
- **Les composants de stockage quantitatif de l'ouvrage**, symbolisés par des boîtes triangulaires.

Un code couleur permet de distinguer à quel bloc de composant de l'ouvrage est attaché chaque composant du système :

- **En bleu : le bloc bassin de rétention (BR)** regroupant les composants et leurs interactions
- **En vert : le bloc bassin d'infiltration (BI)** regroupant les composants et leurs interactions
- **En rouge** : les diverses opérations de maintenance possibles ainsi que leurs actions sur les éléments de notre système.

Le cheminement de l'eau n'est affiché qu'à titre indicatif. Le modèle développé vise à représenter un comportement moyen annuel, même si le pas de temps est journalier, et n'est pas utilisable à l'échelle de l'événement pluvieux.

Le modèle cognitif réalisé est présenté en **figure 13** puis détaillé bloc par bloc dans les paragraphes suivants.



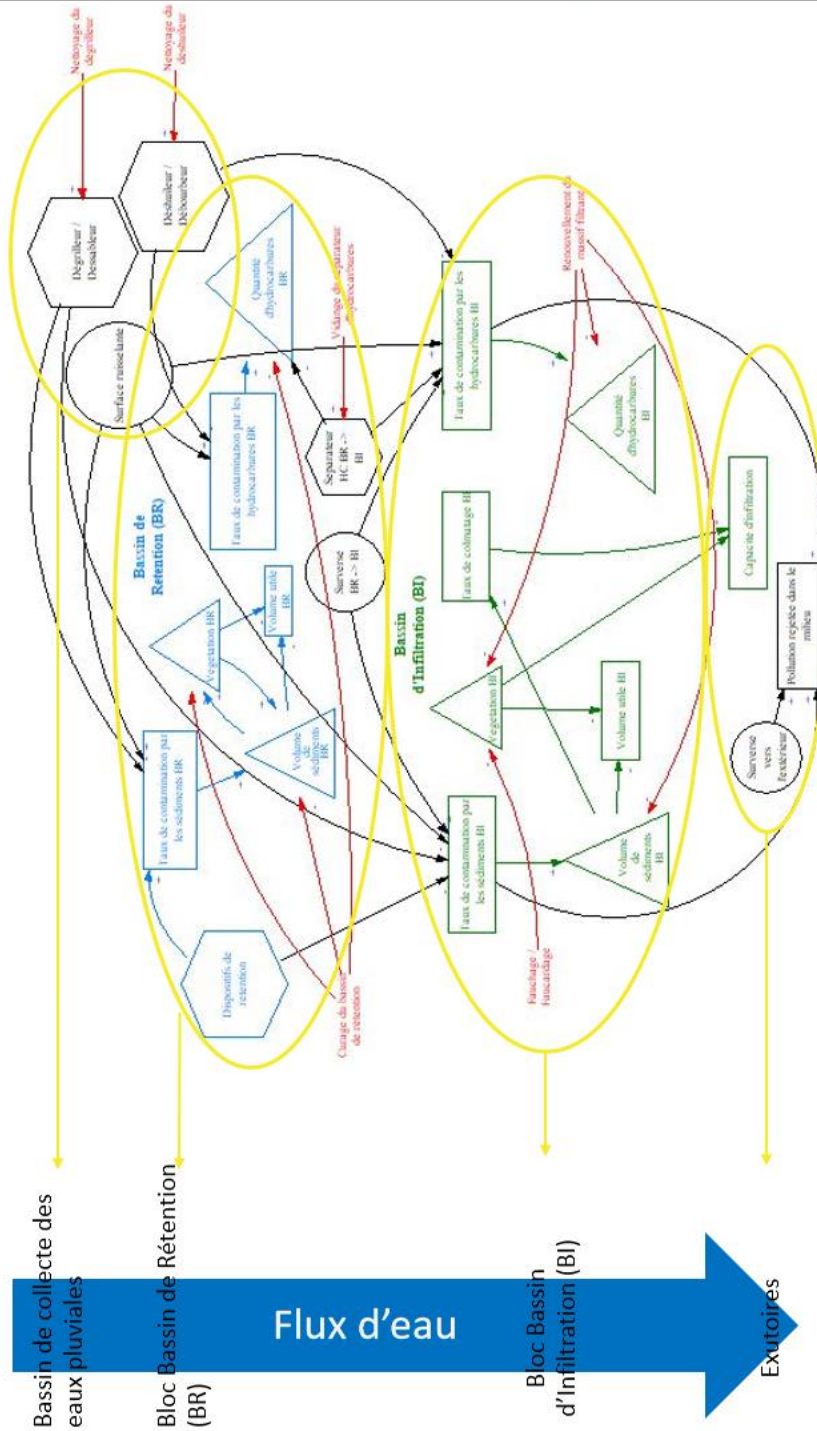
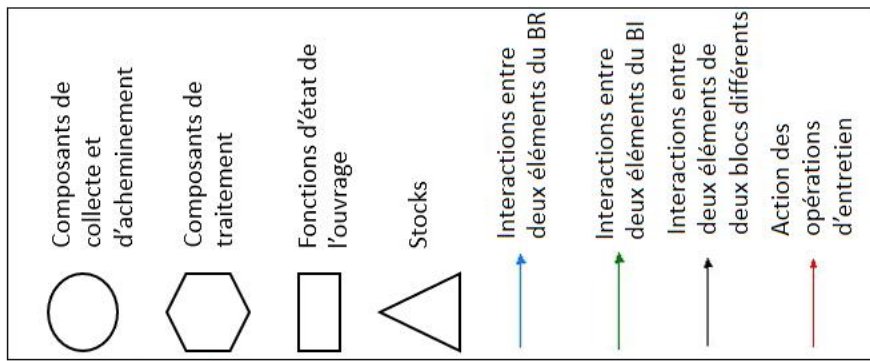


Figure 13: Modèle cognitif du bassin de rétention-infiltration Django Reinhardt – Version agrandie en annexe 3

i. Le bloc « dispositif de collecte des eaux pluviales » du modèle cognitif

La **figure 14** présente une vue détaillée du bloc relatif au dispositif de collecte des eaux pluviales, intégrée dans le modèle cognitif

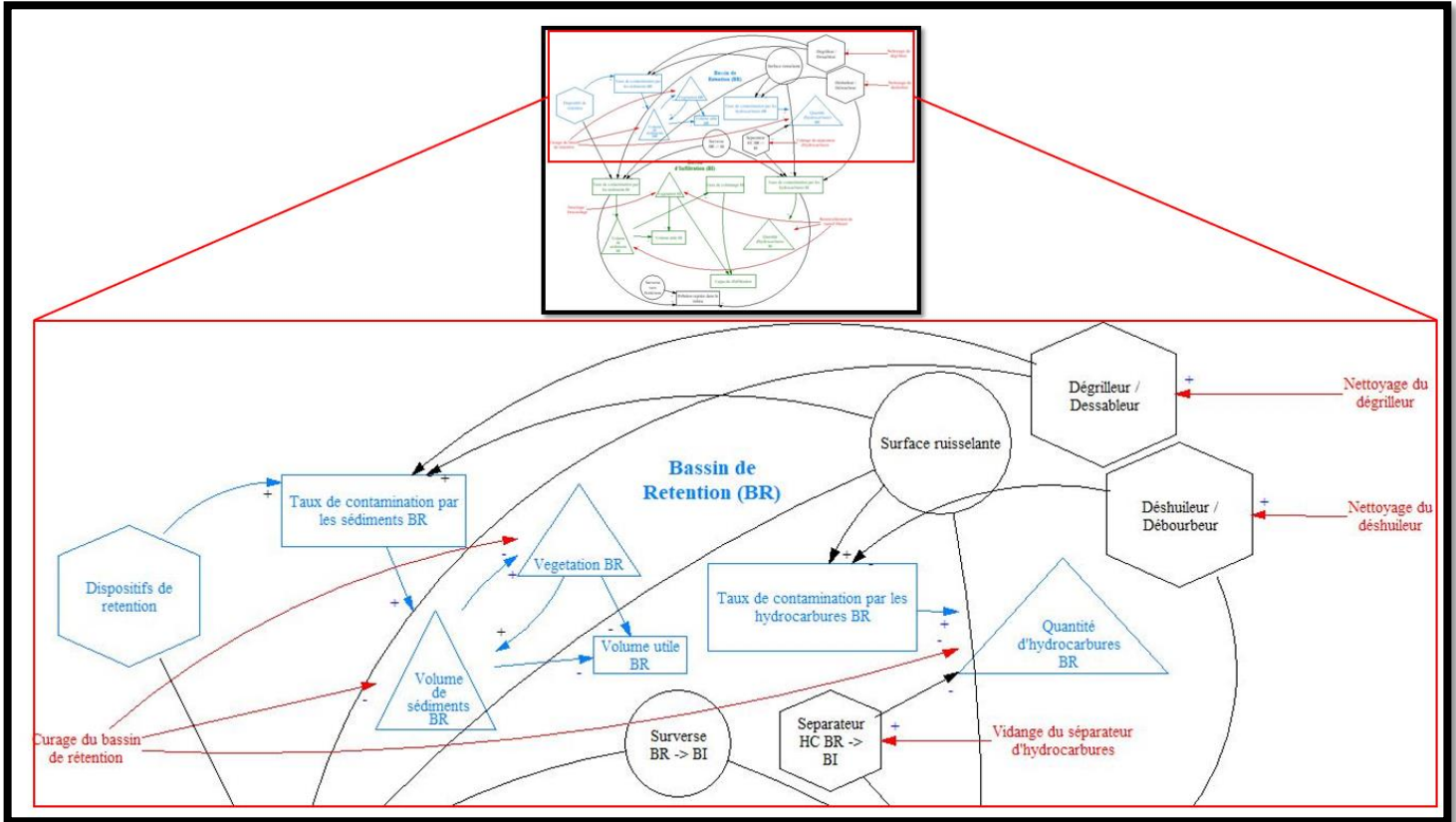


Figure 14 : vue détaillée des blocs correspondant au dispositif de collecte des eaux pluviales et au bassin de rétention

Le dispositif de collecte des eaux pluviales est composé d'une surface ruisselante, qui sera caractérisée par l'apport qu'elle fournit en sédiments et en hydrocarbures lors du ruissellement des eaux. On inclut aussi la possible présence d'équipements de déshuilage et de dégrillage (bouches de collecte des eaux pluviales...) auxquels sont associées les opérations d'entretien (nettoyage) en vue de restaurer leurs performances initiales.

ii. Le bloc « bassin de rétention » (BR)

Les composants du bloc contenant le bassin de rétention (noté BR) sont présentés dans la **figure 14**.

Tous les composants du bassin de rétention ayant pour vocation d'augmenter le temps de séjour de l'eau dans le BR (digue intérieure, cunette de guidage etc.) ont été regroupés sous l'appellation « Dispositifs de rétention ». Le bassin de rétention comporte trois fonctions d'état : le taux de contamination en sédiments de l'eau circulant, le taux de contamination par les hydrocarbures de l'eau et le volume utile restant. Enfin, ce bloc

comporte trois éléments de stockage : la densité de végétation, le volume de sédiments stockés et la quantité d'hydrocarbures accumulés.

Au bassin de rétention est affectée une opération d'entretien : le curage des sédiments accumulés dans le bassin. Cette dernière vient remettre à zéro les variables de végétation, de volume de sédiments et de quantité d'hydrocarbures dans le BR.

Le bloc bassin de rétention (BR) inclut deux éléments de transition qui le relient au bloc bassin d'infiltration (BI).

- Le séparateur à hydrocarbures qui vise à limiter le transfert d'hydrocarbures dans le bassin d'infiltration.
- Le composant « surverse » qui détermine la quantité d'eau qui sera transmise du BR vers le BI sans décantation ni traitement des hydrocarbures.

L'opération d'entretien « Vidange du séparateur d'hydrocarbures » permet la restauration des performances du séparateur d'hydrocarbures.

### iii. Le bloc « bassin d'infiltration » (BI)

La **figure 15** présente une vue détaillée du bloc relatif au bassin d'infiltration, intégrée dans le modèle cognitif

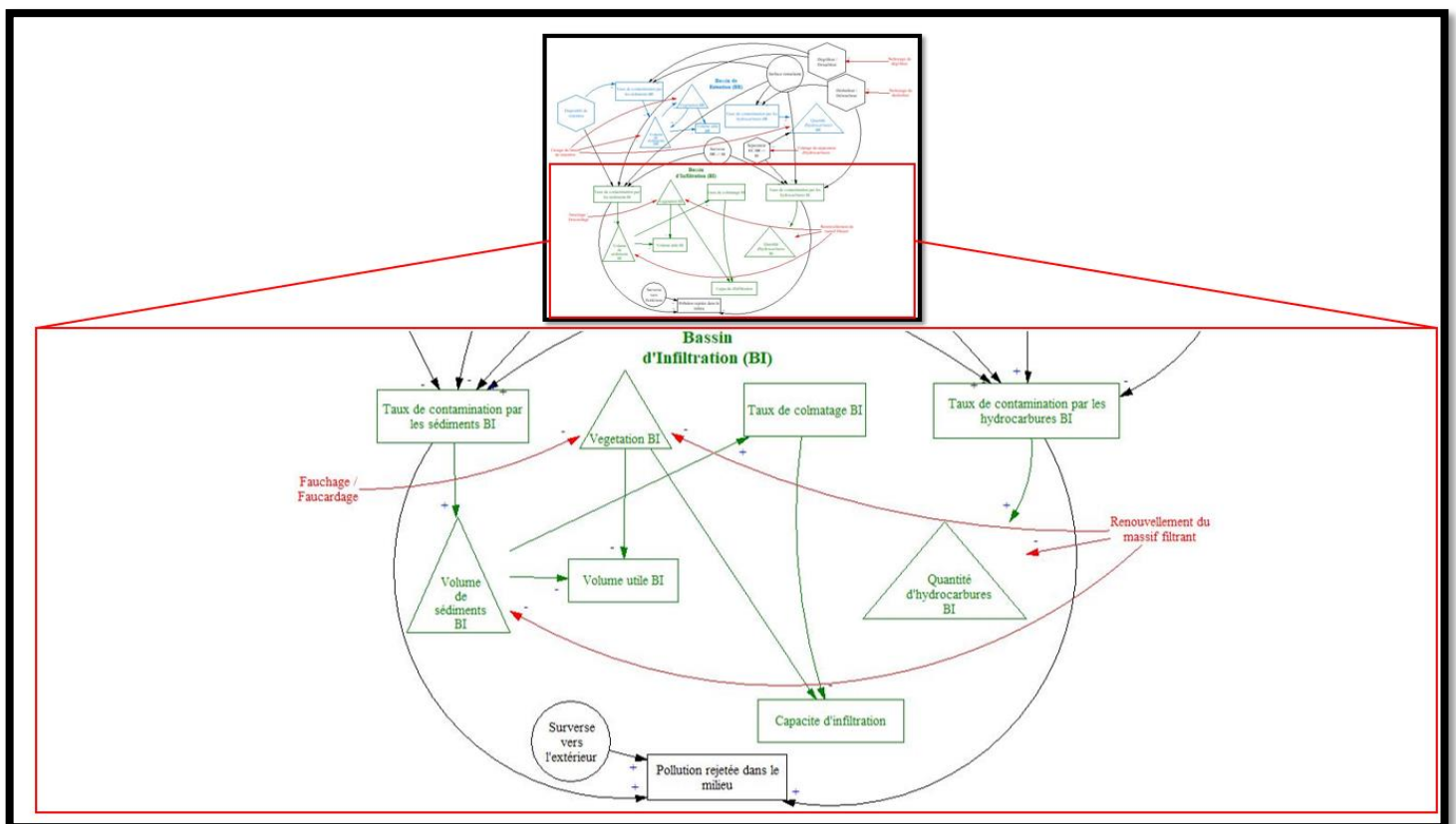


Figure 15 : vue du modèle cognitif - bassin de collecte des eaux pluviales et Bloc Bassin de Rétention

Le bassin d'infiltration comporte cinq fonctions d'état :

- Le taux de contamination en sédiments de l'eau circulant
- Le taux de contamination par les hydrocarbures de l'eau

- Le volume utile restant
- Le taux de colmatage du bassin d'infiltration par les sédiments, pour permettre le contrôle de la perte de perméabilité générée par la formation d'une couche de colmatage
- La capacité d'infiltration définitive du BI pour simuler sa perméabilité en tenant compte notamment de l'influence de la végétation sur celle-ci

Le bloc bassin d'infiltration est modélisé avec les mêmes variables de stockage que le bassin de rétention, pour simuler l'évolution du volume de sédiments, de la quantité d'hydrocarbures accumulés et de la végétation.

Deux opérations d'entretien ont été introduites au niveau du bassin d'infiltration :

- Le fauchage (ou faucardage pour les bassins en eau) qui vient diminuer le stock de végétation
- Le renouvellement du massif filtrant, qui vide les stocks de végétation, d'hydrocarbures et de sédiments.

#### iv. Le bloc « exutoires » du modèle cognitif

Le bloc exutoire se positionne en sortie du bloc bassin d'infiltration dans la mesure où il comporte le taux « Capacité d'infiltration », qui est responsable de l'évacuation de l'eau en dehors de l'ouvrage.

Le composant d'acheminement « Surverse vers l'extérieur » permet de simuler, suivant la quantité d'eau débordée vers l'extérieur de l'ouvrage d'infiltration, la pollution par les sédiments et par les hydrocarbures transmise vers le milieu naturel.

#### e. Elaboration du modèle prédictif

Le modèle prédictif a été élaboré en trois étapes :

1. **Une représentation logique du modèle**, sous la forme d'une carte mentale des paramètres et formules entrés dans le modèle au niveau de chaque élément constitutif du modèle. Elle a pour objectif de permettre à tout utilisateur de comprendre la structure du modèle prédictif et au besoin de reconstituer intégralement ce modèle avec n'importe quel logiciel de modélisation de la dynamique des systèmes.
2. **Le développement du modèle fonctionnel** lui-même, sous le logiciel Vensim PLP. Elle a pour objectif de réaliser les simulations et de permettre une vérification qualitative de la pertinence du modèle,
3. **La mise en œuvre d'un tableau-interface** pour le paramétrage du modèle prédictif par les gestionnaires ; l'objectif est de faciliter le contrôle des variables et paramètres introduits en entrée de chaque simulation

Le modèle est conçu avec un pas de temps journalier pour les calculs. Toutes les variables relatives au temps devront donc être exprimées en jours. De même, l'essentiel des variables de sortie du modèle sont des taux de performance par rapport à la performance à la conception de l'ouvrage. Enfin, les stocks ont des unités variables selon la grandeur qu'ils représentent :

- En grammes pour suivre l'évolution du stock de la charge polluante (MES, HC ...)
- En m3 pour suivre les volumes d'eau ou de sédiments

*i. Base de données du modèle prédictif*

La base de données du modèle prédictif a été réalisée en utilisant le logiciel libre Freemind qui permet la construction de cartes mentales. Ces dernières sont schématisées par une structure arborescente dans laquelle sont compilés tous les éléments constitutifs du modèle prédictif. Il est ainsi possible en suivant le système de classification utilisé de retrouver n'importe lequel des éléments du modèle, comme montré sur la **figure 16**.

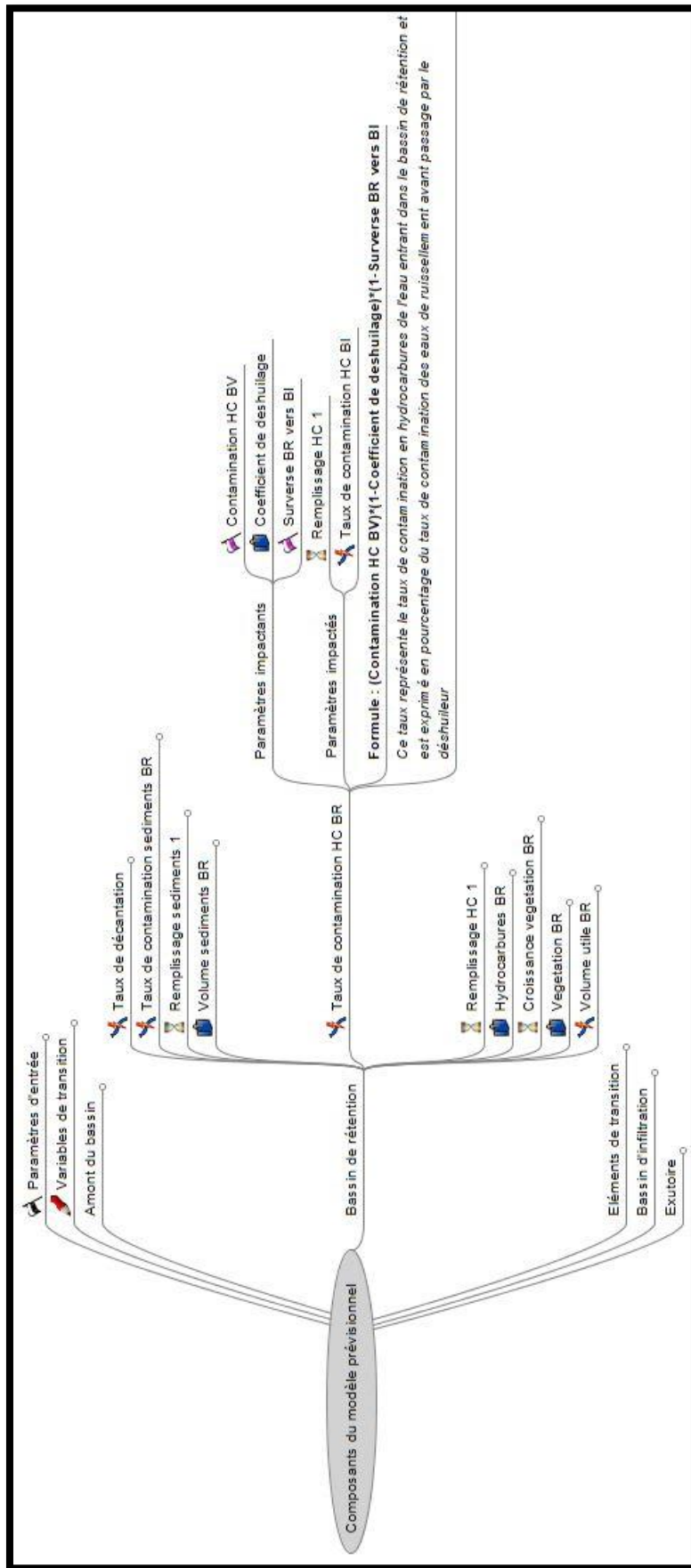









Figure 16 : extrait de la base de données du modèle prédictif – exemple de l'élément « Taux de contamination HC BR »

Chaque élément du modèle est classé selon le bloc auquel il est rattaché. Les branches issues de chaque élément indiquent :

- Les paramètres qui impactent l'élément (Paramètres impactants) ;
- Les paramètres impactés par l'élément (Paramètres impactés) ;
- La formule qui lui est associée, ou les choix de scénarii possibles s'il s'agit d'un paramètre de choix de scénario ;
- La description de l'élément, de sa réalité physique ou de sa fonction dans le modèle.

Chaque élément du modèle est de plus associé à un pictogramme symbolisant sa nature. Ce système est décrit dans le **tableau 3**.

Tableau 3 : Légende de la base de données du modèle systémique

Type de variable ou paramètre	Pictogramme associé
<u>Taux</u> : Pourcentage d'un total ou d'un taux de fonctionnement optimal	
<u>Flux</u> : Vitesse de remplissage journalière d'un réservoir	
<u>Réservoir</u> : Variable cumulative décrivant une quantité ou un volume stocké	
<u>Variable de transition</u> : Variable utilitaire n'ayant pas de réalité physique dans le modèle ou étape intermédiaire de calcul d'une autre variable	
<u>Paramètre de fonctionnement de l'ouvrage</u> : Paramètre d'entrée concernant les caractéristiques physiques ou les performances initiales de l'ouvrage	
<u>Paramètre d'entretien</u> : Paramètre d'entrée concernant la fréquence des opérations d'entretien effectuées sur l'ouvrage	
<u>Paramètre de choix de scénario</u> : Paramètre d'entrée déterminant la nature du scénario choisi par le gestionnaire parmi un panel de scénarii proposé par le modèle	

La base de données complète du modèle est disponible sous son format textuel en **annexe 1**.

ii. Interface de saisie du paramétrage par le gestionnaire

A terme, le modèle prévisionnel devra être utilisable par tous les gestionnaires de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, et ce sans avoir à se familiariser intégralement avec la conception du modèle. Pour ce faire, nous avons développé une interface plus intuitive dans laquelle le gestionnaire peut saisir l'ensemble du paramétrage du modèle.

Cette interface se présente sous la forme d'une feuille Excel dans laquelle certaines cases sont réservées à l'entrée des données par le gestionnaire. On peut en voir un extrait sur la **figure 17**, et le tableau entier est disponible en **annexe 2**. La description de la structure du tableau et le mode d'utilisation du modèle sont décrits dans l'**annexe 7**.



<b>Paramètres d'entretien</b>	
Temps de renouvellement du dégrilleur (jours)	10000 Renouvellement ou nettoyage pour atteindre une valeur proche de l'efficacité à neuf 10000 <i>10000 si pas de dégrilleur</i>
Temps de renouvellement du déshuileur (jours)	10000 Renouvellement ou nettoyage pour atteindre une valeur proche de l'efficacité à neuf 10000 <i>10000 si pas de déshuileur</i>
Temps entre deux curages du bassin de rétention (jours)	4380 Le curage réinitialise le volume de sédiments, d'hydrocarbures et de végétation du BR 4380 <i>10000 si pas de BR</i>
Temps entre deux vidanges du séparateur d'hydrocarbures (jours)	365 Vidange ou nettoyage pour atteindre une valeur proche de 100% d'efficacité pour le séparateur 365 <i>10000 si pas de séparateur</i>
Temps entre deux fauchages du bassin d'infiltration (jours)	5475 /
Temps entre deux renouvellements du massif filtrant du bassin d'infiltration (jours)	5475 Renouvellement du massif filtrant ou curage suffisant pour revenir à la perméabilité de conception 5475 <i>conception</i>

Figure 17 : Extrait de l'interface gestionnaires – section « Paramètres d'entretien »



*iii. Partie fonctionnelle du modèle prédictif*

La partie fonctionnelle du modèle prédictif a été élaborée avec le logiciel Vensim PLP. La **figure 18** (modèle lisible en **annexe 4**) en montre la structure. Les formules associées à chaque élément sont données en **annexe 1**.



#### f. Paramétrisation du modèle prédictif

Afin de simuler le fonctionnement dans la durée de l'ouvrage Django Reinhardt, puis vérifier dans un second temps la pertinence générale du modèle prédictif, plusieurs familles de paramètres doivent être renseignées. Nous distinguerons :

- Les paramètres initiaux qui traduisent les caractéristiques de l'ouvrage modélisé et qui ne doivent pas être modifiées pour simuler le scénario de référence de fonctionnement de l'ouvrage Django Reinhardt
- Les paramètres d'entretien, qui seront établis en fonction de l'entretien dont a fait objet l'ouvrage Django Reinhardt au cours de ces dernières années pour le scénario de référence
- Les paramètres de choix de scénario qui sont ceux qui seront modulés afin de vérifier, de manière qualitative, la pertinence du modèle

##### ii. Définition des paramètres initiaux du modèle

Le tableau rendant compte du paramétrage du modèle pour le cas du bassin Django Reinhardt peut être retrouvé en **annexe 2**.

##### - **Paramètres généraux de comportement du modèle**

Pour le volume d'eau annuel entrant dans le bassin de rétention ainsi que la teneur en sédiments et en hydrocarbures des eaux de ruissellement, les données récoltées dans le cadre de la thèse menée par **Gonzalez-Merchan (2012)** moyennées sur les 7 années 2004 à 2010 donnent les valeurs suivantes :

- Volume annuel d'eau entrant dans le BR : 540'000 m<sup>3</sup>
- Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage : 1.9 g/m<sup>3</sup>
- Teneur en sédiments des eaux de lessivage : 4,5x10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Le système de collecte et d'acheminement des eaux pluviales ne dispose ni de dégrilleur ni de déshuileur.

Le taux de décantation des infrastructures du BR a lui aussi été calculé au moyen de la thèse de **Gonzalez-Merchan (2012)** en utilisant la différence entre les matières en suspension (MES) entrant dans le BR et les MES en ressortant sur les années 2004-2007. On obtient un taux de décantation de 0.58 pour les infrastructures du bassin de rétention : 58 % de la quantité de sédiments contenus dans les eaux de lessivage est maintenue par décantation dans le BR.

La végétation ne semblant toujours pas avoir atteint sa taille maximale après 7 ans d'études du BR une valeur de 10 ans a été approximée, et un remplissage à taille maximale de 10 % du volume total du BR. Faute d'observations de ce côté, nous prendrons les mêmes valeurs pour la croissance de la végétation dans le bassin d'infiltration.

##### - **Paramètres d'entretien**

Au niveau de l'ouvrage Django Reinhardt, le curage du bassin de rétention a été effectué en 2004 et en 2016, nous allons donc prendre la valeur de 12 ans pour le temps entre deux curages.

D'après **Moura (2008)**, il est recommandé d'effectuer le nettoyage complet d'un séparateur à hydrocarbures une fois par an. Nous allons donc estimer qu'après un an, les performances du séparateur à hydrocarbures sont tombées à 0% de rétention des hydrocarbures.

Le renouvellement du massif filtrant du bassin d'infiltration n'ayant jamais été effectué, il sera réglé sur le temps final de la simulation, à savoir au bout de 15 ans.

#### - Paramètres de choix de scénario

En scénario de référence, représentant le comportement du bassin Django Reinhardt tel qu'il serait si son environnement restait identique à ce qu'il est aujourd'hui, les taux de contamination par les sédiments et les hydrocarbures seront de 1 pour toute la simulation. Ceci signifie que le bassin versant ne subira aucune modification modifiant sensiblement la concentration en hydrocarbures ou en sédiments de ses eaux de ruissellement.

**Gonzalez-Merchan (2012)** établit dans sa thèse que la présence de végétation dans le bassin de rétention augmente considérablement la résistance hydraulique. Nous choisirons donc une hypothèse forte de 30% de taux de décantation supplémentaire avec une végétation pleinement développée. Cette thèse fait aussi état d'une expérience réalisée en colonne et au cours de laquelle il a été montré que « *les colonnes avec végétation présentaient une capacité d'infiltration supérieure aux colonnes sans végétation.* » En outre, une seconde étude réalisée sur un modèle de tranchée a prouvé que « *la végétation permet d'améliorer la structure du sol, même si la capacité de stockage de la tranchée a été réduite.* » La thèse souligne toutefois le fait que l'avantage dont disposent les substrats végétalisés finit par s'amenuiser au cours du temps. Nous opterons donc pour un scénario minimaliste quant à l'influence de l'avantage de la végétation sur la capacité d'infiltration.

En l'absence de données concernant ce scénario, et en présence d'un remplissage faible du bassin de rétention, nous opterons pour le scénario établissant une relation linéaire faible entre le taux de décantation du bassin de rétention et son volume utile restant (décroissance linéaire au fur et à mesure du remplissage du bassin jusqu'à une diminution du taux de décantation équivalent à 50 % du taux de décantation des infrastructures pour un bassin rempli).

Enfin, les simulations effectuées par **Dicanot (2016)** montrent que pour des événements allant jusqu'à une période de retour de 150 ans, aucune surverse ni débordement n'est noté pour le bassin Django-Reinhardt. Les taux de surverse et de débordement seront donc fixés à 0 pour le scénario de référence.

#### *iii. Résultats de la simulation du scénario de référence*

Les paramètres utilisés en entrée dans ce scénario de référence sont présentés en **annexe 2**.

Afin de mettre en évidence l'influence des rares opérations d'entretien qui ont été pratiquées depuis la mise en œuvre de l'ouvrage de rétention-infiltration Django-Reinhardt, tel le curage du bassin de rétention, nous avons choisi de simuler quinze années de fonctionnement (soit de 0 à 5500 jours).

Dans le scénario de référence, un curage est simulé au 4'380<sup>ème</sup> jour (12 ans après le début de la simulation).

## - Evolution du volume de sédiments

La courbe simulée du volume de sédiments dans le bassin de rétention (**figure 19**) augmente progressivement avec une pente croissante, corrélée à la pousse de la végétation qui augmente progressivement le taux de décantation dans le bassin de rétention. Le remise à zéro brutale du niveau de sédiments observée est due au curage du bassin. Pour le bassin d'infiltration, la variation de pente de la courbe simulée (**figure 20**) est inversée, puisque les sédiments sont mieux retenus dans un bassin de rétention végétalisé : une fois le BR vide, la pente d'augmentation du volume de sédiments dans le BI est réinitialisée.

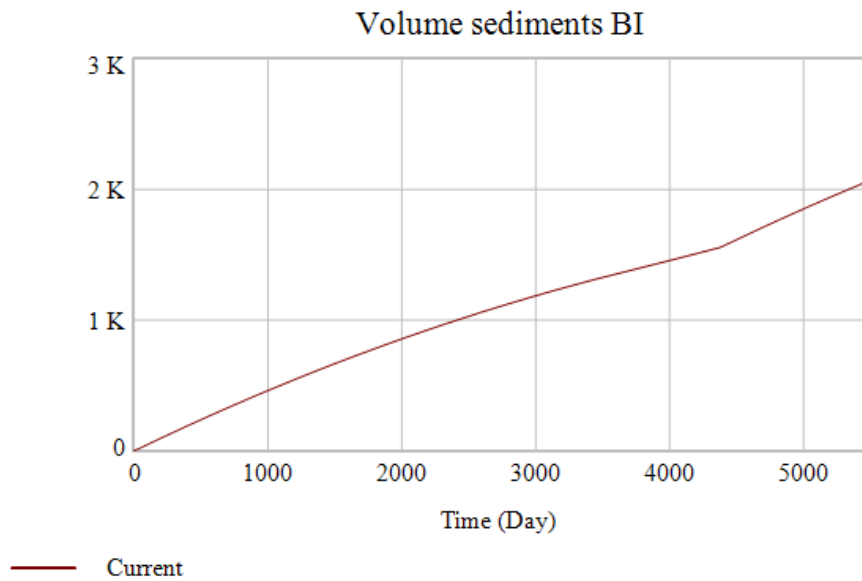


Figure 19 : évolution du volume de sédiments dans le BR au cours du temps ( $m^3$ )

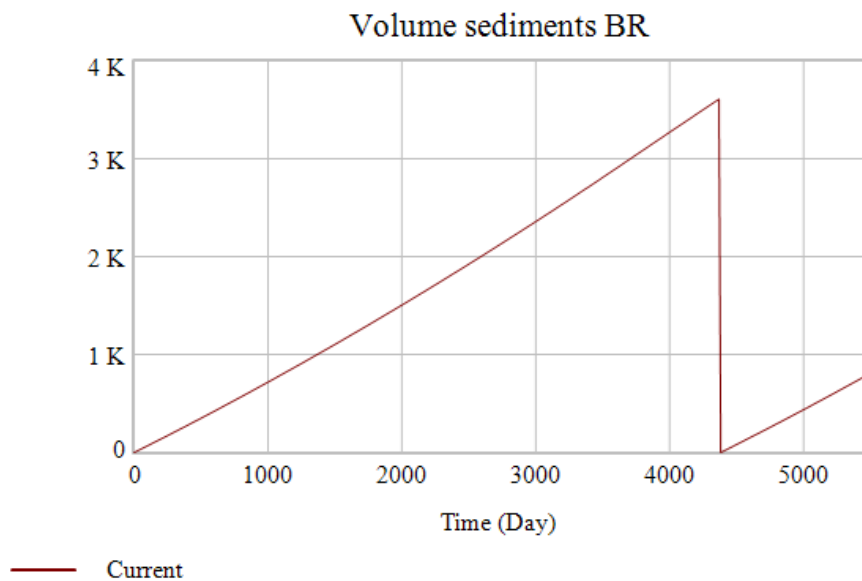


Figure 20 : évolution du volume de sédiments dans le BI au cours du temps ( $m^3$ )

La thèse de **Gonzalez-Merchan** observait une augmentation annuelle moyenne d'environ 14 mm de la couche colmatée du bassin d'infiltration. Avec une accumulation de 2'000 m<sup>3</sup> de sédiments sur 15 ans et une surface de 8'630 m<sup>2</sup>, notre modèle permet d'estimer une augmentation annuelle moyenne de la couche colmatée du BI d'environ 15,4 mm, ce qui est très proche des valeurs observées sur le terrain et tend grandement à confirmer la viabilité de notre modèle.

#### - Evolution de la végétation

La courbe simulée de croissance de végétation, pour les deux bassins (**figure 21 et figure 22**), est uniquement liée au paramétrage initial du modèle. La réinitialisation du niveau de végétation pour le bassin de rétention est due au curage de ce dernier.

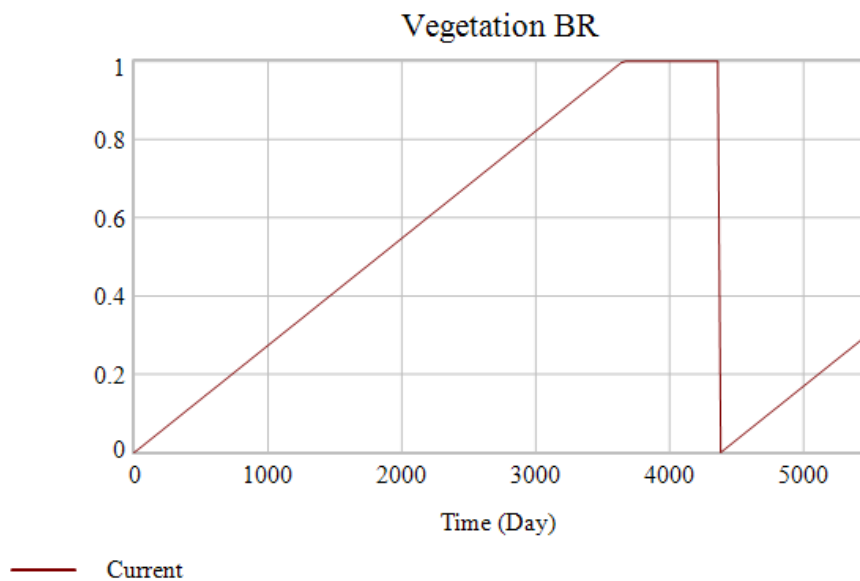


Figure 21 : évolution de la végétation au cours du temps dans le BR (en pourcentage de la végétation maximale)

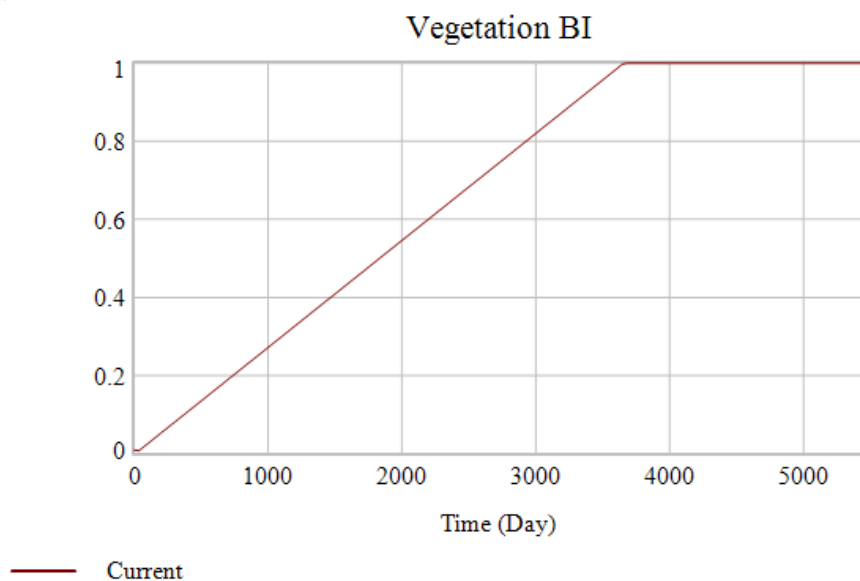


Figure 22 : évolution de la végétation au cours du temps dans le BI (en pourcentage de la végétation maximale)

Dans la réalité, **Saulais (2011)** a montré dans sa thèse des fluctuations saisonnières de l'effet de rétention de la végétation qui influence aussi l'efficacité de rétention des polluants. Toutefois, ces fluctuations sont extrêmement dépendantes de l'espèce de plante considérée, et il en va de même pour les variations de croissance de la végétation. Dans le souci de ne pas apporter trop de complexité au modèle, nous choisissons de ne pas tenir compte des potentielles fluctuations dans le rythme de croissance et le potentiel de rétention des polluants de la végétation. L'hypothèse a de plus été faite que dans ce travail préliminaire, la végétation n'avait qu'un rôle physique sur la rétention des sédiments et que cette influence ne fluctuait pas en fonction des saisons, ce qui explique la courbe simulée linéaire. Faute de connaissance de la nature de la végétation du bassin à toute date, nous n'avons pas pris en compte l'influence de la végétation sur la rétention des hydrocarbures dans ce modèle.

#### - Evolution du volume utile

Les courbes d'évolution des volumes utiles des deux bassins (BR **figure 23** et BI **figure 24**) au cours du temps sont toutes deux corrélées aux courbes de végétation et de volume de sédiments des bassins correspondants. On note tout de même que le volume utile du bassin de rétention descend en dessous des 80 % du volume total avant le curage. Le bassin d'infiltration semble moins affecté par le changement de son volume utile, du fait qu'il dispose à l'origine d'un volume beaucoup plus important (soit 61'000 m<sup>3</sup> pour le BI contre 32'000 m<sup>3</sup> pour le BR).

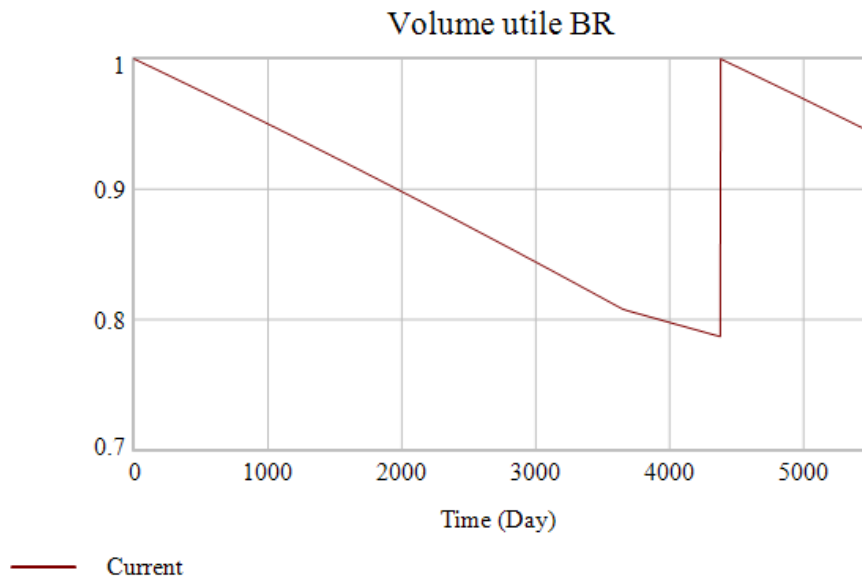


Figure 23 : : évolution du volume utile du BR au cours du temps (en pourcentage du volume total)

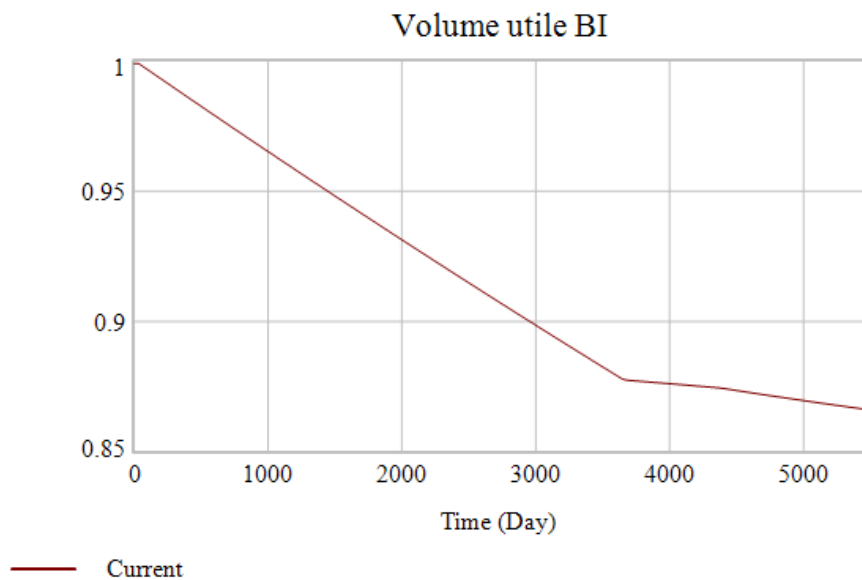


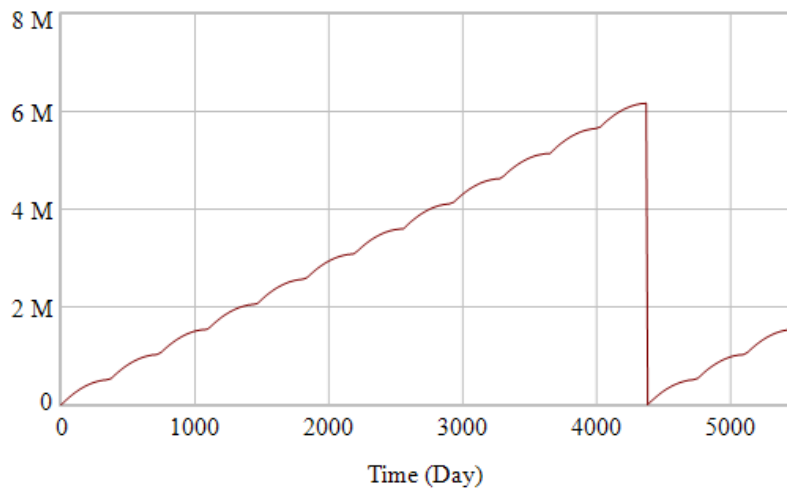
Figure 24 : : évolution du volume utile du BI au cours du temps (en pourcentage du volume total)

- Evolution du stock d'hydrocarbures dans les bassins

Les courbes d'évolution de la quantité d'hydrocarbures dans le bassin de rétention (**figure 25**) et dans le bassin d'infiltration (**figure 26**) présentent des variations régulières de leurs pentes. Ces dernières sont dues à la décroissance d'efficacité du séparateur à hydrocarbures et aux vidanges annuelles. La réinitialisation du stock d'hydrocarbures dans le bassin de rétention est due au curage de ce dernier.



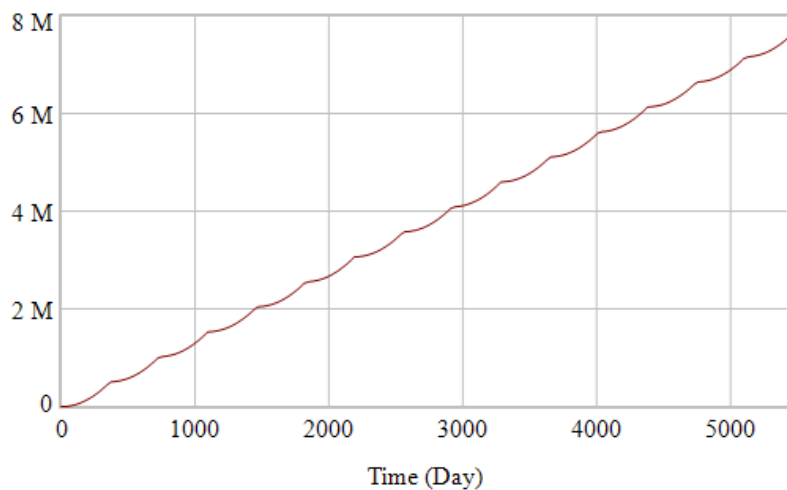
### Hydrocarbures BR



— Current

Figure 25 : évolution de la pollution du BR par les hydrocarbures au cours du temps (en g)

### Hydrocarbures BI



— Current

Figure 26 : évolution de la pollution du BI par les hydrocarbures au cours du temps (en g)

La simulation faite ici de l'évolution du stock d'hydrocarbures suppose que tous les hydrocarbures amenés par les eaux de ruissellement sont des hydrocarbures flottants. Or, cette hypothèse ne correspond pas exactement aux observations de **Sebastian et Barraud (2017)** qui ont déterminé que les hydrocarbures amenés par les eaux pluviales dans le bassin Django Reinhardt n'étaient qu'à 50 % des hydrocarbures flottants. La croissance du stock d'hydrocarbures dans le bassin de rétention est pour sa part due à l'hypothèse que les hydrocarbures arrêtés par la cloison siphôide sont par conséquent stockés dans le bassin de rétention.

Malheureusement, les études concernant la présence d'hydrocarbures dans les bassins de rétention menées jusqu'à maintenant (**Sebastian, 2013 – Sebastian et Barraud, 2017**) s'intéressent majoritairement aux concentrations en hydrocarbures mesurées

dans les eaux parvenant dans les bassins, et pas à leur accumulation dans les massifs filtrants, il nous est par conséquent impossible de vérifier la cohérence du modèle sur ce point-ci pour le moment.

- Evolution de la perméabilité du bassin d'infiltration (**figure 27**)

On observe une légère stagnation de la perméabilité durant les premiers jours de la simulation. Ceci est dû à la formule utilisée pour le calcul de la perméabilité qui n'est valable que lorsque la couche de sédiments dans le bassin d'infiltration dépasse 1 centimètre. On observe ensuite une décroissance exponentielle de la capacité d'infiltration qui se stabilise aux alentours de 18 % de la perméabilité initiale. Cette simulation implique toutefois deux :

- La répartition égale des sédiments à la surface du bassin d'infiltration, hypothèse largement réfutée par **Gonzalez-Merchan (2012)** qui observe une répartition très inégale des sédiments au cours du colmatage
- Une perméabilité de la couche inférieure égale sur tout le bassin d'infiltration Django Reinhardt, hypothèse infirmée par **Goutaland (2008)** au cours de sa thèse dans laquelle il démontre l'hétérogénéité des faciès du sol et de sa perméabilité sur l'ensemble du bassin.

L'objectif n'est ici toutefois pas d'obtenir des valeurs exactes mais un comportement moyen sur l'ensemble de la surface de l'ouvrage d'infiltration.

Les observations de **Lassabatere (2010)** tendent toutefois à confirmer notre simulation quant à l'évolution de la perméabilité pour une couche de colmatage d'épaisseur dépassant quelques centimètres. En effet, son étude démontre que le temps moyen de stockage de l'eau mesuré sur un panel d'événements pluvieux dans le bassin d'infiltration Django Reinhardt pour une couche de colmatage de 5 cm équivaut à 419,4 heures, contre 70,8 heures sans couche de colmatage. L'étude démontre donc que le bassin colmaté avec une couche de 5 cm présente une perméabilité égale à 16.9 % de la perméabilité initiale. Lorsque l'épaisseur de sédiments simulée par notre modèle atteint la valeur de 5 cm dans le bassin d'infiltration, la perméabilité simulée correspondante sans tenir compte de l'apport de la végétation est de 20,1 % ce qui est très proche de la valeur déterminée par **Lassabatere (2010)**.

On notera que l'inversion de pente entre les jours 2000 et 4000 est uniquement due au choix de scénario pour l'influence de la végétation sur la capacité d'infiltration qui vient contrebalancer l'épaississement de la couche de colmatage.

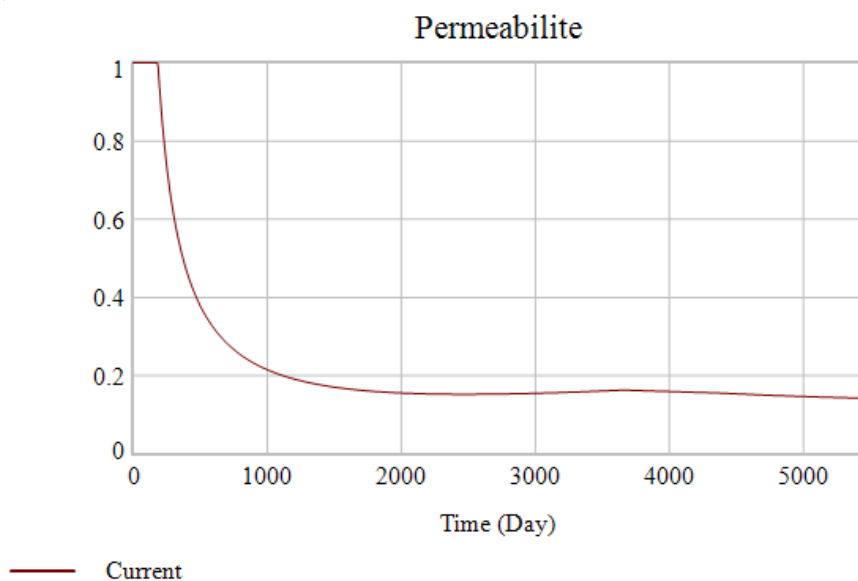


Figure 27 : évolution du taux de perméabilité du bassin d'infiltration au cours du temps (en pourcentage de la perméabilité à la conception)

#### iv. Etude de l'influence de paramètres importants

Afin de déterminer qualitativement la pertinence du modèle prédictif nous allons étudier les influences que peuvent avoir certaines modifications de scénarii et de paramètres sur le bassin par rapport aux résultats de simulation du scénario de référence décrit précédemment.

##### - **Influence du dégrilleur et du déshuileur en amont**

Comparons le scénario de référence (sans dégrilleur et sans déshuileur en amont du BR) avec une situation avec ces deux équipements. Afin d'effectuer cette comparaison, nous supposons la présence d'un dégrilleur et d'un déshuileur situés en amont du bassin de rétention. Ils auront tous deux une capacité à neuf de 0.5 (50 % des hydrocarbures et des matières en suspension sont arrêtés avant de pénétrer dans le BR), une décroissance annuelle 0.25 et seront nettoyés une fois tous les deux ans. Cette hypothèse est très forte puisque d'après **Moura (2008)**, « *Les séparateurs préfabriqués à hydrocarbures sont aujourd'hui très controversés. Leurs rendements pour traiter les RUTP [Rejets Urbains par Temps de Pluie] sont globalement médiocres, voire mauvais et sont très inférieurs à ceux annoncés par les constructeurs.* »

On remarque sur la **figure 28** que le dégrilleur permet de ralentir sensiblement la décroissance de volume utile restant du bassin de rétention. En effet, alors que dans la situation sans dégrilleur, le volume utile descendait à 78 % du volume initial avant le curage du bassin, il ne descend en cas de présence d'un dégrilleur qu'à 82 % du volume initial. Les bénéfices du dégrilleur peuvent aussi être visualisés sur la **figure 29**, où l'on observe une décroissance légèrement moins rapide de la perméabilité au cours du temps, et une perméabilité en moyenne plus élevée sur l'ensemble de la situation.

L'action du déshuileur est notable sur la **figure 30**, où l'on peut observer une diminution d'environ deux tonnes dans l'apport d'hydrocarbures dans le bassin d'infiltration sur les quinze années de la simulation.

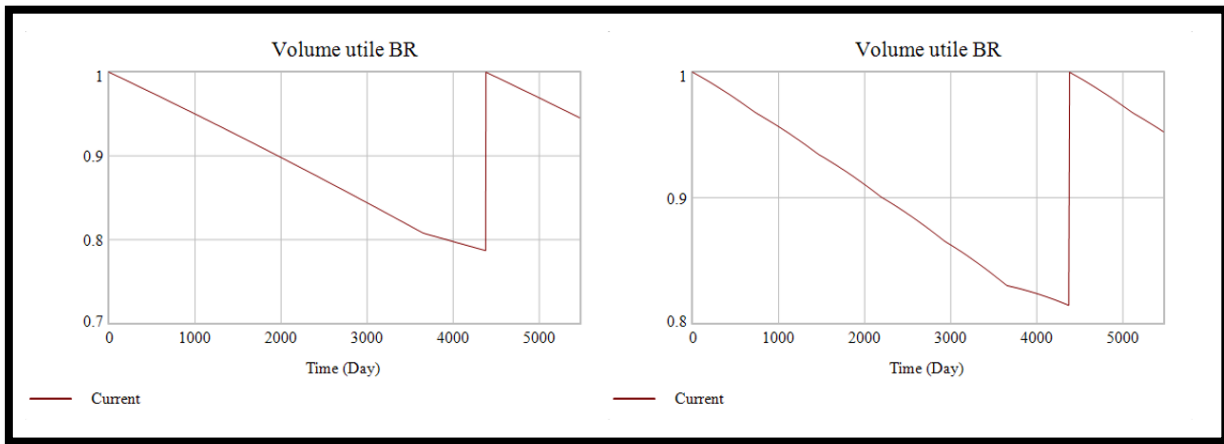


Figure 28 : Comparaison de l'évolution du volume utile du BR entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec présence d'un dégrilleur (à droite)

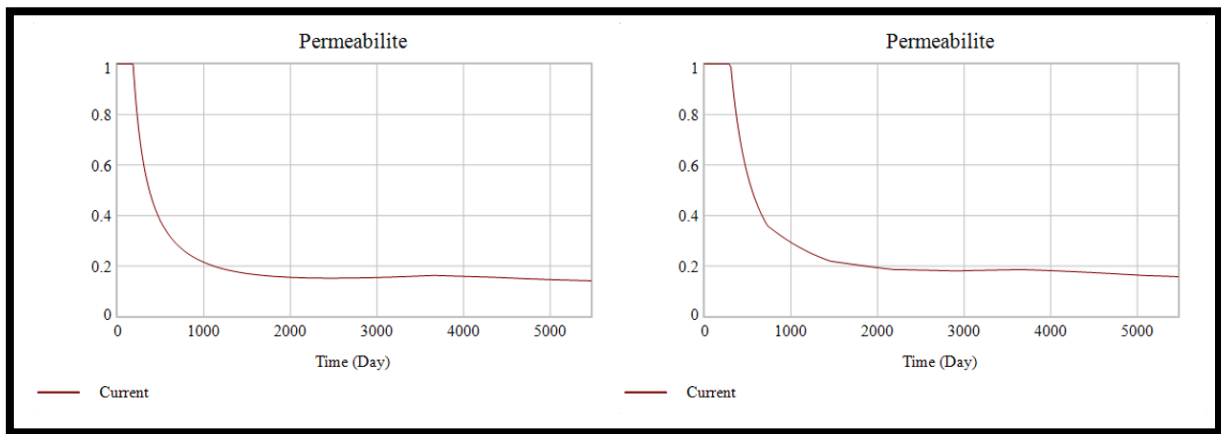


Figure 29 : Comparaison de l'évolution du taux de perméabilité entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec présence d'un dégrilleur (à droite)

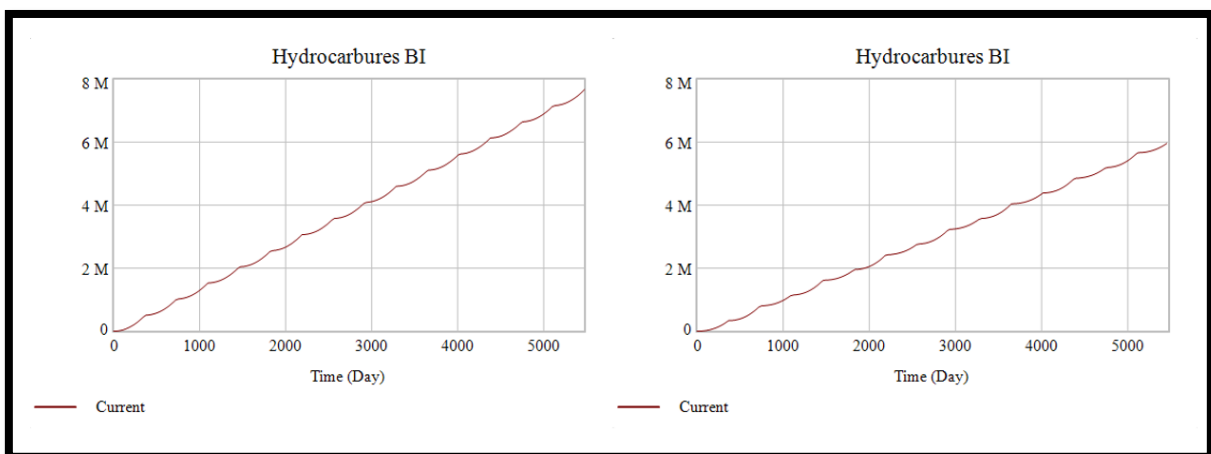


Figure 30 : Comparaison de l'évolution du stock d'hydrocarbures du BI entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec présence d'un déshuileur (à droite)

- **Influence du taux de surverse**

Nous considérons ici un bassin en tout point similaire au bassin Django Reinhardt, mais dont 30 % du volume d'eau en moyenne est transférée du bassin de rétention vers le bassin d'infiltration par la surverse, sans traitement des hydrocarbures ni décantation des MES.

Ce scénario est extrême car dans la réalité, le BR est dimensionné de telle sorte qu'aucune surverse directe n'a été observée. Au cours des simulations effectuées par **Dicanot (2016)** pour des événements allant jusqu'à une période de retour de 150 ans, aucune surverse ni débordement n'est noté pour le bassin Django-Reinhardt.

La **figure 31** montre qu'un taux de surverse plus important provoquera une réduction plus rapide de la perméabilité dans le bassin d'infiltration. De même, la **figure 32** montre qu'un taux de surverse important accélère le remplissage du BI en hydrocarbures en diminuant l'impact positif du séparateur à hydrocarbures sur la filtration de l'eau en sortie du BR.

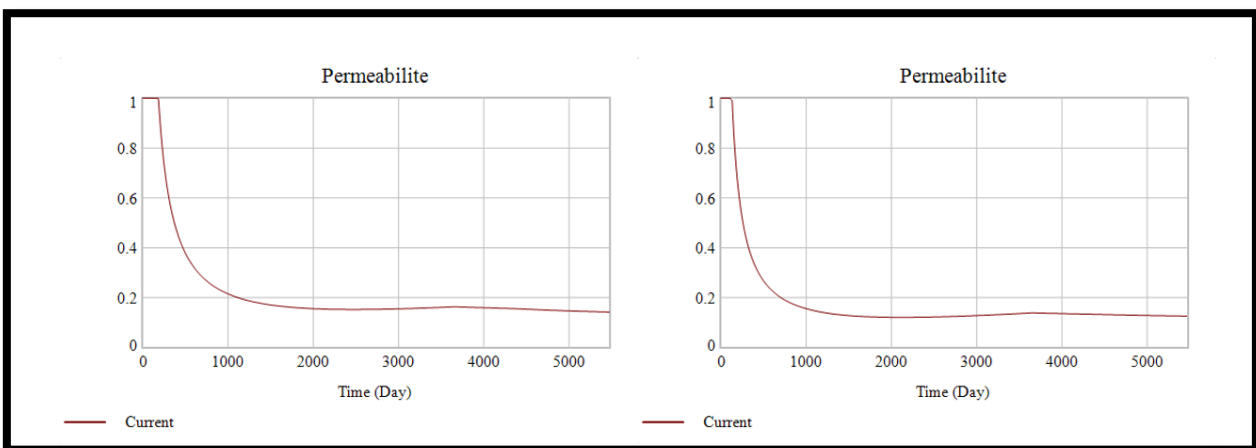


Figure 31 : Comparaison de l'évolution du taux de perméabilité du BI entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une surverse annuelle de 30 % (à droite)

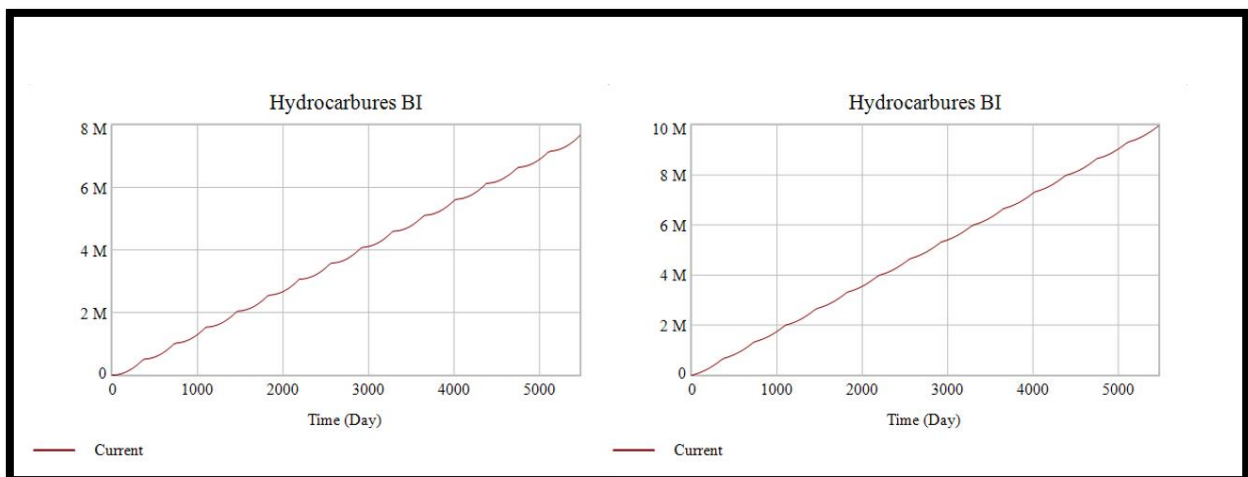


Figure 32 : Comparaison de l'évolution du stock d'hydrocarbures du BI entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une surverse annuelle de 30 % (à droite)

- **Influence de la fréquence de curage**

Nous souhaitons ici examiner l'influence de la fréquence de curage du bassin de rétention sur l'évolution de la perméabilité du bassin d'infiltration en simulant une situation où un curage est programmé tous les ans (**figure 33**).

Il n'est pas ici possible d'observer de réelle différence dans l'influence sur la perméabilité, et l'examen des tables des données montre même que la situation de référence bénéficiant d'un curage moins régulier est plus avantageuse. Ceci s'explique dans un premier temps par les dimensions de l'ouvrage, ce dernier est très largement surdimensionné et son volume utile reste considérable, même après 15 ans d'accumulation de sédiments. De plus, le modèle de végétation utilisé implique un meilleur taux de décantation pour une végétation développée, et le curage supprimera toute la végétation du bassin. C'est pour cela que la courbe de perméabilité en situation de référence est légèrement meilleure que celle pour un bassin dans lequel on laisse beaucoup moins la végétation se développer.

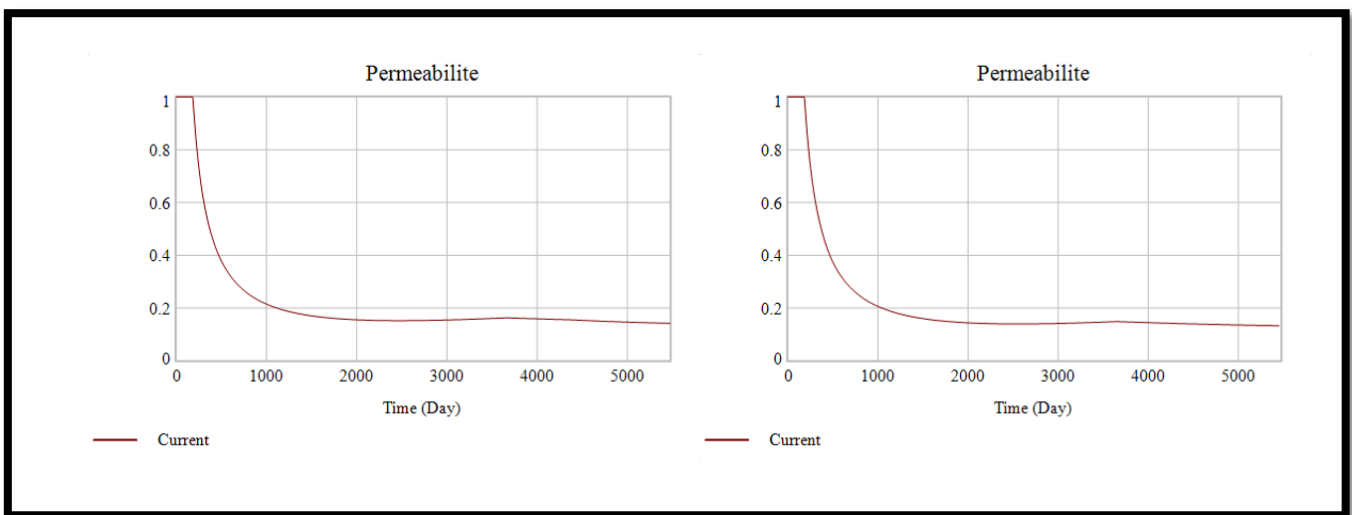


Figure 33 : Comparaison de l'évolution de la perméabilité du BI entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec un curage du BR annuel (à droite)

#### - Influence d'une modification du bassin versant

Nous examinerons ici l'influence d'un changement ponctuel dans les paramètres d'entrée du modèle. La simulation prendra en compte, au bout de deux ans, une augmentation de 20% dans la surface imperméabilisée drainée par le bassin Django Reinhardt. Nous traduirons cela dans le modèle par une augmentation de 20% du volume annuel d'eau reçu par le bassin.

Tout d'abord, il est nécessaire d'implémenter ce changement dans le tableau. Deux paramétrages du modèle sont possibles pour une augmentation du volume d'eau de 20% au bout de la deuxième année :

- Une augmentation linéaire progressive du volume d'eau jusqu'à une augmentation totale de 20% au bout des deux années. Le paramétrage pour cette option est montré sur la **figure 34**.

Time	0	730	5475
Volume d'eau annuel (m <sup>3</sup> )	540000	648000	648000

Figure 34 : Exemple du paramétrage de l'interface utilisateur pour une augmentation progressive de 20% du volume d'eau reçu par l'ouvrage au bout de 2 ans

- Une augmentation ponctuelle du volume d'eau, passant du volume initial au volume final en un seul pas de temps à la date t=730 jour. Le paramétrage pour cette option est montré sur la **figure 35**.

Time	0	729	730	5475
Volume d'eau annuel (m <sup>3</sup> )	540000	540000	648000	648000

Figure 35 : Exemple du paramétrage de l'interface utilisateur pour une augmentation instantanée de 20% du volume d'eau reçu par l'ouvrage au bout de 2 ans

Afin de pouvoir repérer plus aisément les changements impliqués par cette augmentation du volume d'eau reçu par l'ouvrage sur nos simulations, nous choisirons la seconde option.

On observe que l'évolution simulée du remplissage du bassin de rétention subit une légère augmentation de pente au jour 730 (**figure 36**). Cela est dû à un apport moyen de sédiment journalier (**figure 37**) accru par l'augmentation du volume d'eau entrant annuellement dans le bassin de rétention. Cette augmentation du volume quotidien moyen de sédiments apportés à l'ouvrage semble n'avoir que peu d'incidence sur l'évolution de la perméabilité du bassin d'infiltration (**figure 38**) mais cela tient encore une fois aux dimensions et aux pratiques d'entretien du bassin de rétention Django Reinhardt.

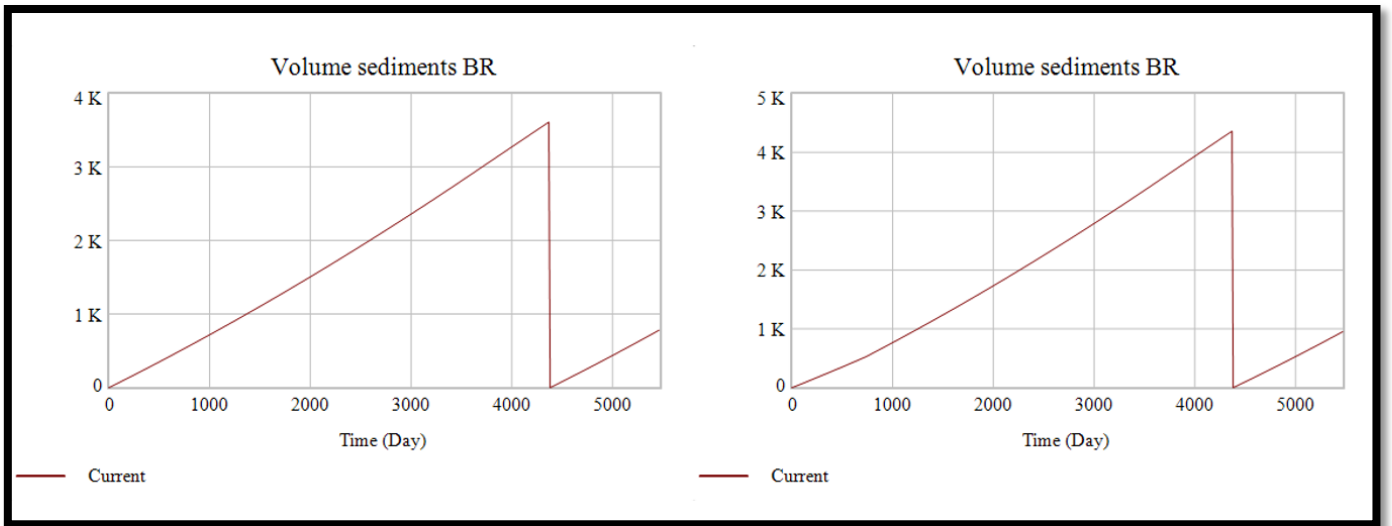


Figure 36 : Comparaison de l'évolution du volume de sédiments dans le BR au cours du temps entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une augmentation du bassin versant artificialisé de 20 % au bout de deux ans BR annuel (à droite)

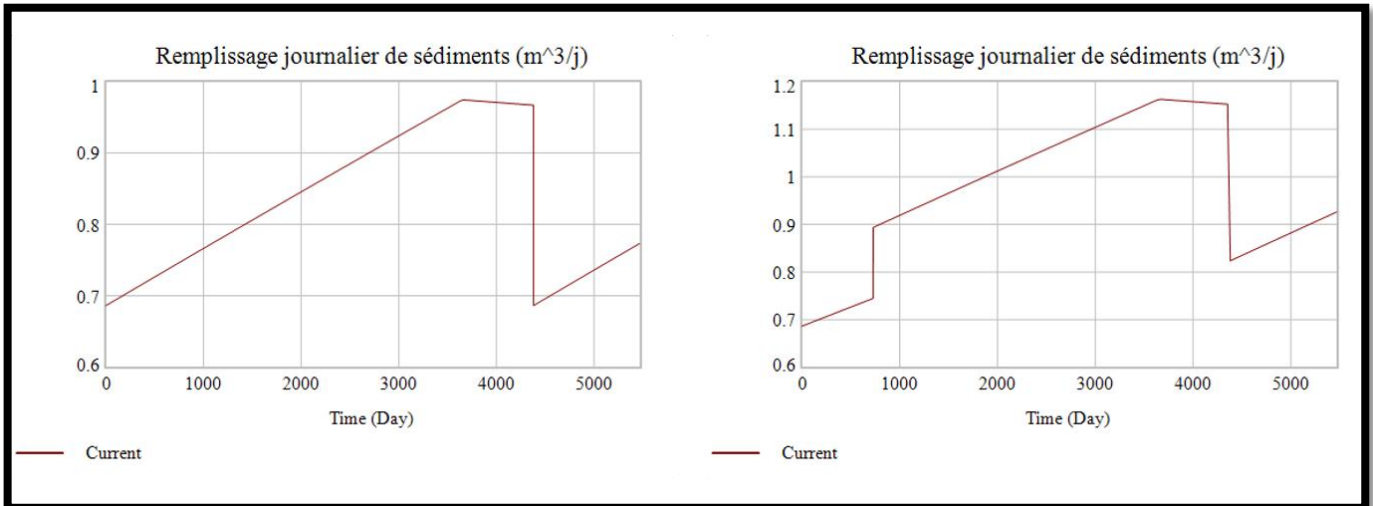


Figure 37 : Figure : Comparaison de l'évolution du remplissage journalier moyen de sédiments pour le BR au cours du temps entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une augmentation du bassin versant artificialisé de 20 % au bout de deux ans BR



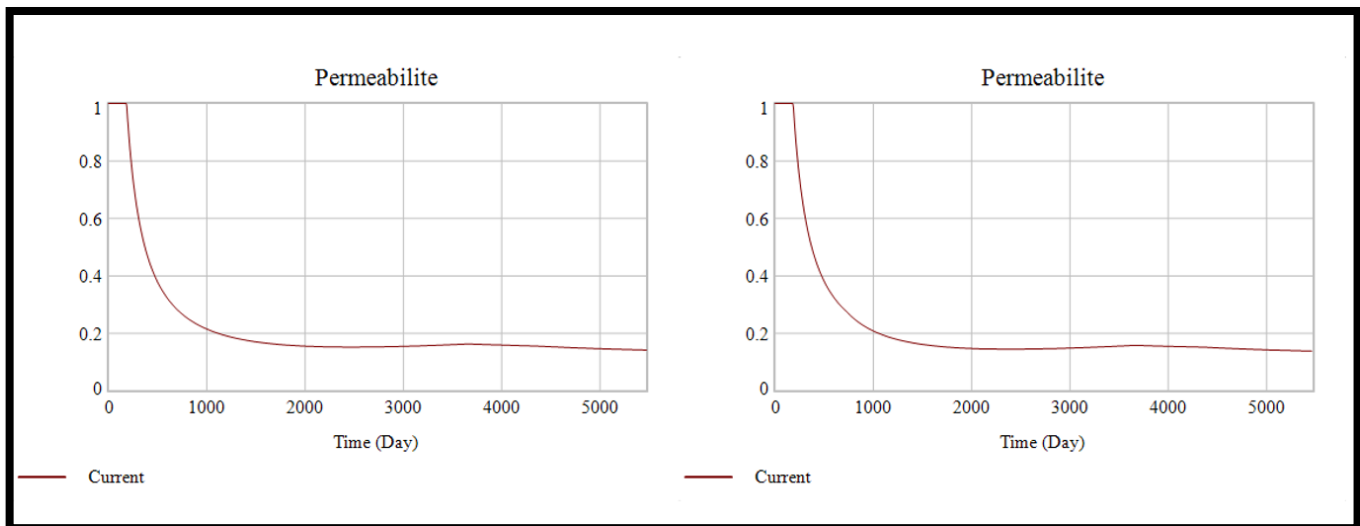


Figure 38 : Comparaison de l'évolution du taux de perméabilité du Bi au cours du temps entre le scénario de référence (à gauche) et le scénario avec une augmentation du bassin versant artificialisé de 20 % au bout de deux ans BR annuel (à droite)

#### g. Discussion sur le modèle

A ce stade de l'élaboration du modèle, seule une évaluation qualitative de sa pertinence est possible. Le modèle prédictif permet l'obtention de résultats cohérents avec les observations connues du comportement du bassin Django-Reinhardt.

En dépit du très grand nombre d'études portant sur l'ouvrage Django Reinhardt (**Annexe 6**), il reste difficile de valider, plus quantitativement, la pertinence des résultats de simulation. En effet, que ce soit pour l'évolution de la perméabilité (**Lassabatere, 2010**), du colmatage du BR (**Gonzalez-Merchan, 2012**), de la colonisation du BI par la végétation (Saulais, 2011) ou de la pollution par les HC (**Sebastian, 2013**), les travaux portent sur des suivis de courtes périodes (2-3 ans) ou sur la simulation d'évènements pluvieux particuliers (sur 78h par exemple). Un autre problème est que ces travaux d'ordre analytique renseignent sur l'évolution des paramètres bruts (ex. concentration de l'eau ou des sédiments en HC ou valeur de perméabilité) alors que le mode d'analyse de la dynamique de l'ouvrage par l'approche systémique que nous avons choisi ne permet de fournir en sortie que des tendances de variation d'évolution de ces paramètres par rapport à leurs valeurs initiales sur le long-terme.

Une validation plus poussée de la pertinence du modèle prédictif nécessitera donc de s'appuyer sur le ressenti et la connaissance du gestionnaire sur le fonctionnement de l'ouvrage modélisé. Le temps imparti pour le travail de stage n'a pas permis de confronter ces résultats de simulation avec la vision du gestionnaire.

Au-delà de l'étape de vérification du modèle, l'utilisation de ce modèle requiert une connaissance d'un certain nombre de paramètres dont les gestionnaires ne disposent potentiellement pas. La plupart d'entre eux sont cependant relativement simples à acquérir, ou à approximer. Ce problème de multiplicité des paramètres d'entrée est aussi évitable en utilisant la grande diversité de variables de contrôle dont dispose le modèle. Un gestionnaire ne disposant pas notamment des concentrations exactes en hydrocarbures et en sédiments dans les eaux pluviales arrivant dans l'ouvrage pourra tout de même utiliser le modèle. Ce dernier ne lui fournira pas les données telles

que le remplissage des bassins ou l'évolution de la perméabilité, mais les taux de contamination des eaux par rapport aux taux de contamination initiaux restent un indicateur utilisable.

Le principal problème du modèle réside dans le manque de formules plus précises pour le calcul de certains de ses éléments. En effet, il implique le plus souvent des évolutions linéaires pour pallier au manque de connaissance pour modéliser complètement et correctement le fonctionnement de certains sous-systèmes complexes (évolution de la végétation, influence de la végétation sur le colmatage...). Une étude plus poussée du comportement de chaque élément du modèle pourrait ainsi être profitable au modèle, et le rendre plus fiable. Il ne faut toutefois pas que ses évolutions futures en fassent un modèle exclusif à un seul type d'ouvrages, et que les formules qu'il utilise restent suffisamment générales pour en faire un modèle universel. C'est pourquoi la meilleure voie d'amélioration du modèle prédictif serait de confronter les tendances d'évolutions simulées avec le ressenti de plusieurs gestionnaires représentant une grande diversité d'ouvrage.

Le dernier obstacle inhérent à la systémique que rencontre le modèle, est sa difficulté à rendre compte des très petites différences. Tout d'abord, le modèle utilise exclusivement des valeurs moyennées et prend toujours pour hypothèse des répartitions uniformes (répartition uniforme des pluies sur l'année, des sédiments au fond des bassins...). De plus, la plupart des formules et des scénarii proposés par le modèle impliquent une erreur minimale dans ses résultats qui empêchent son utilisation pour une analyse fine des résultats. Il ne sert qu'à donner une tendance d'évolution et ne saurait être utilisé pour une étude quantitative.

D'une manière générale, les modèles systémiques sont rarement évaluables par une validation des résultats (comparaison entre valeurs simulées et observées) et leur validation nécessite à la fois :

- une validation de la démarche mise en œuvre pour élaborer le modèle et des hypothèses associées ;
- une validation qualitative du comportement du modèle s'appuyant sur l'analyse des tendances en fonction du paramétrage.

## IV- Généralisation du modèle à d'autres ouvrages

Le modèle d'ouvrage de rétention-infiltration présenté au chapitre III a été adapté pour être testé sur d'autres types d'ouvrages. Après avoir présenté les conditions d'adaptabilité du modèle, les ouvrages modélisés (un bassin d'infiltration et une noue) sont présentés. Les résultats et les possibilités de généralisation sont ensuite discutés.

### a. Conditions d'adaptabilité du modèle

A ce stade de développement du modèle, sa structure impose un certain nombre d'exigences vis-à-vis des ouvrages que l'on cherche à modéliser :

- Il doit s'agir d'un ouvrage de complexité équivalente à Django Reinhardt ou plus simple. Si la technique alternative que l'on cherche à simuler dispose de composants dont ne dispose pas Django Reinhardt ou que son modèle systémique ne permet pas de simuler fidèlement, les résultats obtenus ne pourront être fidèles à la réalité.

- Il doit aussi s'agir d'un ouvrage dont la diminution de perméabilité s'explique par la formation d'une couche de colmatage. En effet, outre le scénario concernant l'influence de la végétation sur la perméabilité, cette dernière n'est affectée que par l'épaisseur de la couche de colmatage formée au fond du volume de stockage de l'ouvrage. Si l'ouvrage que l'on souhaite modéliser possède un géosynthétique poreux ou si le massif filtrant est une structure perméable plus complexe (chaussées à structure réservoir), le colmatage dépendra majoritairement d'autres paramètres (CERTU, 1998). La simulation de l'évolution du taux de perméabilité fournie par le modèle prédictif ne sera alors pas complète et donc potentiellement contestable.

- Il doit s'agir d'un ouvrage dont le mode d'évacuation est l'infiltration ou le rejet vers un réseau ou un autre ouvrage. A ce stade, la modélisation ne permet pas de simuler un ouvrage pour lequel l'évaporation ou l'évapotranspiration sont prépondérantes, comme par exemple une toiture végétalisée. Il peut aussi s'agir d'un ouvrage cumulant infiltration et surverse (potentiellement vers un autre réseau), mais sa modélisation nécessitera alors de disposer du taux de débordement moyen annuel de l'ouvrage d'infiltration pour être complète. Enfin, si la technique alternative que l'on souhaite modéliser dispose d'autres exutoires majoritaires, tels que l'évaporation ou l'évapotranspiration (toitures végétalisées), le modèle n'est pour le moment pas utilisable.

En premier stade de généralisation, deux ouvrages différents ont été modélisés à partir de l'adaptation du modèle du bassin de Django-Reinhardt. Ces deux ouvrages sont des ouvrages existants situés en région parisienne. Ils ont été choisis car leurs descriptions sont connues et surtout car les opérations d'entretien sont bien documentées.

### b. Bassin de rétention situé sur le territoire de plaine commune – Pierrefitte

#### i. Présentation du site

Le bassin du mail Brassens (**Figure 39**) est un bassin d'infiltration de 150 m<sup>3</sup> situé à l'exutoire d'un bassin versant de 8'500 m<sup>2</sup> (Boudet, 2016). Ce bassin ne dispose d'aucun bassin de pré-traitement. La pluviométrie moyenne annuelle de cette région étant de 637 mm (<http://education.meteofrance.fr/climatologie-et-records-de-precipitations>), le volume

annuel d'eau devant être traité par l'ouvrage sera au maximum de 5415 m<sup>3</sup> (hypothèse haute : rendement de ruissellement de 1). Le carnet d'entretien préconise une taille de la végétation deux fois par an et un nettoyage complet du massif filtrant deux fois par an.

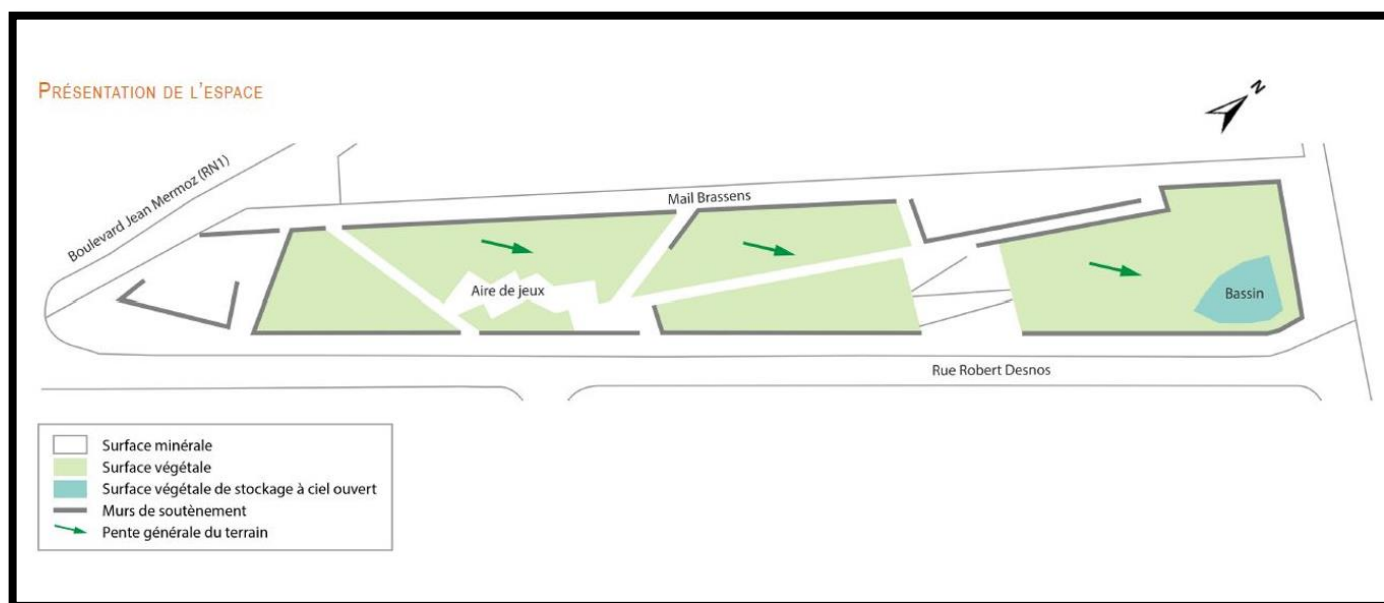


Figure 39: Schéma de la vue aérienne du Mail Brassens (Source : Agence ATM - Plaine Commune - Carnet d'entretien - Mail Brassens (ZAC des Poètes) – Pierrefitte

Nous utiliserons les mêmes valeurs de concentrations en hydrocarbures et en sédiments dans les eaux pluviales que pour la zone industrielle de Chassieu pour cette simulation.

## ii. Résultats de la simulation

Au vu de la régularité des opérations d'entretien, la simulation sera cette fois ci effectuée sur deux années seulement.

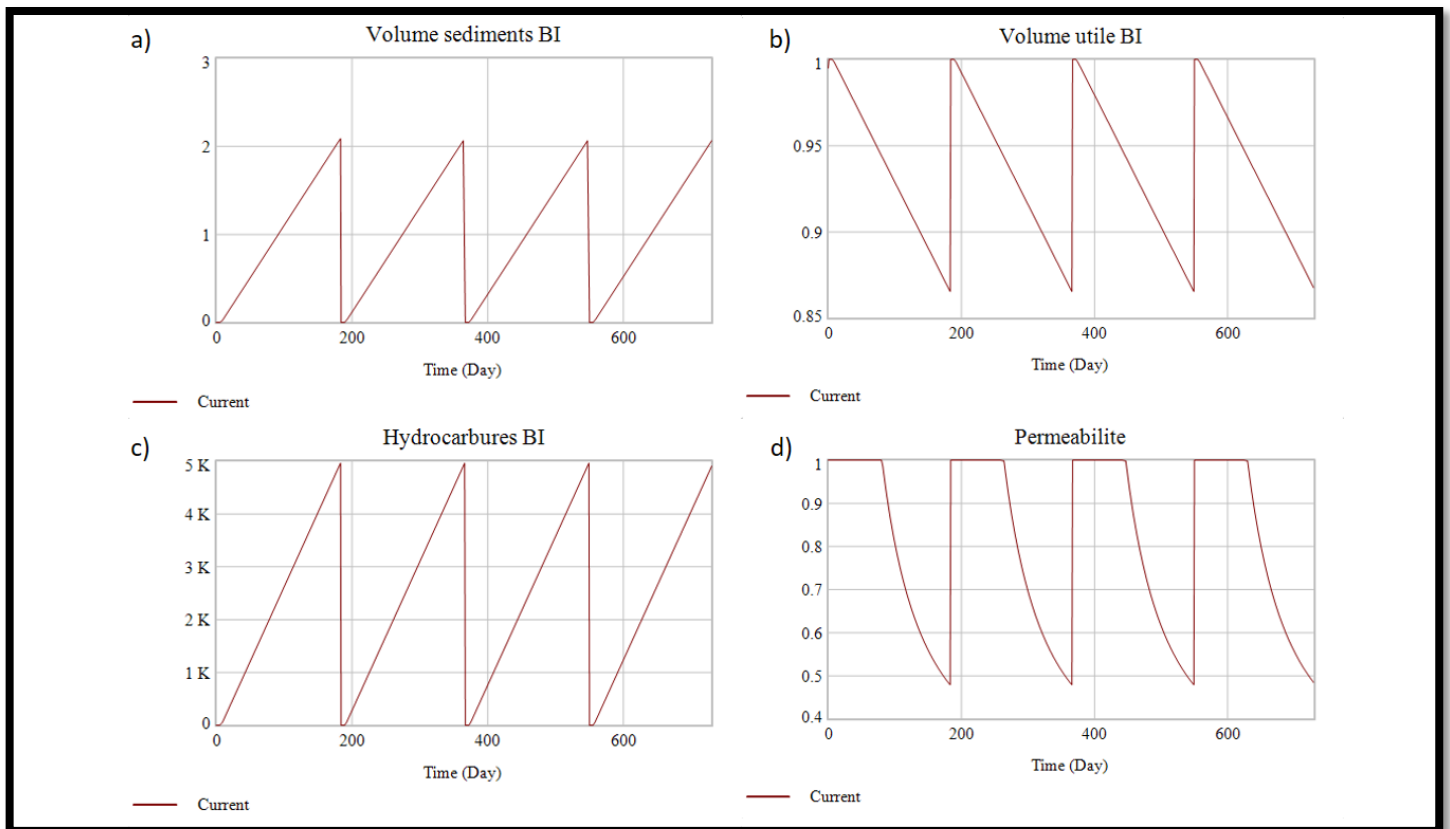


Figure 40 : Evolution des paramètres de contrôle pour le bassin de rétention de Pierrefitte : a) Volume de sédiments (en m<sup>3</sup>) – b) Volume utile restant (en pourcentage du volume initial) – c) Stock d'hydrocarbures (en g) – d) Perméabilité (en pourcentage de la perméabilité initiale)

On remarque sur la **figure 40** une décroissance légèrement plus rapide de la perméabilité pour le bassin de Pierrefitte qui, contrairement au bassin Django Reinhardt, ne dispose pas de bassin de rétention lui permettant de réduire la vitesse d'apparition d'une couche de colmatage. Toutefois, les gestionnaires des ouvrages de Plaine-commune imposent une fréquence d'entretien plus soutenue, ce qui leur permet non seulement de conserver en toute circonstance plus de 85 % du volume utile du bassin, mais aussi une perméabilité ne descendant que très rarement en dessous de 50 % de la perméabilité optimale du bassin.

Les courbes simulées tendent à confirmer l'efficacité de la stratégie d'entretien du bassin de Pierrefitte. Ce dernier ne disposant que d'un volume réduit, il est essentiel de conserver un maximum de volume utile ainsi qu'une perméabilité élevée, pour garantir une capacité de stockage suffisante pour la durée d'un événement et une évacuation de l'eau accumulée assez rapide pour que le bassin soit de nouveau opérationnel quelques jours au plus après l'occurrence de l'événement.

Le fait que les simulations fournissent des résultats de maintien des performances cohérents avec les besoins de l'ouvrage compte tenu des fréquences d'entretien spécifiées dans le carnet d'entretien semble confirmer la viabilité du modèle pour la modélisation d'un bassin plus simple que le bassin Django Reinhardt.

c. Noüe située sur le territoire de Plaine-Commune – Pierrefitte

### *i. Présentation du site*

L'ouvrage de l'allée de l'Europe situé dans la ZAC Briais Pasteur dans la commune de Pierrefitte est constitué de 7 noues successives reliées entre elles par des canalisations enterrées (**Figure 41**). Nous considérerons donc cet ouvrage comme une unique noue de 16 m<sup>3</sup> drainant un bassin versant de 900 m<sup>2</sup> (**Boudet, 2016**). La pluviométrie moyenne annuelle de cette région étant de 637 mm (<http://education.meteofrance.fr/climatologie-et-records-de-precipitations>), le volume annuel d'eau devant être traité par l'ouvrage sera au maximum de 573 m<sup>3</sup> (hypothèse haute : rendement de ruissellement de 1). Le carnet d'entretien préconise trois tailles de la végétation par an ainsi qu'une opération équivalent à un renouvellement du massif filtrant deux fois par ans.

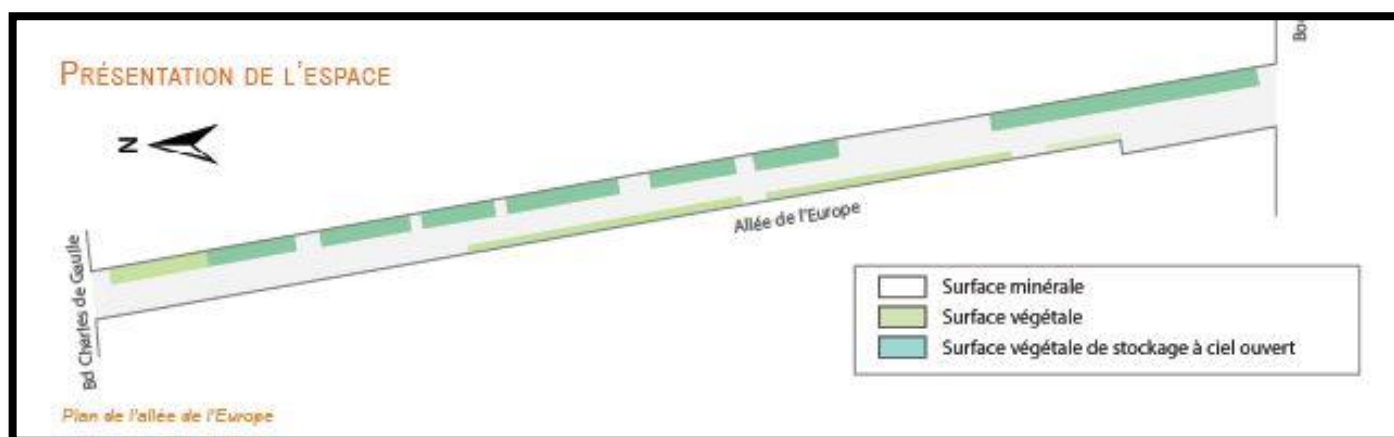


Figure 41 : Schéma de la vue aérienne de l'allée de l'Europe (Source : Agence ATM - Plaine Commune - Carnet d'entretien - ZAC Briais Pasteur – Pierrefitte sur Seine)

Nous utiliserons les mêmes valeurs de concentrations en hydrocarbures et en sédiments dans les eaux de lessivage que pour la zone industrielle de Chassieu pour cette simulation.

### *ii. Résultats de la simulation*

Au vu de la régularité des opérations d'entretien, la simulation sera cette fois ci effectuée sur deux années seulement.

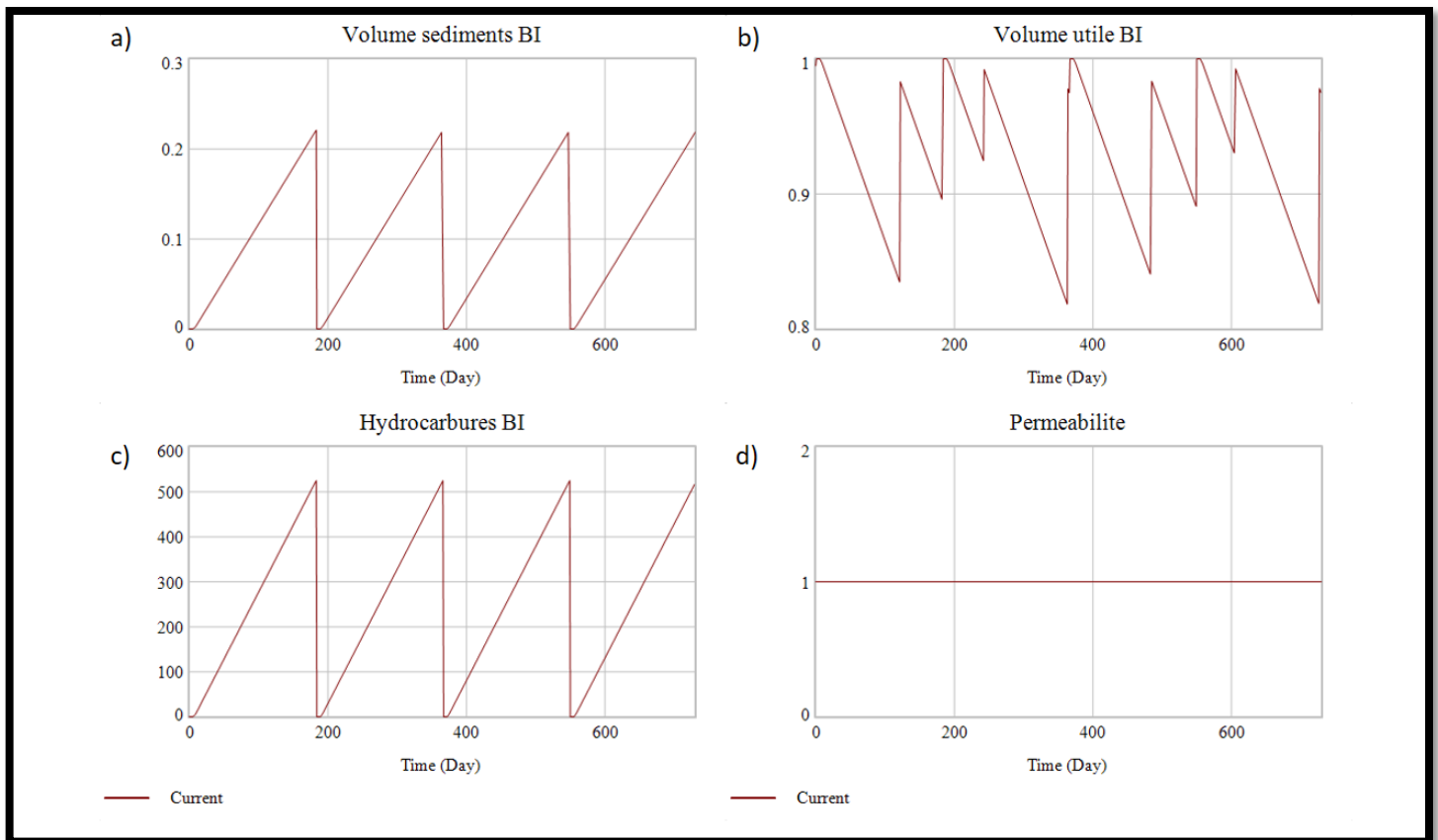


Figure 42 : Evolution des paramètres de contrôle pour la noue de l'allée de l'Europe : a) Volume de sédiments (en m3) – b) Volume utile restant (en pourcentage du volume initial) – c) Stock d'hydrocarbures (en g) – d) Perméabilité (en pourcentage de la perméabilité initiale)

On remarque sur la **figure 42** que la perméabilité reste constante tout le long de la simulation. Cela traduit le fait que les opérations d'entretien simulées maintiennent la couche de colmatage inférieure à 1 cm. La double périodicité observable pour le volume utile de la noue s'explique par les deux fréquences d'entretien :

- Tous les 121 jours pour le fauchage de la végétation
- Tous les 183 jours pour le renouvellement du massif filtrant

Cette simulation nous permet de prendre conscience de l'importance que peut prendre le volume occupé par la végétation pour les ouvrages de très petite contenance. En effet, le fauchage permet parfois de récupérer plus de 10 % du volume utile de l'ouvrage, ce qui est crucial pour des techniques alternatives comme les noues qui ne disposent que d'un volume de stockage des eaux pluviales réduit. De même, il est très important de conserver le maximum de perméabilité possible afin de garantir une évacuation de l'eau stockée la plus rapide possible et ainsi une disponibilité de l'intégralité du volume utile de l'ouvrage le plus tôt possible après l'événement pluvieux.

Les conclusions concernant l'adéquation entre les besoins des ouvrages de type « noue » et les pratiques d'entretien recommandées dans le carnet sont les mêmes que pour le bassin de Pierrefitte. Il est tout de même important de noter que le modèle semble atteindre-ici sa limite pour ce qui est de la simulation de l'évolution de la perméabilité au cours du temps. En effet, les hypothèses prises en compte pour le calcul du colmatage par la couche de sédiments ne sont pas adaptées aux ouvrages de faible volume et de faible profondeur

comme les noues. Il faudrait pour adapter le modèle à ces dernières débiter le calcul à partir d'une couche de colmatage plus fine.

Enfin, un second problème causé par les noues est celui de leur géométrie. En effet, il est plus compliqué de définir la surface que le modèle utilisera pour calculer le taux de colmatage étant donné que la surface du fond de la noue peut augmenter significativement au fur et à mesure de l'épaississement de la couche de colmatage.

#### d. Discussion sur les résultats

Les simulations du fonctionnement des ouvrages du Mail George Brassens et de l'Allée de l'Europe, dans le territoire de Plaine Commune, nous a permis de tester en partie l'adaptabilité du modèle systémique élaboré en partie III sur la base de l'ouvrage Django Reinhardt de Chassieu. La connaissance des pratiques d'entretien et des données sur leurs ouvrages nous ont permis d'effectuer des simulations avec une bonne connaissance des paramètres d'entrée.

Ces deux simulations portent sur des ouvrages radicalement différents du bassin de rétention-infiltration Django Reinhardt de par :

- **leur mode de fonctionnement** : aucun des deux ouvrages ne comportait un premier bassin de rétention-décantation.
- **leurs dimensions** : le bassin du Mail Brassens et la noue de l'Allée de l'Europe ont tous deux des volumes bien moindres de celui de Django Reinhardt (environ cent fois moins volumineux pour le bassin et mille fois moins pour la noue).

Malgré les différences fonctionnelles et morphologiques des deux ouvrages modélisés en parties b) et c), le modèle semble fournir des résultats cohérents. Ces nouvelles simulations nous ont permis de vérifier :

- la fonctionnalité du modèle prédictif même dans le cas où l'ouvrage modélisé ne possédait pas les mêmes équipements que l'ouvrage Django Reinhardt ;
- le bon fonctionnement du modèle prédictif pour des ouvrages de taille beaucoup moins importante que le bassin Django Reinhardt

La vérification de la viabilité du modèle pour une grande diversité d'ouvrages ne se fera que par confrontations successives du modèle avec le plus de techniques alternatives possible. L'amélioration de la portée du modèle se fera par améliorations successives à chaque fois qu'il se révèle incomplet ou inadapté à certains types d'ouvrages.

Il est toutefois nécessaire de préciser que les résultats restent une simple information à destination du gestionnaire qui aura pour charge de les interpréter. En effet, si la diminution très importante de perméabilité n'est pas alarmante sur un ouvrage aussi manifestement surdimensionné que le bassin Django Reinhardt, il peut s'agir d'un indicateur auquel il est très important d'être attentif pour des ouvrages de taille plus modeste. Les données fournies par le modèle restent en cela à la seule appréciation du gestionnaire de l'ouvrage.

#### e. Possibilités de généralisation du modèle

L'étude des conditions d'adaptabilité et des difficultés rencontrées pour modéliser des ouvrages différents de celui utilisé pour construire le modèle systémique nous permet



d'établir une classification des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales selon le degré d'adaptation du modèle à ces dernières.

Le **tableau 4** donne le degré d'adaptation du modèle prévisionnel développé pour le bassin Django Reinhardt à chacune des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales auxquelles cette étude s'intéresse en fonction de quatre paramètres principaux :

- **Le mode de collecte**, qui détermine le degré de ressemblance entre le processus de collecte et de décantation des eaux pluviales de la technique alternative considérée et celui que le modèle permet de simuler. Ainsi, un bassin d'infiltration précédé par un bassin de rétention aura un mode de collecte identique à celui que permet de simuler le modèle. Pour un bassin d'infiltration sans dispositif de rétention / décantation amont, une tranchée ou une noue, il n'y a pas de pré-traitement, seule la partie concernant le fonctionnement du bassin d'infiltration du modèle est donc ici utilisée. Un puits d'infiltration est rarement utilisé de manière isolée pour le traitement des eaux pluviales sur une parcelle de terrain (**CERTU, 1998**), il est donc possible qu'un phénomène de décantation ait été initié dans les ouvrages ayant recueilli l'eau avant, ou qu'une partie de cette dernière ait déjà été infiltrée, ce que le modèle ne permet pas de modéliser. Le tablier d'une chaussée à structure réservoir dispose souvent d'une capacité de filtration des hydrocarbures et des sédiments, cela s'apparente à un pré-traitement que le modèle systémique actuel ne permet pas de prendre en compte. Enfin, une toiture végétalisée reçoit directement l'eau de pluie sans que cette dernière ne soit passée par une phase de ruissellement, et ne dispose pas d'un véritable volume de stockage : une fois le substrat saturé en eau, le reste est drainé hors de la toiture. Le modèle systémique inspiré du fonctionnement de Django Reinhardt est par conséquent inadapté au mode de collecte des eaux pluviales de tels ouvrages.

- **Les exutoires prioritaires**, qui déterminent la proportion d'eau moyenne infiltrée par les TA considérées par rapport à la quantité d'eau entrant dans le système. En effet, le modèle sera plus précis pour un ouvrage qui infiltrera la majorité de l'eau qu'il reçoit durant un épisode pluvieux. Bien que le modèle dispose d'un paramètre permettant de régler le taux annuel moyen de débordement de l'ouvrage d'infiltration, les résultats obtenus seront moins précis que pour un ouvrage infiltrant l'intégralité de l'eau reçue pendant chaque événement pluvieux. Enfin, les mécanismes principaux d'évacuation de l'eau stockée par les toitures végétalisées sont l'évaporation et l'évapotranspiration. Le modèle est donc aujourd'hui totalement inadapté à la modélisation de leur fonctionnement.

- **La morphologie des ouvrages**, qui est un des paramètres prépondérants dans le calcul de la perméabilité. Ce critère permet de déterminer si l'hypothèse selon laquelle l'épaississement de la couche de colmatage se fait à surface constante est adaptée à la morphologie de la TA considérée. Pour les bassins qui ont des surfaces suffisamment conséquentes pour que la différence dans la surface de couche colmatée soit négligeable et pour les tranchées pour lesquelles cette approximation reflète le plus souvent la vérité, le mode de calcul du taux de colmatage est très adapté. La morphologie du volume de stockage des chaussées à structure réservoir est pour sa part elle aussi adaptée. Les noues ont la plupart du temps une assez faible surface et des parois en pente légère. La surface de la couche de sédiments aura donc tendance à croître substantiellement avec son épaisseur et le mode de calcul du colmatage par la couche de sédiments se révèle donc un peu moins adapté et nécessitera de prendre en compte de manière plus précise la géométrie de l'ouvrage. Les puits ont la particularité d'avoir une grande partie de leur surface d'infiltration au niveau des parois,

un modèle ne tenant compte que de l'épaisseur de la couche de sédiments formée au fond de l'ouvrage ne suffira par conséquent pas à fournir une simulation viable de l'évolution de la perméabilité d'un puit. Enfin, les toitures végétalisées ont une morphologie qui ne permet pas la génération d'une couche de colmatage en surface, le modèle sera donc une fois incapable d'en fournir une modélisation fidèle.

- **La dynamique de colmatage**, qui indique la ressemblance entre la manière dont évolue la perméabilité de la TA et celle que le modèle permet de simuler. Les bassins, tranchées et noues se colmatent majoritairement à cause de la formation d'une couche superficielle de sédiments, ce qui correspond exactement à ce que prévoit le modèle prévisionnel. Les puits, les chaussées à structure réservoir et les toitures végétalisées se colmatent d'une manière plus complexe par colmatage progressif des interstices du matériau filtrant (**CERTU, 1998**). Bien que pour les puits la formation d'une couche de colmatage reste un paramètre relativement influent sur la perméabilité, ce n'est absolument pas le cas pour les chaussées à structure réservoir et pour les toitures végétalisées, pour lesquelles le modèle actuel est donc totalement inadapté.

Suivant le degré d'adaptation du modèle à chacun des quatre paramètres considérés, il sera nécessaire d'apporter plus ou moins d'ajustements au modèle pour le rendre viable pour la simulation du comportement. Ainsi, aucun changement majeur dans le modèle ne sera nécessaire pour modéliser n'importe quel bassin d'infiltration, mais il sera nécessaire de revoir la manière dont le modèle appréhende la morphologie et le mode de colmatage de l'ouvrage pour parvenir à simuler le comportement d'un puit de manière convenable, par exemple.

Tableau 4 : Adéquation du modèle systémique pour la simulation du comportement des techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales

Typologie de technique alternative	Mode de collecte du modèle	Exutoires prioritaires du modèle	Morphologie du modèle	Dynamique de colmatage du modèle	Degré d'adaptation du modèle prévisionnel à la TA
Bassin d'infiltration disposant d'un bassin de rétention-décantation	Très adapté	Très adaptés	Très adaptée	Très adapté	Parfaitement adapté
Bassin d'infiltration seul	Adapté	Très adaptés	Très adaptée	Très adaptée	Très adapté
Tranchée	Adapté	Adaptés	Assez adaptée	Très adapté	Adapté
Noue	Adapté	Assez adaptés	Assez adaptée	Très adapté	Assez adapté
Puits d'infiltration	Assez adapté	Très adaptés	Peu adaptée	Peu adapté	Peu adapté
Chaussée à structure réservoir	Peu adapté	Peu adaptés	Adaptée	Inadapté	Inadapté
Toiture végétalisée	Inadapté	Inadaptés	Inadaptée	Inadapté	Totalement inadapté

## V- Identification des bénéfices et limites de l'approche retenue

### a. Utilisation du modèle en lien avec les pratiques d'entretien

Tel que le modèle a été conçu, il peut être utilisé de 4 manières dans l'aide à la décision du gestionnaire concernant les pratiques d'entretien de l'ouvrage :

- identifier les causes d'un dysfonctionnement constaté sur l'ouvrage
- identifier les pratiques d'entretien optimales pour garantir le maintien des performances de l'ouvrage
- confirmer l'adéquation des techniques d'entretien mises en place ou prévues pour le maintien fonctionnel de l'ouvrage sur le long terme
- évaluer qualitativement l'impact d'un nouvel équipement sur la TA
- évaluer qualitativement l'impact d'un changement important dans l'environnement de l'ouvrage

#### *i. Identification des causes de dysfonctionnement d'un ouvrage*

Le modèle cognitif peut être utilisé pour le diagnostic d'un ouvrage ne remplissant pas convenablement ses fonctions. Si l'ouvrage n'évacue pas les eaux pluviales suffisamment rapidement, le gestionnaire pourra remonter le diagramme causal jusqu'à identifier l'élément défectueux, ou à conclure à un sous-dimensionnement de l'ouvrage si toutes les composantes de l'ouvrage remplissent leurs fonctions mais que le niveau de service assuré par la TA reste insuffisant.

#### *ii. Identification des pratiques d'entretien optimales*

Sur un ouvrage neuf, le modèle prédictif peut être utilisé pour identifier les pratiques d'entretien optimales.

- Le gestionnaire devra tout d'abord **identifier le niveau de service qu'il attend de son ouvrage**. Il devra ensuite **établir un lien entre les performances exigées et les données fournies par le modèle** prédictif. En effet, les données fournies par le modèle ne sont qu'une simulation brute de l'évolution des caractéristiques de la technique alternative simulée. Cette simulation peut ne pas correspondre en tant que telle aux critères de performances utilisés par les gestionnaires. Ces derniers devront donc se l'approprier et la traduire.

Un gestionnaire voulant vérifier un critère de performance exprimé dans les termes suivants : « L'ouvrage doit permettre l'infiltration des eaux d'une pluie vingtennale en 72 h » devra connaître le volume d'eau reçu par l'ouvrage durant une pluie d'intensité vingtennale et de la durée souhaitée, ainsi que le temps mis par l'ouvrage à neuf pour évacuer de volume d'eau (par observation ou par simulation). Il pourra alors associer ces exigences à des conditions vérifiables sur le modèle telles que la perméabilité minimale souhaitée pour évacuer l'eau dans les délais voulus et le volume utile minimal souhaité pour permettre le stockage de l'intégralité du volume d'eau de l'événement considéré sans débordements.

- Le gestionnaire pourra ensuite **effectuer diverses simulations** en paramétrant des fréquences d'entretien différentes pour chaque simulation et ainsi identifier des schémas d'entretien permettant la conservation du niveau de performances minimal attendu pour l'ouvrage.

*iii. Adéquation des techniques d'entretien mises en place*

Sur un ouvrage existant disposant d'ores et déjà d'un carnet d'entretien défini, le modèle permet en entrant les paramètres de fonctionnement, de choix de scénario et d'entretien actuels de vérifier si l'entretien mis en place garantira le fonctionnement de l'ouvrage sur le long terme.

Si ce n'est pas le cas, en suivant la même méthode que précédemment, le gestionnaire pourra identifier des façons d'améliorer le schéma d'entretien de son ouvrage pour en garantir les performances minimales attendues.

Même dans le cas où les pratiques d'entretien déjà mises en place sont suffisantes, le modèle peut permettre d'identifier un surdimensionnement du schéma d'entretien utilisé, et ainsi aider à le modifier pour en réduire le coût. Par exemple, si la fréquence de nettoyage du massif filtrant d'un ouvrage est telle que l'ouvrage conserve une perméabilité équivalent à 70 % de la perméabilité initiale alors qu'un taux de 30 % serait acceptable, le modèle peut aider à définir la fréquence de nettoyage minimale d'entretien de l'ouvrage.

*iv. Evaluation qualitative de l'impact d'un nouvel équipement*

Dans le cas où l'ouvrage ne garantit pas le niveau de service minimal attendu par ses gestionnaires et qu'il est envisagé de lui adjoindre un équipement de traitement secondaire pour l'aider à remplir une de ses fonctions, le modèle prédictif pourra alors servir à définir les caractéristiques minimales nécessaires de l'équipement.

Un ouvrage qui se colmaterait trop rapidement et nécessiterait une fréquence de nettoyage de son massif filtrant déraisonnable pour conserver une perméabilité suffisante pourrait bénéficier de l'ajout d'un bassin de décantation ou d'un dégrilleur en amont, par exemple. Le gestionnaire de cet ouvrage pourra ainsi effectuer diverses simulations, avec/sans bassin de rétention, avec/sans dégrilleur, en faisant varier les caractéristiques techniques du bassin de rétention et la performance du dégrilleur pour identifier les adaptations adéquates à apporter à la TA pour garantir son bon fonctionnement.

*v. Evaluation qualitative de l'impact d'un changement dans l'environnement*

Enfin, le modèle peut permettre au gestionnaire d'évaluer l'impact d'un changement dans l'environnement de son ouvrage d'infiltration, et de déterminer si l'ouvrage ou son schéma d'entretien nécessiteront des ajustements pour permettre de gérer la nouvelle configuration.

Ainsi, si le bassin versant d'une technique alternative subit une extension de 20% de son territoire artificialisé après un certain temps, le gestionnaire pourra augmenter à ce moment le volume d'eau annuellement reçu par le bassin de 20%. Les résultats de la

simulation permettront alors au gestionnaire de voir si l'ouvrage d'infiltration, tel qu'il est actuellement conçu, encaissera sans soucis cette modification de son environnement ou si des ajustements peuvent se révéler nécessaires au niveau de son entretien ou de ses équipements. Le cas échéant, le gestionnaire pourra de nouveau utiliser le modèle comme décrit dans les parties **ii** et **iv** afin de déterminer de quelle manière ajuster les pratiques d'entretien ou quels équipements il pourrait être intéressant d'ajouter à l'ouvrage existant.

#### b. Analyse critique de l'approche retenue

Le principal atout du modèle que nous avons développé au cours de ce travail réside dans sa capacité à surmonter la difficulté que pose la multiplicité des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. La modélisation systémique nous permet de simuler de manière cohérente un grand panel de systèmes complexes très différents les uns des autres, le tout en ne requérant qu'une faible quantité d'informations auprès de l'utilisateur du modèle.

Il est toutefois très important de conserver à l'esprit que le modèle systémique n'a pas vocation à fournir des résultats quantitatifs précis, mais une tendance d'évolution sur le long terme témoignant de la performance globale du système considéré.

Cette notion de long terme a son importance. L'utilisation de valeurs moyennées sur de très longues durées ainsi que de modèles spatiaux ne prenant pas en compte les éventuelles hétérogénéités des phénomènes considérés ne permet pas de se servir de ce modèle pour la simulation du comportement de l'ouvrage à l'échelle d'un événement. Seule son utilisation pour évaluer l'évolution des caractéristiques de la TA sur des périodes de quelques années ou plus peut être considérée comme efficace.

Enfin, la pertinence de la simulation dans le cadre de l'aide à la décision concernant l'entretien de l'ouvrage réside grandement dans la compréhension du modèle qu'a son utilisateur ainsi que dans sa capacité à traduire la réalité du terrain dans les paramètres d'entrée du modèle de manière cohérente.

Afin de diminuer cette importance d'une très bonne maîtrise du modèle pour garantir son efficacité, une solution peut être envisagée. En effet, les variables d'entrée et de contrôle du modèle ont été définies à partir de l'idée de la littérature des connaissances dont disposent les gestionnaires des TA ainsi que de leurs besoins pour l'aide à la décision. Un questionnaire adressé à ces mêmes gestionnaires pourrait aider à cibler leurs connaissances et besoins réels et ainsi à adapter le modèle en conséquence, ce que ce travail n'a pas eu le temps de mettre en place.

#### c. Perspectives de recherches

##### *i. Généralisation du modèle à d'autres fonctions*

A son stade de développement actuel, nous ne nous sommes intéressés majoritairement qu'à trois aspects du modèle prédictif en relation avec les opérations d'entretien :

- la perméabilité, afin d'évaluer la capacité d'infiltration de l'ouvrage ;
- le stockage des hydrocarbures dans le massif filtrant de l'ouvrage, afin d'évaluer le risque de pollution de son milieu par l'ouvrage ;

- le stockage des sédiments dans l'ouvrage, afin d'évaluer l'évolution de son volume utile.

Toutefois, la fonction de service prépondérante peut varier d'un ouvrage à l'autre, et reste à l'entière appréciation de son gestionnaire. Par exemple, pour un bassin d'infiltration aménagé en espace vert et accueillant des promeneurs devra être entretenu différemment d'un ouvrage devant simplement assurer l'évacuation des eaux pluviales. Il pourrait donc être intéressant de compléter le modèle en y intégrant l'évolution de la performance d'autres fonctions de services que peuvent posséder les TA.

Cherqui et Barraud et al. (2016) identifient par exemple les fonctions permettant l'évaluation des performances des techniques alternatives. La **figure 43** les résume et illustre le fait que les techniques alternatives peuvent assurer de nombreuses fonctions de services dont certaines impliquent des actions d'entretien.

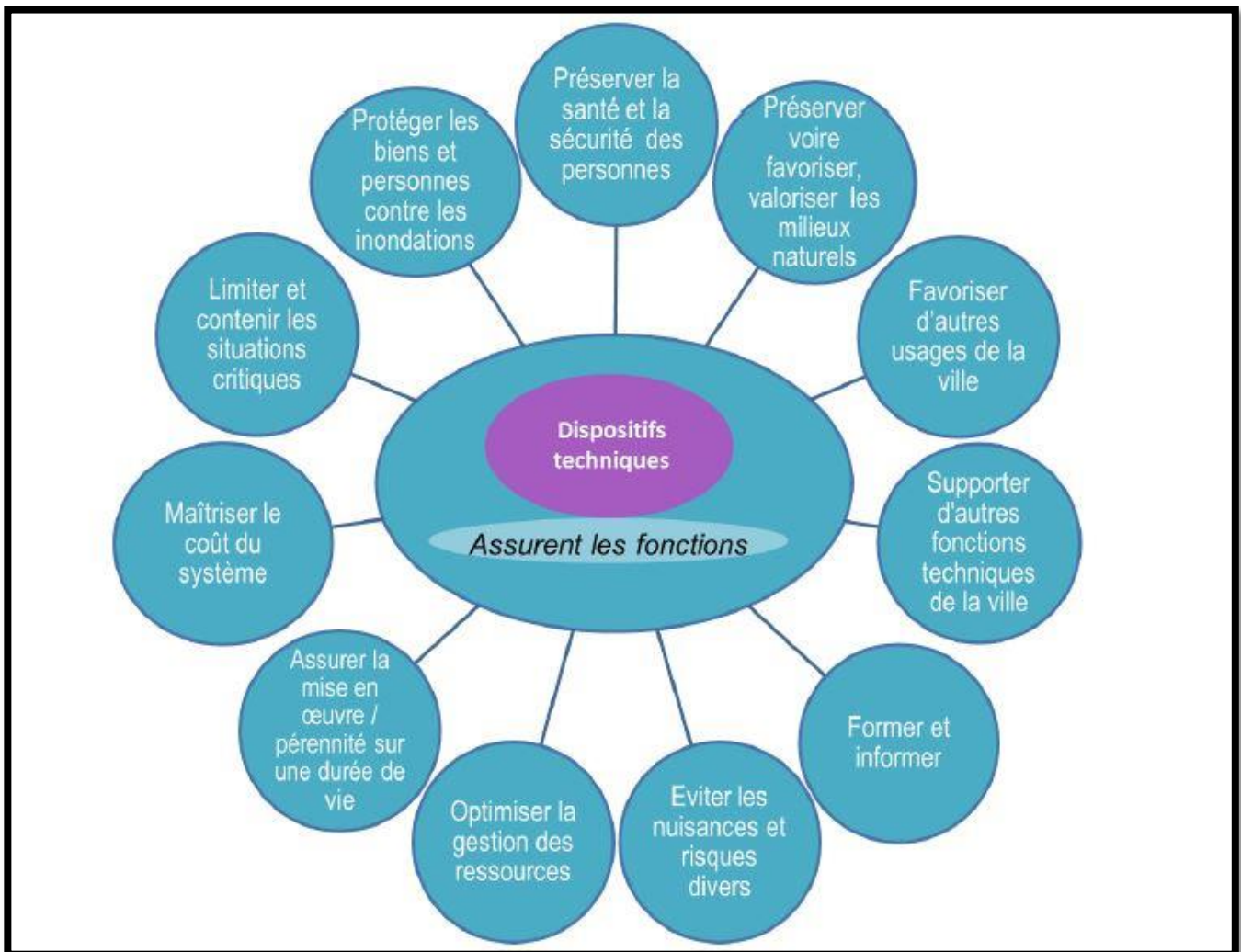


Figure 43 : Diagramme représentant les différentes fonctions de service que peut posséder une technique alternative de gestion des eaux pluviales (source : Cherqui et Barraud et al., 2016)

On remarque tout d'abord que le modèle permet d'ores et déjà l'estimation des performances de certaines de ces fonctions de service. On notera par exemple la fonction « préserver et/ou optimiser les ressources ». Cette dernière est définie par **Cherqui & Barraud et al.** d'après la capacité de l'ouvrage à « maintenir un renouvellement suffisant [de la

nappe] » et à « *empêcher la dégradation de la ressource* ». Ces deux fonctions sont respectivement assurées par la perméabilité et la capacité de filtration des hydrocarbures du bassin. Le gestionnaire du bassin devra alors se concentrer sur la conservation de la perméabilité et le nettoyage régulier de son massif filtrant pour garantir cette fonction de service. Toutefois le modèle ne permet pas d'adapter l'entretien de l'ouvrage à toutes les fonctions de service.

En reprenant l'exemple d'un bassin aménagé en espace vert, la fonction de service la plus importante aux yeux de son gestionnaire pourrait être « Favoriser d'autres usages de la ville ». Cette fonction de service ne sera remplie par l'ouvrage que si ce dernier possède un cadre agréable, imposant par exemple un certain type de végétation ou la présence d'infrastructures sportives. Le modèle ne serait alors intéressant pour lui que s'il permet le calcul d'un paramètre rendant compte de l'aspect « accueillant » de l'ouvrage. Le gestionnaire pourra alors adapter la fréquence de ses opérations d'entretien du bassin pour satisfaire à cette fonction, et non-plus à la fonction « préserver et/ou optimiser les ressources » (définie précédemment), potentiellement moins exigeante en entretien. Dans ce même cas d'un ouvrage très fréquenté, une autre fonction de service priorisée par le gestionnaire pourrait être « préserver la sécurité et la santé des personnes ». Bien que la quantité d'hydrocarbure stockée dans le massif filtrant soit en partie un indicateur de cette fonction de service, elle n'est pas suffisante. **Sebastian (2013)** évoque en effet la présence de nombreux autres polluants susceptibles de contaminer le massif filtrant des ouvrages d'infiltration, que le modèle ne permet pour le moment pas de prendre en compte. Le gestionnaire de l'ouvrage pourra alors, suivant les quantités cumulées de polluants dans le sol de son ouvrage, envisager des opérations de nettoyage du massif filtrant plus fréquentes pour satisfaire à la préservation de la santé des usagers de son ouvrage.

Une autre priorité des gestionnaires d'ouvrages pourrait être la gestion du risque. Prenons l'exemple d'un bassin versant fortement imperméabilisé sujet à des phénomènes de ruissellement très prononcés, et muni d'une multitude de petits ouvrages (type noue). La fonction de service privilégiée par le gestionnaire des techniques alternatives d'un tel espace sera la fonction « Limiter / contenir les situations critiques », qui sera majoritairement conditionnée par le volume utile disponible de ses ouvrages. Le gestionnaire aura alors tout intérêt à conserver le volume utile de ses ouvrages au maximum en toutes circonstances, et cela requerra donc des opérations de fauche très régulière pour éviter le remplissage du volume utile de ses ouvrages. Cela se fera donc au détriment de la perméabilité si cette dernière est favorisée par le système racinaire de la végétation, et ainsi au détriment de la fonction de service « préserver et/ou optimiser les ressources » (entre autres).

Enfin, une variable décisionnelle non négligeable que le modèle n'intègre pas encore est la maîtrise du coût du système et de son entretien. Le coût des opérations d'entretien pourrait ainsi être calculé, mais aussi les coûts d'ajouts d'autres dispositifs à l'ouvrage si le scénario le prévoit. La possibilité d'évaluer cette fonction de service permettrait aux gestionnaires des TA de déterminer le surcoût généré par des méthodes d'entretien surdimensionnées par rapport aux besoins de l'ouvrage. Ils pourraient de plus comparer les coûts générés par deux méthodes différentes de gestion de l'ouvrage pour arriver au même résultat (exemple : ajout d'un décanteur en amont du bassin ou augmentation de la fréquence de nettoyage du massif filtrant). L'ajout d'éléments dans le modèle prédictif permettant de déterminer le coût des opérations serait un facteur décisif dans l'aide à la décision apportée par l'approche systémique aux gestionnaires des ouvrages.

Il faut toutefois souligner le fait que plus le modèle se voudra exhaustif dans les fonctions de service dont il se propose de mesurer la performance, plus le nombre de paramètres d'entrée demandés aux gestionnaires des techniques alternatives sera important. Il sera alors nécessaire de développer un moyen simple pour les gestionnaires de compiler leur connaissance du fonctionnement de l'ouvrage, afin de conserver une bonne accessibilité du modèle. Pour ce faire, le meilleur moyen reste d'écarter du modèle les fonctions de service pouvant être considérées comme « secondaires » dans la prise de décision concernant l'entretien des ouvrages. Ainsi, il serait inutile d'intégrer au modèle des fonctions telles que « former et informer », qui ne seront que peu l'objet d'opérations d'entretien.

Cette étude ne s'est toutefois pas assez intéressée aux diverses fonctions de services associées aux techniques alternatives pour en établir une liste. Seule une enquête menée auprès des gestionnaires sur les fonctions de services qu'ils considèrent comme étant prépondérantes sur leur ouvrage sera à même de nous renseigner sur les modifications prioritaires à apporter au modèle pour en augmenter la portée.

## *ii. Développement des modèles décisionnels et normatifs*

Ce travail de master a permis le développement d'un modèle cognitif ainsi que celui d'un modèle prédictif simple pour le fonctionnement des techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. Toutefois, le modèle prédictif ne permet que de fournir des données brutes qui doivent ensuite être extraites et interprétées par les gestionnaires. Le travail de décision qui s'ensuit reste alors à faire.

Le développement d'un modèle décisionnel reste alors à envisager. Ce dernier aurait pour objectif de lire les données de sortie du modèle prédictif et d'orienter la prise de décision des gestionnaires en fonction des résultats. Cela implique un modèle capable, dans un premier temps, d'associer les différentes données de sortie entre elles afin de calculer les risques de dysfonctionnements, comme par exemple l'association du taux de perméabilité et du volume disponible pour calculer un risque de débordement. Le modèle prévisionnel devra alors être capable de suggérer une ou plusieurs modifications dans le schéma d'entretien des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales pour pallier à ces risques de dysfonctionnement. D'autres paramètres pourraient être pris en compte dans l'aide à la décision, comme par exemple le choix du scénario le moins coûteux garantissant le niveau minimal de service requis par le gestionnaire, ou encore la possibilité pour l'ouvrage de gérer des événements d'intensités importantes (cinquantennale, centennale...)

La nécessité de développement d'un modèle normatif est plus discutable. Elle s'applique à la gestion de situations de crise, présentant un fort enjeu de sécurité. Le modèle prévisionnel nous renseigne sur l'évolution à l'échelle de l'année des caractéristiques de l'ouvrage, tandis que les situations de crises liées aux ouvrages de gestion des eaux pluviales ne prennent place qu'à l'échelle de quelques jours au plus. Un modèle normatif trouverait de meilleures applications dans le traitement de données en temps réel de pluviométrie et de remplissage de l'ouvrage et d'aide à la prise de décisions telles que l'évacuation des riverains ou la protection de sites sensibles risquant d'être touchés par les inondations issues du débordement de l'ouvrage.



## Conclusion

Cette étude cherchait à répondre à un besoin d'aide à la connaissance et à l'identification des bonnes pratiques d'entretien à adopter vis-à-vis des techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales.

Nous avons été en mesure d'identifier la systémique comme un outil efficace pour la compréhension et la modélisation des systèmes complexes. Nous avons donc, à l'aide des outils fournis par la systémique, élaboré deux modèles différents, le modèle cognitif pour l'aide à l'appréhension du fonctionnement de l'ouvrage et le modèle prédictif pour la simulation de son comportement et de son évolution dans le temps en lien avec les pratiques d'entretien.

Le travail réalisé nous a confortés quant à l'utilité de l'approche systémique dans l'aide à la gestion des techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales en particulier. En effet la modélisation systémique s'est révélée particulièrement efficace pour intégrer la diversité des techniques alternatives et surmonter la difficulté que cette dernière pose à l'approche analytique. Elle a aussi permis l'introduction d'observations qualitatives quant aux effets de certains composants habituels des ouvrages d'infiltration dont le détail est encore méconnu mais dont on connaît la tendance générale.

Le modèle obtenu satisfait donc les exigences de notre travail exploratoire, à savoir, dans un premier temps, la nécessité pour les gestionnaires des techniques alternatives de disposer d'un outil leur permettant d'acquérir des connaissances qualitatives utiles à la bonne gestion de leur ouvrage. En cela, la modélisation systémique est très efficace puisqu'elle ne requiert que quelques connaissances de base du fonctionnement de l'ouvrage pour en simuler qualitativement l'évolution au cours du temps. Dans un second temps, l'approche systémique nous a permis de considérablement faciliter l'intégration des opérations d'entretien des ouvrages et la visualisation de leur impact sur le comportement de l'ouvrage, ce qui constituait un des enjeux majeurs de notre étude.

Il reste cependant de nombreuses pistes à explorer pour améliorer la prise en compte par le modèle des fonctions de services nécessitant des opérations d'entretien ou une gestion particulière des techniques alternatives. Une enquête auprès des gestionnaires d'ouvrages d'infiltration des eaux pluviales pourrait participer à l'identification des apports prioritaires à faire au modèle.

Enfin notre utilisation de l'approche systémique permet pour le moment à l'aide à la compréhension et à l'anticipation du comportement des techniques alternatives. Elle requiert ensuite la mise à profit de l'expertise de l'utilisateur du modèle pour être interprétée et utilisée dans la gestion du fonctionnement de l'ouvrage d'infiltration des eaux pluviales concerné. Notre étude a montré qu'il y a encore un potentiel inexploité de l'approche systémique à créer un modèle « décisionnel » opérationnel et intuitif d'aide à la prise de décision concernant la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales.

Une étude plus poussée pourrait être intéressante dans la perspective d'accroître notre capacité à gérer les techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales ainsi que notre connaissance du potentiel de l'approche systémique pour l'aide à la gestion de ces dernières.

## **Remerciements**

Cette recherche a été menée grâce à l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU), à l'origine des données sur le bassin de rétention-infiltration de Django-Reinhardt.

## **Bibliographie**

### **Agence ATM – 2017**

Carnet d'entretien – Mail Brassens (ZAC des Poètes) – Pierrefitte-sur-Seine – 11 p.

### **Agence ATM – 2017**

Carnet d'entretien – ZAC Briais Pasteur – Pierrefitte-sur-Seine – 15 p.

### **ANR – 2014**

Outil Méthodologique d'aide à la Gestion intégrée des eaux urbaines (Omega) – Programme de Recherche Villes Durables (2009) – Rapport scientifique – 100 p.

### **Boudet C. et al. – 2016**

La gestion à ciel ouvert des eaux pluviales sur le territoire de Plaine Commune : retour d'expérience et étude sur les problématiques de gestion – Novatech – 8 p.

### **Cambien A. – 2007**

Une introduction à l'approche systémique – Appréhender la complexité – CERTU – 85 p.

### **CERTU – 1998**

Techniques alternatives aux réseaux d'assainissement pluvial – 155 p.

### **Cherqui F. et al. – 2016**

De la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement aux techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, une nouvelle histoire à écrire pour la gestion intégrée des eaux urbaines – Revue Science Eaux et Territoires N°20 – p 22.-p 27.

### **Cherqui F. and Barraud S. et al. – 2016**

Méthodologie pour l'évaluation des performances des systèmes de gestion des eaux pluviales centralisés et décentralisés – Micromegas – Livrable 1-A – ONEMA – Agence de l'eau – 19 p.

### **Commission européenne – 2012**

Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols – Luxembourg : Office des publications de l'Union européenne – 62 p.

### **De Rosnay J. – 1975**

Le Macroscopie – Vers une vision globale – Ed. Seuil – Collection Civilisation

### **Dicanot A. – 2016**

Expérimentation de l'approche par modélisation systémique pour évaluer les performances d'un ouvrage d'infiltration des eaux pluviales : une aide à la gestion ? – Master recherche « Sciences de l'Environnement Industriel & Urbain (SEIU) » - 68 p.

### **European Environment Agency – 2016**

The European Observation Network for Territorial Development and Cohesion (ESPON) presented a forecast of land-use trends in Europe for the coming two decades - <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/increase-in-urban-surface-201020132030-baseline>

**Gonzalez-Merchan C. – 2012**

Amélioration des connaissances sur le colmatage des systèmes d'infiltration d'eaux pluviales – thèse – 298 p.

**Goutaland D. – 2008**

Caractérisation hydrogéophysique d'un dépôt fluvioglacière. Evaluation de l'effet de l'hétérogénéité hydrodynamique sur les écoulements en zone non-saturée – thèse – 246 p.

**GRAIE**

OTHU - [http://www.graie.org/othu/ptsite\\_2.htm](http://www.graie.org/othu/ptsite_2.htm)

**Lassabatere L. et al. – 2010**

Effects of the settlement of sediments on water infiltration in two urban infiltration basins – Geoderma – Elsevier – 10 p.

**Leal Neto C. et al. – 2006**

A system dynamics model for the environmental management of the Septiba bay watershed, Brazil – Springer Science+Business Media, Inc. 2006 – 10 p.

**Météo France**

<http://education.meteofrance.fr/climatologie-et-records-de-precipitations>

**Mirchi A. et al. – 2012**

Synthesis of System Dynamics Tools for Holistic Conceptualisation of Water Resources Problems – Springer Science+Business Media B. V. 2012 – 22 p.

**Moura P. – 2008**

Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain – thèse – 349 p.

**Saulais M. – 2012**

Colonisation végétale des bassins d'infiltration et de rétention : caractérisation de la flore et évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'horizon de surface végétalisé – thèse – 263 p.

**Sebastian C. – 2013**

Bassin de retenue des eaux pluviales en milieu urbain : performance en matière de piégeage des micropolluants – thèse – 356 p.

**Sebastian C. et Barraud S. – 2017**

Evaluation in situ des teneurs en micropolluants d'un bassin de retenue-décantation des eaux pluviales. Eaux et sédiments – INOGEV : Innovation pour l'eau en ville – TSM numéro 7/8 – 17 p.

**Schulting, F. L. and Alegre, H. – 2007**

Global developments of strategic asset management. LESAM 2007 (Leading Edge Strategic Asset Management), IWA and LNEC. Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom

**Soil Science Society of America – 2014**

<https://www.soils.org/discover-soils/soils-in-the-city/green-infrastructure/how-water-moves-cities>

**Sterman JD. – 2000**

Business dynamics, systems thinking and modeling for a complex world – McGraw-Hill - 1008 p.

**Thomas A. O. et al. – 2016**

Operation and maintenance of Stormwater Control Measures – Novatech – 4 p.

**Ventana Systems – 1988-2017**

Vensim PLE Plus - <http://www.ventanasystems.com/software/>

## Annexes

**Annexe 1 :** Version textuelle de la base de données du modèle prédictif

### **Paramètres d'entrée :**

#### **Paramètres de comportement de l'ouvrage,**

- Volume d'eau annuel,
- Teneur en sédiments des eaux de lessivage,
- Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage,
- Perte d'efficacité annuelle du dégrilleur,
- Efficacité a neuf du dégrilleur,
- Perte d'efficacité annuelle du déshuileur,
- Efficacité a neuf du déshuileur,
- Volume du BR,
- Taux de décantation des infrastructures
- Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BR,
- Pourcentage du volume du BR occupe par une végétation entièrement développée,
- Perte d'efficacité annuelle du séparateur,
- Volume du BI,
- Surface du BI,
- Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BI,
- Pourcentage du volume du BI occupe par une végétation entièrement développée,

#### **Paramètres d'entretien**

- Temps de renouvellement du déshuileur,
- Temps de renouvellement du dégrilleur,
- Temps entre deux curages BR,
- Temps entre deux vidanges séparateur HC,
- Temps entre deux fauchages BI,
- Temps entre deux renouvellements du massif filtrant BI,

#### **Paramètres de choix de scénario**

- Contamination Sédiments BV,
- Contamination HC BV,
- Scénario relation taux de décantation/végétation,
- Scénario relation végétation/perméabilité,
- Scénario relation taux de décantation/Volume utile BR,
- Débordement,
- Surverse BR vers BI,

### **Variables de transition**

- Taux de renouvellement du dégrilleur,
- Taux de renouvellement du déshuileur,
- Taux de curage,
- Taux de vidange de la cloison siphonée,
- Taux de fauchage,
- Taux de renouvellement du massif filtrant ,
- Taux de colmatage,
- Taux de décantation,
- Perméabilité,

### **Amont du bassin**

- Perte d'efficacité,
- Coefficient de dégrillage,
- Perte d'efficacité,
- Coefficient de déshuilage,

### **Bassin de rétention**

- Taux de décantation,
- Taux de contamination sédiments BR,
- Remplissage sédiments,
- Volume sédiments BR,
- Taux de contamination HC BR,
- Remplissage HC,
- Hydrocarbures BR,
- Croissance végétation BR,
- Végétation BR,
- Volume utile BR,

### **Eléments de transition**

- Perte d'efficacité 3,
- Séparateur HC BR vers BI,

### **Bassin d'infiltration**

- Taux de contamination sédiments BI,
- Remplissage sédiments,
- Volume sédiments BI,
- Taux de contamination HC BI,
- Remplissage HC,
- Hydrocarbures BI,
- Croissance végétation BI,
- Végétation BI,
- Volume utile BI,
- Exutoire,
- Remplissage sédiments,
- Sédiments débordés,
- Remplissage HC,
- HC débordés,
- Perméabilité .

## **Composants du modèle prévisionnel**

### **1 Paramètres d'entrée**

#### ***1.1 Paramètres de comportement de l'ouvrage***

##### **1.1.1 Volume d'eau annuel**

- Paramètres impactés
  - Remplissage HC 1

- Remplissage HC 2
- Remplissage HC 3
- Remplissage sediments 1
- Remplissage sediments 2
- Remplissage sediments 3
- Volume d'eau annuel entrant dans le bassin

### **1.1.2 Teneur en sédiments des eaux de lessivage**

- Paramètres impactés
  - Remplissage sediments 1
  - Remplissage sediments 2
  - Remplissage sediments 3
- Quantité de sédiments moyenne des eaux de lessivage exprimée en m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

### **1.1.3 Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage**

- Paramètres impactés
  - Remplissage HC 1
  - Remplissage HC 2
  - Remplissage HC 3
- Quantité d'hydrocarbure moyenne des eaux de lessivage exprimée en g/m<sup>3</sup>

### **1.1.4 Perte d'efficacité annuelle du dégrilleur**

- Paramètres impactés
  - Perte d'efficacité 1
- Exprimé en pourcentage de l'efficacité optimale (100%)

### **1.1.5 Efficacité à neuf du dégrilleur**

- Paramètres impactés
  - Perte d'efficacité 1
- Exprimé en pourcentage de l'efficacité optimale (100%)

### **1.1.6 Perte d'efficacité annuelle du deshuileur**

- Paramètres impactés
  - Perte d'efficacité 2
- Exprimé en pourcentage de l'efficacité optimale (100%)

### **1.1.7 Efficacité à neuf du deshuileur**

- Paramètres impactés
  - Perte d'efficacité 2
- Exprimé en pourcentage de l'efficacité optimale (100%)

### **1.1.8 Volume du BR**

- Paramètres impactés
  - Volume utile BR
- Exprimé en m<sup>3</sup>

### **1.1.9 Taux de décantation des infrastructures**

- Paramètres impactés
  - Taux de decantation 0
- Pourcentage des sédiments ayant le temps de décanter dans le bassin de rétention en moyenne lors d'un événement, exprimé en pourcentage du total de sédiment parvenant au BR

### **1.1.10 Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BR**

- Paramètres impactés
  - Croissance vegetation BR
- Exprimé en temps avant arrêt ou ralentissement notable de la croissance de la végétation

### **1.1.11 Pourcentage du volume du BR occupé par une vegetation entierement developpee**

- Paramètres impactés
  - Volume utile BR
- Estimation du volume du bassin occupé par une végétation au maximum de sa taille atteignable dans le BR

### **1.1.12 Perte d'efficacite annuelle du separateur**

Paramètres impactés

Perte d'efficacite 3

Separateur HC BR vers BI

Exprimé en pourcentage de l'efficacité optimale (100%)

### **1.1.13 Volume du BI**

- Paramètres impactés
  - Volume utile BI
- Exprimé en m<sup>3</sup>

### **1.1.14 Surface du BI**

- Paramètres impactés
  - Taux de colmatage
- Surface du fond du BI, exprimée en m<sup>2</sup>

### **1.1.15 Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BI**

- Paramètres impactés
  - Croissance vegetation BI
- Exprimé en temps avant arrêt ou ralentissement notable de la croissance de la végétation

### **1.1.16 Pourcentage du volume du BI occupé par une végétation entièrement développée**

- Paramètres impactés
  - Volume utile BI
- Estimation du volume du bassin occupé par une végétation au maximum de sa taille atteignable dans le BI

## ***1.2 Paramètres d'entretien***

### **1.2.1 Temps de renouvellement du deshuileur**

- Paramètres impactés
  - Taux de renouvellement du deshuileur

### **1.2.2 Temps de renouvellement du degriilleur**

- Paramètres impactés
  - Taux de renouvellement du degriilleur

### **1.2.3 Temps entre deux curages BR**

- Paramètres impactés
  - Taux de curage

### **1.2.4 Temps entre deux vidanges séparateur HC**

- Paramètres impactés
  - Taux de vidange

### **1.2.5 Temps entre deux fauchages BI**

- Paramètres impactés
  - Taux de fauchage

### **1.2.6 Temps entre deux renouvellements du massif filtrant BI**

- Paramètres impactés
  - Taux de renouvellement du massif filtrant

### **1.2.7 Tous ces paramètres doivent être exprimés en jours**

## ***1.3 Paramètres de choix de scénario***

### **1.3.1 Contamination Sédiments BV**

- Paramètres impactés
  - Taux de contamination sédiments BR
  - Taux de contamination sédiments BI
- On prend le taux de contamination du BV par les sédiments égal à 100% du taux de conception. Des modifications peuvent être apportées si un aménagement ou un événement vient modifier la concentration en sédiments dans l'eau, auquel cas, on remplacera cette valeur par le pourcentage du taux de conception correspondant à la nouvelle concentration.



### 1.3.2 Contamination HC BV

- Paramètres impactés
  - Taux de contamination HC BR
  - Taux de contamination HC BI
- On prend le taux de contamination du BV par les hydrocarbures égal à 100% du taux de conception. Des modifications peuvent être apportées si un aménagement ou un événement vient modifier la concentration en hydrocarbures dans l'eau, auquel cas, on remplacera cette valeur par le pourcentage du taux de conception correspondant à la nouvelle concentration.

### 1.3.3 Scenario relation taux de decantation/vegetation

- Paramètres impactés
  - Taux de decantation 0
- Scénarios possibles :
  - 1 : Très forte influence de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +30% de taux de décantation à 100% de végétation 2 : Forte influence de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +20% de décantation à 100% de végétation 3 : Faible influence de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +10 % de décantation à 100% de végétation 4 : Influence nulle de la végétation
- Choisir une valeur en fonction du scénario voulu

### 1.3.4 Scenario relation vegetation/permeabilite

- Paramètres impactés
  - Permeabilite 0
- Scénarios possibles
  - 1 : Très forte influence positive de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +30% de perméabilité pour 100% de végétation 2 : Forte influence positive de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +20% de perméabilité pour 100% de végétation 3 : Faible influence positive de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +10% de perméabilité pour 100% de végétation 4 : Aucune influence de la végétation 5 : Faible influence négative de la végétation = décroissance linéaire jusqu'à -10% de perméabilité pour 100% de végétation 6 : Forte influence négative de la végétation = décroissance linéaire jusqu'à -20% de perméabilité pour 100% de végétation 7 : Très forte influence négative de la végétation = décroissance linéaire jusqu'à -30% de perméabilité pour 100% de végétation
- Choisir une valeur en fonction du scénario voulu

### 1.3.5 Scenario relation taux de decantation/Volume utile BR

- Paramètres impactés
  - Taux de decantation 0
- Scénarios possibles :
  - 0 : Aucune influence du volume utile restant sur le taux de décantation
  - 1 : Décroissance linéaire jusqu'à -50% de taux de décantation pour un bassin plein
  - 2 : Décroissance linéaire jusqu'à -100% de taux de décantation pour un bassin plein
- Choisir une valeur en fonction du scénario voulu

### 1.3.6 Debordement

- Paramètres impactés
  - Remplissage HC 2
  - Remplissage HC 3

- Remplissage sédiments 2
- Remplissage sédiments 3
- Cette variable exprime le pourcentage moyen annuel d'eau débordée du bassin d'infiltration vers l'extérieur

### 1.3.7 Surverse BR vers BI

- Paramètres impactés
  - Taux de contamination HC BR
  - Taux de contamination sédiments BR
  - Taux de contamination HC BI
  - Taux de contamination sédiments BI
- Cette variable exprime le pourcentage d'eau surversée directement du bassin de rétention vers le bassin d'infiltration en moyenne sur l'année

## 2 Variables de transition

### 2.1 *Taux de renouvellement du dégrilleur*

- Paramètres impactants
  - Temps de renouvellement du dégrilleur
  - FINAL TIME
- Paramètres impactés
  - Coefficient de dégrillage
- Formule : PULSE TRAIN ( 0 , 1 , Temps de renouvellement du dégrilleur , FINAL TIME )
- Prend la valeur 1 pendant 1 pas de temps à partir de 0 et à intervalles réguliers jusqu'à FINAL TIME

### 2.2 *Taux de renouvellement du deshuileur*

- Paramètres impactants
  - Temps de renouvellement du deshuileur
  - FINAL TIME
- Paramètres impactés
  - Coefficient de deshuilage
- Formule : PULSE TRAIN ( 0 , 1 , Temps de renouvellement du deshuileur , FINAL TIME )
- Prend la valeur 1 pendant 1 pas de temps à partir de 0 et à intervalles réguliers jusqu'à FINAL TIME

### 2.3 *Taux de curage*

- Paramètres impactants

- Temps entre deux curages BR
- FINAL TIME
- Paramètres impactés
  - Volume sediments BR
  - Hydrocarbures BR
  - Vegetation BR
- Formule : PULSE TRAIN ( 0 , 1 , Temps entre deux curages BR , FINAL TIME )
- Prend la valeur 1 pendant 1 pas de temps à partir de 0 et à intervalles réguliers jusqu'à FINAL TIME

#### **2.4 Taux de vidange de la cloison siphonée**

- Paramètres impactants
  - Temps entre deux vidanges du separateur HC
  - FINAL TIME
- Paramètres impactés
  - Separateur HC BR vers BI
- Formule : PULSE TRAIN ( 0 , 1 , Temps entre deux vidanges du separateur HC , FINAL TIME )
- Prend la valeur 1 pendant 1 pas de temps à partir de 0 et à intervalles réguliers jusqu'à FINAL TIME

#### **2.5 Taux de fauchage**

- Paramètres impactants
  - Temps entre deux fauchages
  - FINAL TIME
- Paramètres impactés
  - Vegetation BI
- Formule : PULSE TRAIN ( 0 , 1 , Temps entre deux fauchages , FINAL TIME )
- Prend la valeur 1 pendant 1 pas de temps à partir de 0 et à intervalles réguliers jusqu'à FINAL TIME

#### **2.6 Taux de renouvellement du massif filtrant**

- Paramètres impactants
  - Temps entre deux renouvellements du massif filtrant
  - FINAL TIME

- Paramètres impactés
  - Volume sediments BI
  - Hydrocarbures BI
  - Vegetation BI
- Formule : PULSE TRAIN ( 0 , 1 , Temps entre deux renouvellements du massif filtrant , FINAL TIME )
- Prend la valeur 1 pendant 1 pas de temps à partir de 0 et à intervalles réguliers jusqu'à FINAL TIME

## **2.7 Taux de colmatage**

- Paramètres impactants
  - Surface BI
  - Volume sediments BI
- Paramètres impactés
  - Permeabilite 0
- Formule : IF THEN ELSE ( (Volume sediments BI/Surface BI)/0.01<=1 , 1 , (Volume sediments BI/Surface BI)/0.01 )
- Rapport du flux d'infiltration sans dépôt de sédiment sur le flux d'infiltration obtenu avec l'épaisseur de sédiments au temps considéré, tous deux calculés à l'aide de la formule de Bouwer

## **2.8 Taux de décantation 0**

- Paramètres impactants
  - Taux de decantation des infrastructures
  - Vegetation BR
  - Scenario relation taux de decantation/vegetation
  - Volume utile BR
  - Scenario relation taux de decantation/Volume utile BR
- Paramètres impactés
  - Taux de décantation

IF THEN ELSE ( Taux de décantation infrastructures=0 , 0 , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de decantation/vegetation"=1 , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de decantation/volume utile BR"=2 , Taux de décantation infrastructures+0.3\*Vegetation BR-(1-Volume utile BR)\*Taux de décantation infrastructures , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de decantation/volume utile BR"=1 , Taux de décantation infrastructures+0.3\*Vegetation BR-(1-Volume utile BR)\*0.5\*Taux de décantation infrastructures , Taux de décantation infrastructures+0.3\*Vegetation BR ) ) , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de decantation/vegetation"=2 , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de decantation/volume utile BR"=2 , Taux de décantation infrastructures+0.2\*Vegetation BR-(1-Volume utile BR)\*Taux de décantation infrastructures , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de

decantation/volume utile BR" $=1$  , Taux de décantation infrastructures $+0.2*Vegetation$  BR $-(1-$   
 Volume utile BR) $*0.5*Taux$  de décantation infrastructures , Taux de décantation  
 infrastructures $+0.2*Vegetation$  BR ) ) , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de  
 decantation/vegetation" $=3$  , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de decantation/volume  
 utile BR" $=2$  , Taux de décantation infrastructures $+0.1*Vegetation$  BR $-(1-$ Volume utile  
 BR) $*Taux$  de décantation infrastructures , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de  
 decantation/volume utile BR" $=1$  , Taux de décantation infrastructures $+0.1*Vegetation$  BR $-(1-$   
 Volume utile BR) $*0.5*Taux$  de décantation infrastructures , Taux de décantation  
 infrastructures $+0.1*Vegetation$  BR ) ) , IF THEN ELSE ( "Scenario relation taux de  
 decantation/volume utile BR" $=2$  , Taux de décantation infrastructures $-(1-$ Volume utile BR) , IF  
 THEN ELSE ( "Scenario relation taux de decantation/volume utile BR" $=1$  , Taux de décantation  
 infrastructures $-(1-$ Volume utile BR) $*0.5*Taux$  de décantation infrastructures , Taux de  
 décantation infrastructures ) ) ) ) ) Ce taux représente l'efficacité des dispositifs de rétentions  
 présents dans le bassin de rétention. Il est exprimé en pourcentage des sédiments restant dans le  
 bassin de rétention après passage de l'eau par rapport au taux de contamination par les sédiments  
 à l'entrée du BR. Il est possible de faire influencer la densité de végétation sur le taux de rétention au  
 moyen de la variable "Scenario relation taux de decantation/vegetation". Il est possible de faire  
 influencer le remplissage du bassin de rétention sur le taux de rétention au moyen de la variable  
 "Scenario relation taux de decantation/Volume utile BR"

## 2.9 Permeabilite 0

- Paramètres impactants
  - Taux de colmatage
  - Vegetation BI
  - Scenario relation vegetation/permeabilite
- Paramètres impactés
  - Permeabilite
- Formule : IF THEN ELSE ( "Scenario relation vegetation/permeabilite" $=1$  ,  $1/Taux$  de colmatage $+0.3*Vegetation$  BI , IF THEN ELSE ( "Scenario relation vegetation/permeabilite" $=2$  ,  $1/Taux$  de colmatage $+0.2*Vegetation$  BI , IF THEN ELSE ( "Scenario relation vegetation/permeabilite" $=3$  ,  $1/Taux$  de colmatage $+0.1*Vegetation$  BI , IF THEN ELSE ( "Scenario relation vegetation/permeabilite" $=4$  ,  $1/Taux$  de colmatage , IF THEN ELSE ( "Scenario relation vegetation/permeabilite" $=5$  ,  $1/Taux$  de colmatage $-0.1*Vegetation$  BI , IF THEN ELSE ( "Scenario relation vegetation/permeabilite" $=6$  ,  $1/Taux$  de colmatage $-0.2*Vegetation$  BI ,  $1/Taux$  de colmatage $-0.3*Vegetation$  BI ) ) ) ) ) ) )
- La perméabilité est ici exprimée en pourcentage de la perméabilité de conception (100%) correspondant à 1cm de colmatage ou moins

## 3 Amont du bassin

### 3.1 Perte d'efficacite 1

- Paramètres impactants
  - Perte d'efficacite annuelle du degriilleur
- Paramètres impactés
  - Coefficient de degriillage
- Formule :  $-Perte$  d'efficacite annuelle du degriilleur/365

- Ce flux représente la perte d'efficacité journalière du dégrilleur en pourcentage de son efficacité maximale (100%)

### **3.2 Coefficient de degrillage**

- Paramètres impactants
  - Perte d'efficacite 1
  - Efficacite a neuf du degrileur
  - Taux de renouvellement du degrileur
- Paramètres impactés
  - Taux de contamination sediment BR
  - Taux de contamination sediments BI
- Valeur initiale : Efficacite a neuf du degrileur
- Formule : IF THEN ELSE ( Taux de renouvellement du degrileur=1 , -Coefficient de degrillage+Efficacite a neuf du degrileur , IF THEN ELSE (Coefficient de degrillage<=0 , 0 , Perte d'efficacite 1 ) )
- Pourcentage des sédiments que le dégrilleur filtre avant que l'eau n'atteigne le BR. Il est réinitialisé à la valeur "Efficacite a neuf du degrileur" par le Taux de renouvellement du degrileur

### **3.3 Perte d'efficacite 2**

- Paramètres impactants
  - Perte d'efficacite annuelle du deshuileur
- Paramètres impactés
  - Coefficient de deshuilage
- Formule : -Perte d'efficacite annuelle du deshuileur/365
- Ce flux représente la perte d'efficacité journalière du déshuileur en pourcentage de son efficacité maximale (100%)

### **3.4 Coefficient de deshuilage**

- Paramètres impactants
  - Perte d'efficacite 2
  - Efficacite a neuf du deshuileur
  - Taux de renouvellement du deshuileur
- Paramètres impactés
  - Taux de contamination HC BR
  - Taux de contamination HC BI

- Valeur initiale : Efficacite a neuf du deshuileur
- Formule : IF THEN ELSE ( Taux de renouvellement du deshuileur=1 , -Coefficient de deshuilage+Efficacite a neuf du deshuileur , IF THEN ELSE ( Coefficient de deshuilage<=0 , 0 , Perte d'efficacite 2 ) )
- Pourcentage des sédiments que le degriilleur filtre avant que l'eau n'atteigne le BR. Il est réinitialisé à la valeur "Efficacite à neuf du degriilleur" par le Taux de renouvellement du degriilleur

## 4 Bassin de rétention

### 4.1 Taux de décantation

- Paramètres impactants
  - Taux de décantation 0
- Paramètres impactés
  - Remplissage sediments 1
  - Taux de contamination sediments BI
- Formule : IF THEN ELSE ( Taux de decantation>=1 , 1 , IF THEN ELSE ( Taux de decantation<=0 , 0 , Taux de decantation ) )
- Ce taux final permet d'éviter d'appliquer une valeur négative ou supérieure à 100% du taux de décantation

### 4.2 Taux de contamination sediments BR

- Paramètres impactants
  - Coefficient de degriillage
  - Contamination sediments BV
  - Surverse BR vers BI
- Paramètres impactés
  - Remplissage sediments 1
  - Taux de contamination sediments BI
- Formule : (Contamination sediments BV)\*(1-Coefficient de degriillage)\*(1-Surverse BR vers BI)
- Ce taux représente le taux de contamination en sédiments de l'eau entrant dans le bassin de rétention et est exprimé en pourcentage du taux de contamination des eaux de ruissellement avant passage par le degriilleur

### 4.3 Remplissage sediments 1

- Paramètres impactants
  - Taux de contamination sediments BR
  - Taux de décantation des infrastructures
  - Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage
  - Volume d'eau annuel
- Paramètres impactés
  - Volume sediments BR

- Formule :  $(\text{Taux de décantation}) * \text{Teneur en sédiments des eaux de lessivage} * \text{Taux de contamination sédiments BR} * (\text{Volume d'eau annuel}/365)$
- Ce flux représente une quantité journalière d'apport en sédiments dans le bassin de rétention (en m<sup>3</sup>/j)

#### **4.4 Volume sédiments BR**

- Paramètres impactants
  - Taux de curage
  - Remplissage sédiments 1
- Paramètres impactés
  - Volume utile BR
- Valeur initiale : 0
- Formule : IF THEN ELSE ( Taux de curage=1 , -Volume sédiments BR , Remplissage sédiments 1 )
- Ce niveau représente la quantité de sédiments stockée dans le bassin de rétention (en m<sup>3</sup>). Il est réinitialisé par le curage du bassin.

#### **4.5 Taux de contamination HC BR**

- Paramètres impactants
- Contamination HC BV
- Coefficient de deshuilage
- Surverse BR vers BI
- Paramètres impactés
  - Remplissage HC 1
  - Taux de contamination HC BI
- Formule :  $(\text{Contamination HC BV}) * (1 - \text{Coefficient de deshuilage}) * (1 - \text{Surverse BR vers BI})$
- Ce taux représente le taux de contamination en hydrocarbures de l'eau entrant dans le bassin de rétention et est exprimé en pourcentage du taux de contamination des eaux de ruissellement avant passage par le déshuileur

#### **4.6 Remplissage HC 1**

- Paramètres impactants
  - Taux de contamination HC BR
  - Separateur HC BR vers BI
  - Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage
  - Volume d'eau annuel
- Paramètres impactés
  - Hydrocarbures BR
- Formule :  $(\text{Taux de contamination HC BR}) * (\text{Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage}) * (\text{Volume d'eau annuel}/365) * (\text{Separateur HC BR vers BI})$
- Ce flux représente une quantité journalière d'apport en hydrocarbures dans le bassin de rétention (en g/j)

#### **4.7 Hydrocarbures BR**

- Paramètres impactants
  - Taux de curage
  - Remplissage HC 1
- Paramètres impactés
- Formule : IF THEN ELSE (Taux de curage=1 , -Hydrocarbures BR , Remplissage HC 1)



- Ce niveau représente la quantité d'hydrocarbures stockée dans le bassin de rétention (en g). Elle est réinitialisée par le curage du bassin.

#### **4.8 Croissance vegetation BR**

- Paramètres impactants
  - Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BR
- Paramètres impactés
  - Vegetation BR
  - Formule : 1/ Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BR
- Ce flux représente la croissance journalière de la végétation (en pourcentage de sa taille maximale/j). A défaut d'un meilleur modèle, une croissance linéaire jusqu'à 100% de la taille maximale sera adoptée.

#### **4.9 Vegetation BR**

- Paramètres impactants
  - Croissance vegetation BR
  - Taux de curage
- Paramètres impactés
  - Volume utile BR
  - Taux de decantation 0
- Valeur initiale : 0
- Formule : IF THEN ELSE ( Taux de curage=1 , -Vegetation BR , IF THEN ELSE ( Vegetation BR >= 1 , -Vegetation BR + 1 , Croissance Vegetation BR ) )
- Ce niveau représente la quantité de végétation dans le bassin de rétention (en pourcentage de la taille maximale de végétation possible). Il est réinitialisé par le curage du bassin.

#### **4.10 Volume utile BR**

- Paramètres impactants
  - Volume sediments BR
  - Vegetation BR
  - Volume BR
  - Pourcentage du volume du BR occupe par une vegetation entierement developpee
- Paramètres impactés
  - Taux de decantation 0
- Formule : 1-(Volume sediments BR/Volume BR)-(Vegetation BR\*Pourcentage du volume du BR occupe par une vegetation entierement developpee)
- Cette variable exprime le pourcentage de volume inoccupé par rapport au volume total du bassin de rétention

### **5 Eléments de transition**

#### **5.1 Perte d'efficacite 3**

- Paramètres impactants
  - Perte d'efficacité annuelle du separateur
- Paramètres impactés

- Séparateur HC BR vers BI
- Formule : Perte d'efficacité annuelle du séparateur/365
- Ce flux représente la perte d'efficacité journalière du séparateur d'hydrocarbures entre le BR et le BI (en pourcentage de l'efficacité à neuf)

## 5.2 *Séparateur HC BR vers BI*

- Paramètres impactants
  - Perte d'efficacité 3
  - Taux de vidange de la cloison siphonée
  - Perte d'efficacité annuelle du séparateur
- Paramètres impactés
  - Remplissage HC 1
  - Taux de contamination HC BI
- Valeur initiale : IF THEN ELSE ( Perte d'efficacité annuelle du séparateur=100 , 0 , 1)
- Formule : IF THEN ELSE ( Perte d'efficacité annuelle du séparateur=100 , 0 , IF THEN ELSE ( Taux de vidange=1 , -Séparateur HC BR vers BI+1 , IF THEN ELSE ( Séparateur HC BR vers BI<=0 , -Séparateur HC BR vers BI , Perte d'efficacité 3 ) ) )
- Ce niveau représente l'efficacité du dispositif de séparation des hydrocarbures situé entre le BR et le BI. Il est exprimé en pourcentage des hydrocarbures restant dans le bassin de rétention après passage de l'eau par rapport au taux de contamination par les HC à l'entrée du BR. Il est réinitialisé par la vidange de la cloison siphonée, et si "Perte d'efficacité annuelle du séparateur" = 100, le modèle agira comme s'il n'y avait pas de séparateur.

## 6 Bassin d'infiltration

### 6.1 *Taux de contamination sédiments BI*

- Paramètres impactants
  - Coefficient de dégrillage
  - Contamination sédiments BV
  - Taux de décantation
  - Taux de contamination sédiments BR
  - Surverse BR vers BI
- Paramètres impactés
  - Remplissage sédiments 2

- Formule : Taux de contamination sédiments  $BR*(1-\text{Taux de décantation})+\text{Surverse BR vers BI}*\text{Contamination Sédiments BV}*(1-\text{Coefficient de dégrillage})$
- Ce taux représente le taux de contamination en sédiments de l'eau entrant dans le bassin d'infiltration et est exprimé en pourcentage du taux de contamination des eaux de ruissellement avant passage par le dégrilleur

## **6.2 Remplissage sédiments 2**

- Paramètres impactants
  - Taux de contamination sédiments BI
  - Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage
  - Volume d'eau annuel
  - Débordement
- Paramètres impactés
  - Volume sédiments BI
- Formule : Taux de contamination sédiment  $BI*\text{Teneur en sédiments des eaux de lessivage}*\text{Volume d'eau annuel}/365*(1-\text{Débordement})$
- Ce flux représente une quantité journalière d'apport en sédiments dans le bassin d'infiltration (en m<sup>3</sup>/j)

## **6.3 Volume sédiments BI**

- Paramètres impactants
  - Taux de renouvellement du massif filtrant
  - Remplissage sédiments 2
- Paramètres impactés
  - Volume utile BI
  - Taux de colmatage
- Valeur initiale : 0
- Formule : IF THEN ELSE (Taux de renouvellement du massif filtrant=1 , -Volume sédiments BI , Remplissage sédiments 2 )
- Ce niveau représente la quantité de sédiments stockée dans le bassin d'infiltration (en m<sup>3</sup>). Il est réinitialisé par le changement du massif filtrant

## **6.4 Taux de contamination HC BI**

- Paramètres impactants
  - Contamination HC BV
  - Coefficient de deshuilage

- Séparateur HC BR vers BI
- Taux de contamination HC BR
- Surverse BR vers BI
- Paramètres impactés
  - Remplissage HC 2
- Formule : Taux de contamination HC BR\*(1-Séparateur HC BR vers BI)+Surverse BR vers BI\*(Contamination HC BV\*(1-Coefficient de deshuilage ))
- Ce taux représente le taux de contamination en hydrocarbures de l'eau entrant dans le bassin d'infiltration et est exprimé en pourcentage du taux de contamination des eaux de ruissellement avant passage par le déshuileur

### **6.5 Remplissage HC 2**

- Paramètres impactants
  - Taux de contamination HC BI
  - Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage
  - Volume d'eau annuel
  - Débordement
- Paramètres impactés
  - Hydrocarbures BI
- Formule : Taux de contamination HC BI\*Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage\*Volume d'eau annuel/365\*(1-Débordement)
- Ce flux représente une quantité journalière d'apport en hydrocarbures dans le bassin d'infiltration (en g/j)

### **6.6 Hydrocarbures BI**

- Paramètres impactants
  - Taux de renouvellement du massif filtrant
  - Remplissage HC 2
- Valeur initiale : 0
- Formule : IF THEN ELSE ( Taux de renouvellement du massif filtrant=1 , -Hydrocarbures BI , Remplissage HC 2 )
- Ce niveau représente la quantité d'hydrocarbures stockée dans le bassin d'infiltration (en g). Elle est réinitialisée par le renouvellement du massif filtrant.

### **6.7 Croissance végétation BI**

- Paramètres impactants

- Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BI
- Paramètres impactés
  - Vegetation BI
- Formule : 1/ Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BI
- Ce flux représente la croissance journalière de la végétation (en pourcentage de sa taille maximale/j). A défaut d'un meilleur modèle, une croissance linéaire jusqu'à 100% de la taille maximale sera adoptée.

## 6.8 *Vegetation BI*

- Paramètres impactants
  - Croissance vegetation BI
  - Taux de fauchage
  - Taux de renouvellement du massif filtrant
- Paramètres impactés
  - Volume utile BI
  - Permeabilite 0
- Formule : IF THEN ELSE ( Taux de renouvellement du massif filtrant=1 , -Vegetation BI , IF THEN ELSE ( Taux de fauchage=1 , -0.95\*Vegetation BI , IF THEN ELSE ( Vegetation BI>=1 , -Vegetation BI+1 , Croissance Vegetation BI ) ) )
- Ce niveau représente la quantité de végétation dans le bassin de rétention (en pourcentage de la taille maximale de végétation possible). Il est ramené à 5% de sa valeur lors de la fauche et est réinitialisé par le curage du bassin.

## 6.9 *Volume utile BI*

- Paramètres impactants
  - Volume sediments BI
  - Vegetation BI
  - Volume BI
  - Pourcentage du volume du BI occupe par une vegetation entierement developpee
- Formule : 1-Vegetation BI\*Pourcentage du BI occupe par une vegetation entierement developpee-Volume sediments BI/Volume BI
- Cette variable exprime le pourcentage de volume inoccupé par rapport au volume total du bassin d'infiltration

## 7 Exutoire

### 7.1 *Remplissage sediments 3*

- Paramètres impactants

- Taux de contamination sediments BI
- Teneur en sediments des eaux de lessivage
- Volume d'eau annuel
- Debordement
- Paramètres impactés
  - Sediments debordes
- Formule :  $\text{Taux de contamination sediment BI} * \text{Teneur en sediments des eaux de lessivage} * \text{Volume d'eau annuel} / 365 * \text{Debordement}$
- Ce flux représente une quantité journalière de débordement de sédiments (en m<sup>3</sup>/j)

## **7.2 *Sedmiments debordes***

- Paramètres impactants
  - Remplissage sediments 3
- Valeur initiale : 0
- Formule : Remplissage sediments 3
- Ce niveau représente la quantité de sédiments rejetés dans le milieu (en m<sup>3</sup>)

## **7.3 *Remplissage HC 3***

- Paramètres impactants
  - Taux de contamination HC BI
  - Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage
  - Volume d'eau annuel
  - Debordement
- Paramètres impactés
  - HC debordes
- Formule :  $\text{Formule : Taux de contamination HC BI} * \text{Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage} * \text{Volume d'eau annuel} / 365 * \text{Debordement}$
- Ce flux représente une quantité journalière de débordement d'HC (en g/j)

## **7.4 *HC debordes***

- Paramètres impactants
  - Remplissage HC 3
- Valeur initiale : 0
- Formule : Remplissage HC 3

- Ce niveau représente la quantité d'hydrocarbures rejetés dans le milieu (en g)

## **7.5** *Permeabilite*

- Paramètres impactants
  - Permeabilite 0
- Formule : IF THEN ELSE ( Permeabilite 0<=0 , 0 , Permeabilite 0 )
- Ce taux final permet d'éviter à la perméabilité de prendre des valeurs négatives

**Annexe 2** : Interface utilisateur du modèle prédictif – Paramétrée pour le bassin Django-Reinhardt



	Time	0	5475	La cellule à gauche de celle-ci doit contenir la valeur de FINAL TIME et la cellule C1 doit contenir la valeur 0.
<u>Paramètres généraux de comportement de l'ouvrage.</u>				
	Volume d'eau annuel (m <sup>3</sup> )	540000	540000	Volume d'eau entrant dans le BR par an
	Teneur en sédiments des eaux de lessivage (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,0008	0,0008	Teneur moyenne volumique en sédiments dans les eaux directement après lessivage sans dégrillage
	Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage (g/m <sup>3</sup> )	1,9	1,9	Teneur moyenne massique en hydrocarbures dans les eaux directement après lessivage sans déshuilage
	Perte d'efficacité annuelle du dégrilleur (%)	0	0	Perte d'efficacité exprimée annuelle en pourcentage d'une efficacité optimale (100% = le dégrilleur ne laisse passer aucun sédiment) 0 0 si pas de dégrilleur
	Efficacité à neuf du dégrilleur (%)	0	0	Efficacité exprimée en pourcentage d'une efficacité optimale (100% = le dégrilleur ne laisse passer aucun sédiment) 0 0 si pas de dégrilleur
	Perte d'efficacité annuelle du déshuilleur (%)	0	0	Perte d'efficacité exprimée annuelle en pourcentage d'une efficacité optimale (100% = le déshuilleur ne laisse passer aucun hydrocarbure) 0 0 si pas de déshuilleur
	Efficacité à neuf du déshuilleur (%)	0	0	Efficacité exprimée en pourcentage d'une efficacité optimale (100% = le déshuilleur ne laisse passer aucun hydrocarbure) 0 0 si pas de déshuilleur
	Volume du Bassin de Rétention (BR) (m <sup>3</sup> )	32000	32000	1 si pas de BR



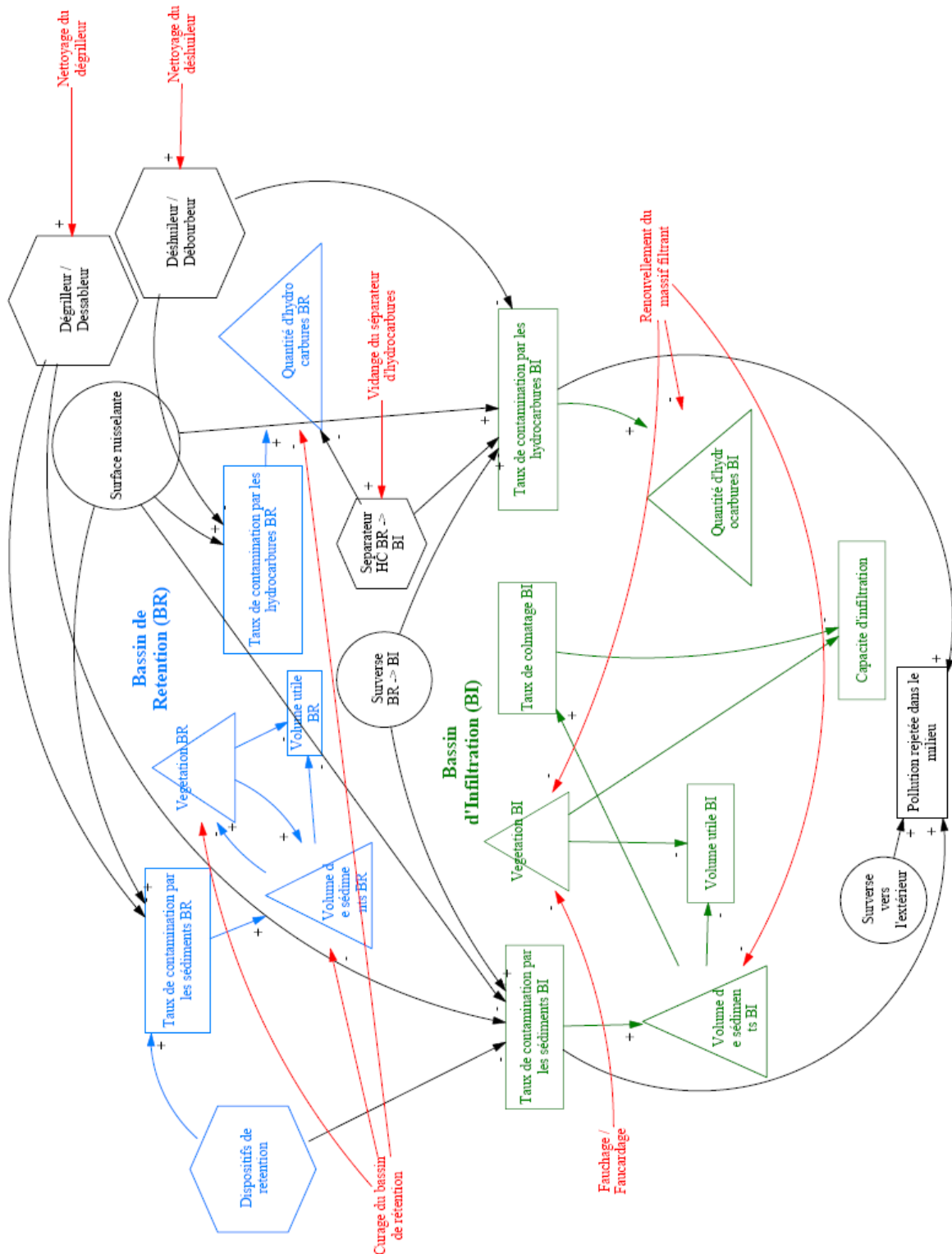
Paramètres d'entretien			
	Temps de renouvellement du dégrilleur (jours)	10000	Renouvellement ou nettoyage pour atteindre une valeur proche de l'efficacité à neuf 10000 <i>10000 si pas de dégrilleur</i>
	Temps de renouvellement du déshuileur (jours)	10000	Renouvellement ou nettoyage pour atteindre une valeur proche de l'efficacité à neuf 10000 <i>10000 si pas de déshuileur</i>
	Temps entre deux curages du bassin de rétention (jours)	4380	Le curage réinitialise le volume de sédiments, d'hydrocarbures et de végétation du BR 4380 <i>10000 si pas de BR</i>
	Temps entre deux vidanges du séparateur d'hydrocarbures (jours)	365	Vidange ou nettoyage pour atteindre une valeur proche de 100% d'efficacité pour le séparateur 365 <i>10000 si pas de séparateur</i>
	Temps entre deux fauchages du bassin d'infiltration (jours)	5475	/
	Temps entre deux renouvellements du massif filtrant du bassin d'infiltration (jours)	5475	Renouvellement du massif filtrant ou curage suffisant pour revenir à la perméabilité de conception 5475

Paramètres de choix de scénario			
	Taux de contamination par les sédiments des eaux de ruissellement du BV (%)	1	<p>A la conception ce taux prend la valeur de 1. Il peut être changé en cas de modification de l'environnement de l'ouvrage d'infiltration entraînant une augmentation ou une diminution de la concentration de sédiments dans les eaux de ruissellement (Ex : En cas d'événement augmentant durablement de 10% la concentration de sédiments au temps t, créer une colonne entre C et D et entrer la valeur 1,1 dans la case correspondante)</p>
	Taux de contamination par les hydrocarbures des eaux de ruissellement du BV (%)	1	<p>A la conception ce taux prend la valeur de 1. Il peut être changé en cas de modification de l'environnement de l'ouvrage d'infiltration entraînant une augmentation ou une diminution de la concentration d'hydrocarbures dans les eaux de ruissellement (Ex : En cas d'événement diminuant durablement de 10% la concentration d'hydrocarbures au temps t, créer une colonne entre C et D et entrer la valeur 0,9 dans la case correspondante)</p>
	Scénario pour la relation entre la végétation et le taux de décontamination dans le BR	1	<p>1 : Très forte influence de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +30% de taux de décontamination à 100% de végétation  2 : Forte influence de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +20% de décontamination à 100% de végétation  3 : Faible influence de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +10 % de décontamination à 100% de végétation  4 : influence nulle de la végétation  0 : Aucune influence du volume utile restant sur le taux de décontamination</p>
	Scénario pour la relation entre le volume utile restant du BR et le taux de décontamination dans le BR	1	<p>1 : Décroissance linéaire jusqu'à -50% de taux de décontamination pour un bassin plein  2 : Décroissance linéaire jusqu'à -100% de taux de décontamination pour un bassin plein</p>

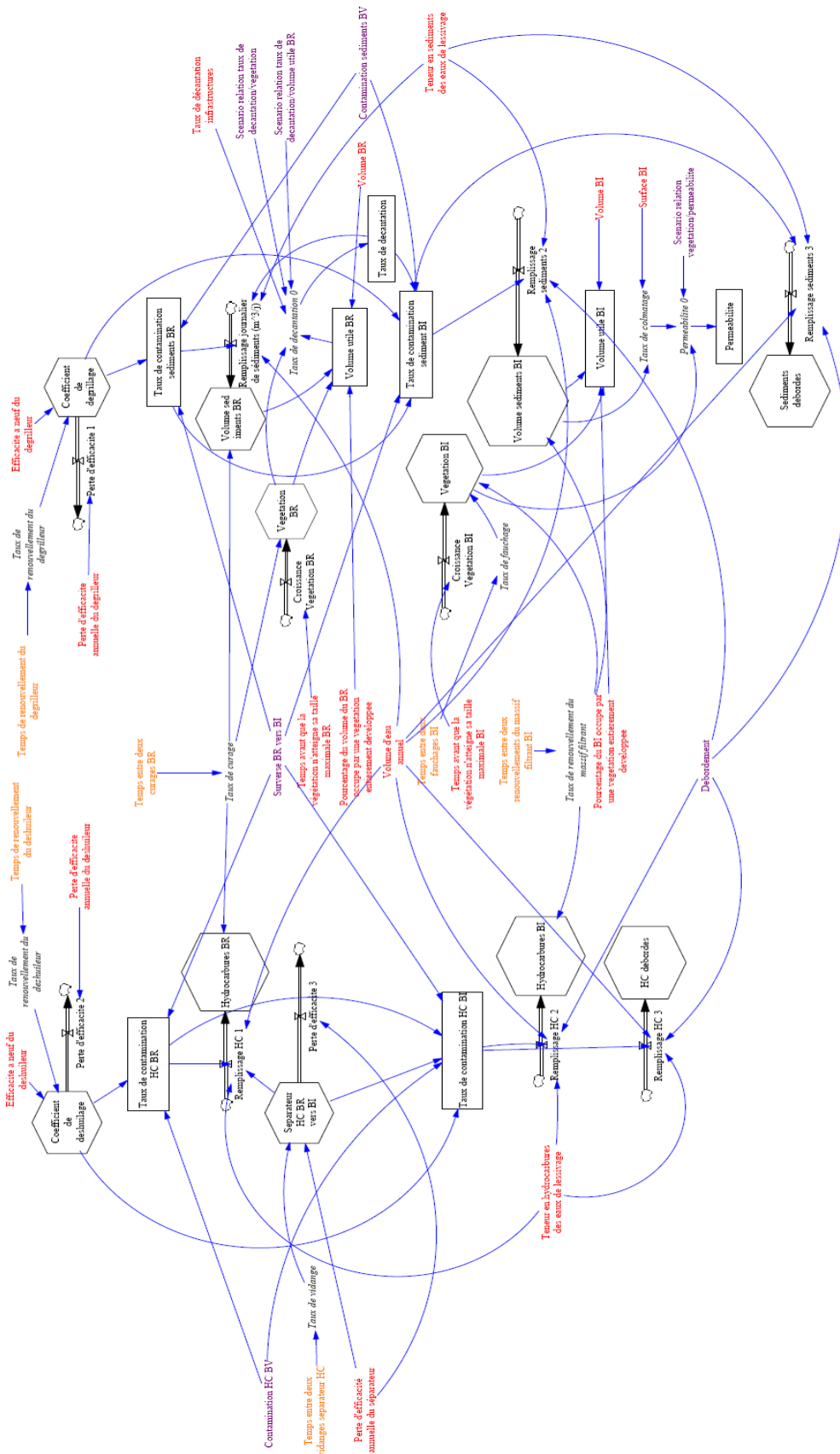
		<p>1 : Très forte influence positive de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +30% de perméabilité pour 100% de végétation</p> <p>2 : Forte influence positive de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +20% de perméabilité pour 100% de végétation</p> <p>3 : Faible influence positive de la végétation = croissance linéaire jusqu'à +10% de perméabilité pour 100% de végétation</p> <p>4 : Aucune influence de la végétation</p> <p>5 : Faible influence négative de la végétation = décroissance linéaire jusqu'à -10% de perméabilité pour 100% de végétation</p> <p>6 : Forte influence négative de la végétation = décroissance linéaire jusqu'à -20% de perméabilité pour 100% de végétation</p> <p>7 : Très forte influence négative de la végétation = décroissance linéaire jusqu'à -30% de perméabilité pour 100% de végétation</p>
Scénario pour la relation entre la végétation et la perméabilité dans le BI	3	3
Surverse BR vers BI	0	<p>Pourcentage moyen d'eau surversée du BR vers le BI par an</p> <p>0 0 si pas de surverse ou pas de BR</p>
Débordement du BI	0	<p>Pourcentage moyen d'eau débordant du BI annuellement</p> <p>0 0 si pas de débordement</p>

Toutes les cellules jaunes sont à remplir par le gestionnaire. Tous les pourcentages doivent être exprimés sous forme décimale (60% = 0,6). Il est possible d'ajouter des colonnes pour faire changer la valeur des paramètres d'entrée aux dates souhaitées. Il faudra dans ce cas indiquer la valeur des dates en jours dans les cases insérées entre 0 et FINAL TIME et changer la valeur à l'intersection avec la ligne correspondant au paramètre que l'on souhaite modifier (Ex : modèle saisonnier de pousse de la végétation). Le pas de temps de la simulation est le jour, ainsi pour appliquer une modification d'un paramètre après un an, il faudra entrer le repère temporel 365.

### Annexe 3 : Modèle cognitif



# Annexe 4 : Modèle prédictif





**Annexe 5 : Hypothèses et méthode pour le calcul de la perméabilité des ouvrages d'infiltration (Dicanot, 2016)**

Formule de calcul du flux d'infiltration

**3.3.2.1.5 Calcul du flux d'infiltration**

**Bouwer (1969)** considère le caractère non saturé du sous-sol et établit une formule calculant le flux infiltré en ne prenant en compte que la conductivité de la couche colmatée à partir de la formule de Darcy :

$$Q_{\text{inf\_Bouwer}} = S_{BI} * K_{cc} * \frac{h - h_{cr}}{\text{Epaisseur}_{cc}}$$

Avec :

- $S_{BI}$  la surface du bassin d'infiltration,
- $K_{cc}$  la conductivité hydraulique à saturation de la couche colmatée,
- $h$  la hauteur d'eau dans le bassin d'infiltration,
- $h_{cr}$  la charge de pression dans la zone non saturée dont il existe des valeurs guides selon le type de sol (**Bouwer, 2002**). Pour le bassin Django-Reinhardt, **Lassabatère et al., (2010)** ont déterminé la charge de pression pour la couche de sédiment était égale à -16,2 cm (+/- 2,92 cm).
- $\text{Epaisseur}_{cc}$ , l'épaisseur de la couche colmatée.

Cette hypothèse est pertinente dans la mesure où, à saturation, seule la couche superficielle de plus faible  $K_s$  est déterminante pour la vidange du bassin.

Hypothèse de calcul du flux d'infiltration pour l'état initial du bassin (absence de couche colmatée)

Un scénario de référence, correspondant donc à l'état initial du bassin (absence de couche colmatée), a tout d'abord été considéré. Le flux d'infiltration est calculé à l'aide de la formule de Bouwer, définie comme :

$$Q_{\text{inf\_Bouwer}} = S_{BI} * K_{cc} * \frac{h - h_{cr}}{\text{Epaisseur}_{cc}}$$

L'utilisation de la formule de Bouwer ne permet pas de considérer un sol disposant pas d'une couche colmatée ( $\text{Epaisseur}_{cc}$  nulle). Le scénario de référence considéré correspond par conséquent à la présence d'une couche colmatée de faible épaisseur ( $\text{Epaisseur}_{cc} = 1$  cm).



## Annexe 6 : Tableau de résumé des études menées sur le bassin Django Reinhardt

Auteur	Titre	Date	
Carolina GONZALEZ-MERCHAN	Amélioration des connaissances sur le colmatage des systèmes d'infiltration des eaux pluviales	2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Environ 190 mg/L de matières en suspension dans les eaux de lessivage des zones résidentielles et commerciales (p.47)</li> <li>- Environ 1.9 mg/L d'hydrocarbures (HCT) dans les eaux de lessivage des zones résidentielles et commerciales (p.47)</li> <li>- La croissance de la végétation accroît la résistance hydraulique du fond des bassins (p.143)</li> <li>- Epaisseur moyenne de couche colmatée dans le bassin d'infiltration : 31.5mm (2008) - 59.3mm (2010) (p.196)</li> <li>- Tableau des masses volumiques moyennes des sédiments : Masse volumique apparente des zones fréquemment sollicitées : 630 à 765 kg/m<sup>3</sup> (p.203)</li> <li>- La végétation contribue à améliorer légèrement la perméabilité du bassin d'infiltration (p.234)</li> </ul>
David GOUTALAND	Caractérisation hydrogéophysique d'un dépôt fluvioglacière. Evaluation de l'effet de l'hétérogénéité hydrodynamique sur les écoulements en zone non-saturée.	2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présence d'hétérogénéités dans le faciès du sol pouvant entraîner des disparités dans la capacité d'infiltration</li> </ul>
Laurent LASSABATERE	Effects of the settlement of sediments on water infiltration in two urban infiltration basins	2010	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour un panel de 26 événements pluvieux sans colmatage dans le BI le temps d'évacuation moyen de l'eau est de 70,8 heures</li> <li>- Pour un panel de 165 événements pluvieux avec colmatage de 5 cm d'épaisseur dans le BI, le temps d'évacuation moyen de l'eau est de 419,5 heures</li> </ul>
Priscilla MOURA	Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieux urbains	2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualité des séparateurs à hydrocarbures globalement médiocres dans l'élimination des RUTP</li> <li>- Fréquence de nettoyage recommandée pour les séparateurs à hydrocarbures : annuelle</li> <li>- Proportions de HAP dans les eaux en entrée du bassin de rétention : 32 % de HAP lourds contre 68 % de HAP légers</li> </ul>
Christel SEBASTIAN	Bassin de retenue des eaux pluviales en milieu urbain : performance en matière de piégeage des micropolluants	2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Renseignements complémentaires sur la concentration d'autres polluants dans les eaux entrant dans le bassin d'infiltration</li> </ul>
Muriel SAULAIS	Colonisation végétale des bassins d'infiltration et de rétention : caractérisation de la flore et évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'horizon de surface végétalisé	2011	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Différentes influences de la végétation d'un bassin sur la captation des hydrocarbures suivant la saison et suivant les espèces de plantes en présence</li> <li>- La vitesse de croissance peut dépendre selon le type de végétal : de l'ensoleillement, de l'apport en azote, de l'humidité (bassin en eau ou à sec), de la température, du substrat, de l'environnement</li> </ul>

## **Annexe 7 : Mode d'emploi du modèle prédictif**

La première ligne du tableau comporte les repères temporels. Par défaut, le tableau est réglé pour le cas où le gestionnaire souhaite conserver le même paramétrage pour l'intégralité de la simulation. Toutefois, il lui est possible de saisir des temps intermédiaires entre le début et la fin de la simulation pour faire varier certains paramètres d'entrée aux dates souhaitées, et ainsi profiter de toute la flexibilité du modèle.

Pour le reste, le tableau se compose de trois sections, une pour chaque catégorie de paramètres d'entrée (comportement de l'ouvrage, entretien et choix de scénario). Chaque ligne correspond alors à un paramètre. La seconde colonne indique le nom de ce dernier, les colonnes suivantes sa valeur à chaque pas de temps fixé par le gestionnaire, et la dernière colonne contient une description détaillée du paramètre concerné afin de guider le gestionnaire dans son choix du paramétrage. Les cases de la dernière colonne de l'interface peuvent contenir une indication écrite en rouge qui indiquent au gestionnaire la valeur à renseigner si l'ouvrage qu'il cherche à modéliser ne contient pas le composant associé au paramètre concerné.

Le gestionnaire devra disposer des paramètres suivants :

- **Paramètres généraux de comportement de l'ouvrages**
  - *Volume d'eau annuel*
  - *Teneur en sédiments des eaux de lessivage*
  - *Teneur en hydrocarbures des eaux de lessivage*
  - *Perte d'efficacité annuelle du dégrilleur*
  - *Efficacité à neuf du dégrilleur*
  - *Perte d'efficacité annuelle du déshuileur*
  - *Efficacité à neuf du déshuileur*
  - *Volume du Bassin de Rétention (BR)*
  - *Taux de décantation des infrastructures du BR*
  - *Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BR*
  - *Pourcentage du volume du BR occupé par une végétation entièrement développée*
  - *Perte d'efficacité annuelle du séparateur d'hydrocarbures*
  - *Volume du Bassin d'Infiltration (BI)*
  - *Surface du BI*
  - *Temps avant que la végétation n'atteigne sa taille maximale BI*
  - *Pourcentage du volume du BI occupé par une végétation entièrement développée*
  
- **Paramètres d'entretien**
  - *Temps de renouvellement du dégrilleur*
  - *Temps de renouvellement du déshuileur*
  - *Temps entre deux curages du bassin de rétention*
  - *Temps entre deux vidanges du séparateur d'hydrocarbures*
  - *Temps entre deux fauchages du bassin d'infiltration*
  - *Temps entre deux renouvellements du massif filtrant du bassin d'infiltration*

▪ **Paramètres de choix de scénario**

- *Taux de contamination par les sédiments des eaux de ruissellement du Bassin Versant (BV)*
- *Taux de contamination par les hydrocarbures des eaux de ruissellement du BV*
- *Scénario pour la relation entre la végétation et le taux de décantation dans le BR*
- *Scénario pour la relation entre le volume utile restant dans le BR et le taux de décantation dans le BR*
- *Scénario pour la relation entre la végétation et la perméabilité dans le BI*
- *Scénario de surverse du BR vers le BI*
- *Scénario de débordement du BI*

Tous ces taux ont été écrits sous forme décimale (0.1 pour 10 %, par exemple), et tous les pourcentages devront donc être exprimés sous cette forme décimale.

Une fois tous ces paramètres renseignés, il pourra lancer la simulation à l'aide de la partie fonctionnelle du modèle prédictif.

Il est tout d'abord nécessaire d'entrer dans le modèle Vensim le temps final afin d'accéder à la durée de modélisation souhaitée. Le réglage de la variable FINAL TIME se fait dans l'onglet « Model » puis « Settings ». La simulation se lance à l'aide du bouton « Simulate » de l'interface.

Une fois la simulation achevée, les résultats peuvent être obtenus en sélectionnant le composant dont on souhaite visualiser l'évolution avec l'outil « Move/size ». On peut alors visualiser le graphique de l'évolution de notre composant à l'aide du bouton « Graph », ou obtenir les chroniques de ses valeurs à l'aide des boutons « Table » et « Table Time ». Le bouton « Causes Strip » permet d'afficher l'évolution du composant sélectionnés ainsi que de tous les composants ayant un impact sur lui.