



PRECODD - Programme ECOtechnologies et Développement Durable

Programme ECOPLUIES

Techniques alternatives de traitement des eaux pluviales et de leurs sous-produits : vers la maîtrise du fonctionnement des ouvrages d'infiltration urbains

Délivrable D-D2

Rapport sur les indicateurs et sur les méthodes de constructions d'indicateurs de performance des ouvrages d'infiltration (Etape 2)

P. MOURA – S. BARRAUD – F. CHERQUI

LGCIE – INSA LYON

Sommaire

Introduction générale.....	5
Chapitre 1 Proposition d'indicateurs et de méthodes d'aide au choix multicritère pour une problématique de conception des ouvrages.....	15
1.1 Introduction	16
1.2 Présentation des performances et des indicateurs associés	16
1.2.1 Protéger contre les inondations	16
1.2.2 Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas dégrader la qualité de la nappe / Ne pas polluer le sol en profondeur).....	25
1.2.3 Contribuer à la recharge des nappes.....	35
1.2.4 Préserver les ressources naturelles	37
1.2.5 Etre maintenable facilement.....	48
1.2.6 Garantir la sécurité des usagers/personnels.....	53
1.2.7 Produire des déchets facilement gérables.....	58
1.2.8 Avoir un coût peu élevé	60
1.2.9 Qualité de l'aménagement.....	67
1.3 Récapitulatif des indicateurs de performances en phase de conception.....	72
1.4 Considérations sur la qualité du jeu d'indicateurs.....	73
1.5 Choix et application d'une méthode de sélection.....	75
1.5.1 Méthode multicritère choisie.....	75
1.5.2 Etude de cas - ZAC du Petit Bourg	75
1.6 Conclusions	98
Chapitre 2 Proposition des indicateurs et méthodes multicritères pour une problématique de suivi des ouvrages	101
2.1 Introduction	103
2.2 Présentation des performances	103
2.2.1 Protéger contre les inondations	103
2.2.2 Ne pas dégrader la qualité de la nappe.....	115
2.2.3 Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas polluer le sol en profondeur).....	121

2.2.4	Etre maintenable facilement.....	128
2.2.5	Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels.....	139
2.2.6	Produire des déchets facilement gérables.....	148
2.2.7	Avoir un coût peu élevé.....	151
2.2.8	Acceptabilité sociale d'un scénario.....	154
2.3	Récapitulatif des indicateurs de performances en phase de suivi.....	156
2.4	Considérations sur la qualité du jeu d'indicateurs.....	157
2.5	Choix et application d'une méthode de sélection.....	157
2.5.1	Méthode multicritère choisie.....	157
2.5.2	Etude de cas - Bassin de rétention infiltration Django Reinhardt.....	158
2.5.3	Etude de cas - Bassin de rétention infiltration de ZAC de Pivolles.....	169
2.6	Conclusions.....	173
Chapitre 3	Conclusions.....	175
3.1	Bilan et principales conclusions du travail.....	177
3.2	Perspectives.....	180
ANNEXE A	– La présentation des sites utilisés.....	199
ANNEXE B	– Fiches d'entretien des systèmes pour la phase de suivi des ouvrages.....	227
ANNEXE C	– Description des Alternatives de la ZAC du Petit Bourg.....	246
ZAC du Petit Bourg	247
ANNEXE D	– Calculs des indicateurs.....	251
ZAC du Petit Bourg	252
Bassin de Django Reinhardt	274
Bassin de ZAC de Pivolles	278
ANNEXE E	– de la méthode des entropies.....	282
ANNEXE F	–Méthode ELECTRE III & ELECTRE TRI.....	284
	La méthode ELECTRE III.....	284
3.2.1	La méthode ELECTRE TRI.....	287
3.2.2	Méthodes de pondération des critères et indicateurs.....	290

Introduction générale

Introduction

Contexte de l'action

Jusqu'à un passé récent, l'assainissement pluvial consistait à placer des conduites gravitaires sous les voiries, une fois que l'aménagement ait été complètement conçu. L'assainissement figurait donc comme un simple équipement d'accompagnement de l'urbanisation.

Cependant, ces dernières décennies jusqu'à nos jours, ces systèmes traditionnels n'ont cessé de dysfonctionner. Les inondations ont été de plus en plus fréquentes, la pollution des milieux récepteurs liés aux rejets de temps de pluie s'est avérée importante (entraînant des mortalités piscicoles par temps de pluie par exemple, ...) (Chocat, 1997 ; Ellis *et al.*, 2000). De plus le recours à des ouvrages de plus grande taille n'a pas amélioré la situation, bien au contraire.

C'est dans ce contexte que l'idée d'utiliser des techniques alternatives au réseau, a émergé. S'opposant à la concentration rapide de flux importants que ce soit en terme de quantités (volumes, débits d'eau) qu'en terme de pollution, le principe « alternatif » consiste à re-donner aux surfaces sur lesquelles se produit le ruissellement un rôle régulateur fondé sur la rétention et sur l'infiltration des eaux de pluie. Ces techniques visent en quelque sorte à compenser les effets de l'urbanisation sur le cycle de l'eau, en retardant et en infiltrant les eaux de ruissellement. Le recours à ces stratégies de gestion est censé considérer les impacts de l'urbanisation de façon plus globale, ne pas handicaper le développement urbain, engendrer des coûts moins excessifs que le réseau tout en cherchant à promouvoir de nouvelles potentialités d'aménagement (Baptista & Nascimento, 1996).

De ce fait, ces stratégies de gestion des eaux de ruissellement pluviale et notamment celles basées sur l'infiltration sont aujourd'hui largement plébiscitées que ce soit en France ou à l'étranger (Rivard *et al.*, 2005) où elles se présentent sous des vocables différents. Il s'agit de *Techniques alternatives* ou *compensatoires* en France (Azzout *et al.*, 1994) (CERTU, 2003) et au Brésil (Baptista *et al.*, 2005), de *Low Impact development* (LID) (P. G. C., 1999) ou de *Best Management Practices* (BMPs) aux Etats-Unis et au Canada (traduit au Québec par *Pratiques de Gestion Optimales* (PGOs)), de *Sustainable Urban Drainage* (SUD) au Royaume Unis (Wild *et al.*, 2003), ou encore *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) en Australie (Wong, 2006). Bien que les appellations soient différentes et mettent en avant différentes facettes de ces solutions (plutôt technique en France, plutôt environnementale aux

Etats-Unis ou encore intégrée comme en Australie ou en Angleterre), toutes recouvrent la même stratégie et se concrétisent par le même type de techniques.

Les qualités de ces techniques sont en effet nombreuses :

- Elles permettent de réduire les débits de pointe et les volumes d'eau aux exutoires ;
- Elles limitent les phénomènes de lessivage des surfaces urbaines par les eaux de ruissellement et permettent donc de diminuer leurs charges polluantes ;
- Elles favorisent la recharge quantitative des nappes par infiltration.

Par ailleurs, compte tenu de la nature fortement décantable de cette pollution, ces techniques présentent potentiellement un intérêt important en terme de traitement. En outre, elles permettent, souvent à moindre coût, d'urbaniser des zones qui sont éloignées des exutoires de surface (réseau existant, rivière, etc.) et constituent donc dans bien des cas, une solution incontournable pour le développement économique d'une ville.

Enfin, les techniques présentent des formes diverses permettant leur utilisation à différentes échelles spatiales (de la parcelle au drainage de zone entière d'aménagement par exemple) : comme les tranchées, les fossés, les noues, les chaussées à structure réservoir, les puits, les toits stockants, les bassins, etc. Elles peuvent alors s'intégrer et participer aux aménagements et offrir de multiples usages comme par exemple les parkings à structure réservoir ou encore les bassins d'infiltration servant conjointement de parc ou de terrain de sport. Ces différentes formes peuvent également être combinées à l'infini en fonction du contexte d'aménagement, des besoins d'équipements d'une zone, des contraintes de site et du principe utilisé (rétention ou infiltration). La Figure 0.1 donne quelques illustrations d'aménagement basé sur ces principes de gestion des eaux pluviales.



Figure 0.1. Exemples de structures d'infiltration

Cependant ces techniques de rétention/infiltration soulèvent de nombreuses questions. La principale concerne les performances réelles de ces techniques vis à vis des services qu'elles sont censées rendre sur leur durée de vie et ce dans un contexte urbain où les phénomènes naturels et anthropiques sont intimement liés. Les questions les plus importantes sont les suivantes :

- Permettent-elles une bonne protection contre les inondations compte tenu du fait que les systèmes techniques évoluent au cours du temps (colmatage progressif par exemple) et qu'ils peuvent être soumis à d'autres usages que le drainage des eaux pluviales ?
- Sont-elles si efficaces du point de vue de la préservation de l'environnement naturel et de la santé publique (protection des sols et des nappes contre les diverses formes de pollution) ? L'amélioration de la qualité des eaux de surface ne cache t-elle pas une potentielle détérioration des eaux souterraines ?
- De plus, même si, comme le montrent de nombreux auteurs (Mikkelsen *et al.*, 1994 ; Pitt *et al.*, 1999 ; Dechesne, 2002 ;...), l'efficacité des phénomènes de décantation et de piégeage de la pollution dans les couches superficielles du sol des ouvrages semble être particulièrement importante, il subsiste un certain nombre de difficultés relatives à l'accumulation des sédiments pollués. Leur stockage provisoire est-il un facteur de risque sanitaire pour leur gestion technique ou pour les autres usages ? Que faire des produits extraits lors des campagnes de curage sachant que ces déchets ne peuvent plus être mis en décharge depuis 2002 ?
- Enfin les problèmes socio-économiques liés à ces changements technologiques (techniques de réseau / techniques d'infiltration) demeurent également source de questionnement. Leur pluri-fonctionnalité ne représente t-elle pas un handicap à une bonne maîtrise de ces systèmes ? Ces techniques sont-elles aussi peu onéreuses qu'on le suggère souvent, notamment en terme de maintenance ? ...

En outre, ces questions de fond concernant l'adoption, la conception puis la gestion de techniques de rétention/ infiltration sont d'autant plus cruciales :

- que la réglementation incite fortement à recourir aux techniques alternatives et que parallèlement elle impose un suivi métrologique et une surveillance pour les ouvrages soumis à autorisation (décret du 29 mars 1993 de la loi sur l'Eau de 1992 reconduit dans le cadre de la nouvelle loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006). Notons également à ce sujet, l'explicite possibilité de lever une taxe pour la collecte, le stockage et le traitement des eaux pluviales et de ruissellement stipulée à l'article 48 de la loi de 2006. Même si elle n'est pas obligatoire, limitée aux constructions neuves et ne pouvant dépasser 0,20 € par mètre carré raccordé à un réseau public de collecte, cette taxe affirme dans son esprit la nécessaire maîtrise des eaux de ruissellement et incite à rejeter moins voire à se déconnecter des réseaux publics.

-
- que la société est en forte demande de stratégies durables c'est-à-dire techniquement et environnementalement fiables mais également socialement et économiquement acceptables.

Pour ces deux raisons l'évaluation des techniques d'infiltration s'avère indispensable et la recherche de compromis entre leurs différentes facettes parfois conflictuelles devient inévitable. Pour cela, toute décision les concernant doit intégrer différents points de vue : leur efficacité technique, les impacts et interactions avec l'environnement et la ville et leurs enjeux socio-économiques. La complexité d'évaluation de ces systèmes est de plus renforcée par la pluralité des échelles spatiales concernées (d'un aménagement d'un élément à la gestion du bassin versant) et par la nécessité d'intégrer le long terme (leur durée de vie).

Objectifs du travail

L'objet du travail consiste à élaborer des indicateurs de performances pour le développement d'un service durable de l'assainissement pluvial par infiltration utile pour des problématiques de conception et de suivi. Ainsi, outre la définition d'indicateurs, nous proposerons des méthodes permettant de les exploiter.

Définition de la notion d'indicateurs

Nous avons retenu la définition de l'IFEN (2000) qui considère un indicateur comme : « *quelque chose qui simplifie l'information en provenance de phénomènes complexes et qui la quantifie de manière à la rendre significative à l'échelle désirée* ». Nous avons complété cette définition en ajoutant qu'un indicateur doit en outre être muni d'une « structure de préférence » de manière à pouvoir refléter une tendance exploitable compte tenu du problème traité, ce qui le dissocie d'un simple descripteur. Par exemple, si l'on juge la qualité des eaux sortant d'un système par un indicateur lié à la couleur, il faut que l'on soit capable d'identifier si la couleur est « satisfaisante », « plus satisfaisante » que telle autre, etc. Ainsi, dans ce travail indicateur de performance et critère sont considérés comme synonymes.

Délimitation du contour des systèmes techniques étudiés, échelles considérées et objectifs

Les systèmes étudiés ont été définis comme étant un ouvrage ou un aménagement comprenant ou nécessitant des systèmes de retenue/infiltration.

L'échelle d'espace considérée est donc l'échelle locale d'une opération.

L'échelle de temps pertinente retenue est tout ou partie de la vie d'un ouvrage ou de celle d'un aménagement.

Définition de la finalité des indicateurs et des acteurs à qui sont destinés les indicateurs.

Les finalités identifiées sont :

- d'évaluer un ouvrage, une situation, un aménagement à un moment donné ;
- de suivre dans le temps un ouvrage, une situation, un aménagement (comparaison à différentes phases de la vie)
- de comparer des variantes
- de projets (en conception) ;
- d'actions de gestion sur un ouvrage ou un aménagement ;
- d'actions sur la structure d'un ouvrage ou un aménagement.

Les comparaisons se font donc à « environnement » sensiblement similaire. Ainsi les indicateurs ne sont pas destinés à comparer deux opérations complètement différentes l'une à Lille, l'autre à Lyon par exemple.

Les acteurs destinataires de ces indicateurs sont les « décideurs » (maîtres d'ouvrage), les « hommes d'étude » (concepteurs, exploitants).

Définition des indicateurs

Pour élaborer les performances puis les indicateurs, un groupe de travail a été constitué, il est censé représenté différents points de vue. Ce groupe de travail a rassemblé des chercheurs de différents domaines partenaires du projet et des acteurs opérationnels (services de collectivités publiques et bureaux d'études privés).

Les propositions d'indicateurs sont initiées soit sur des bases bibliographiques, soit à partir des recherches en cours auxquelles j'ai participé soit encore *in abstracto*. L'ensemble des propositions est ensuite soumis au groupe pour discussion, modification, re-définition.

Qualités requises pour les indicateurs

Chaque proposition d'indicateur sont ensuite testée sur des cas concrets et passer au crible de critères de qualité. Les critères de qualité retenus sont ceux de Labouze & Labouze (1995) et figurent au Tableau 0.1. Ces qualités sont en effet générales et peu liées au domaine. Elles permettent de se poser de bonnes questions et ce, de manière systématique. La démarche permettant de vérifier ces critères doit également être définie. La procédure est fournie au Tableau 0.1.

Tableau 0.1 - Liste des qualités requises dans la méthode de travail et rôle des partenaires dans le travail de test

Qualités requises / définition	Qui teste ces qualités et comment
Pertinence : capacité à refléter toute la signification d'un concept ou tous les aspects d'un phénomène et à garder sa signification dans le temps	La pertinence est validée par le groupe
Accessibilité : aptitude à être calculable facilement à un coût acceptable	L'accessibilité est validée qualitativement par les membres du groupe puis vérifiée par le chercheur coordonnateur qui évalue l'indicateur sur des cas concrets avec des données fournies par les opérationnels
Fidélité : conservation d'un biais à un niveau constant sur les unités spatio-temporelles de référence	La fidélité et l'objectivité sont validées par le chercheur coordonnateur qui fait évaluer les indicateurs par plusieurs évaluateurs (ou mode d'évaluation), plusieurs fois
Objectivité : aptitude à donner une tendance qui ne dépend pas de l'évaluateur	
Précision/robustesse : fiabilité de l'évaluation avec une erreur acceptable / aptitude à donner une même tendance malgré les incertitudes sur l'évaluation	La précision/robustesse est testée par le chercheur coordonnateur qui évalue les incertitudes ou les sources de méconnaissance et qui applique la définition à des cas concrets
Sensibilité : aptitude à discriminer des solutions	La sensibilité est testée par le chercheur coordonnateur qui choisit des cas concrets que l'on veut discriminer ; l'indicateur est ensuite appliqué pour savoir s'il est capable de discriminer correctement des différents cas
Univocité : aptitude à donner une valeur interprétable de manière univoque	L'univocité est testée a priori au moment de la définition de l'indicateur par le chercheur coordonnateur et le groupe

Performances considérées

Les performances ou objectifs poursuivis pour l'évaluation des systèmes d'infiltration prennent en compte les performances techniques qui reflètent le fonctionnement adéquat du système technique, performances environnementales et sanitaires et les performances socio-économiques, qui évaluent les coûts et les enjeux sociaux de ces systèmes. Comme nous considérons deux objectifs principaux (la conception de ces ouvrages et leur suivi) les performances seront présentées séparément.

Lors d'études précédentes les indicateurs avaient été classés par famille : indicateurs techniques, environnementaux, socio-économiques. Cette distinction a été supprimée car certains indicateurs étaient liés et cette classification avait tendance à cloisonner et à masquer les interdépendances (la recharge de nappe par exemple n'est intéressante que si l'eau de recharge est de bonne qualité).

Ainsi la liste des performances considérées est la suivante.

Tableau 0.2 – Liste des performances considérées

Liste des performances	Prise en compte en conception	Prise en compte en suivi
Protéger contre les inondations	X	X
Ne pas dégrader la qualité de la nappe		X
Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas dégrader la qualité de la nappe / Ne pas polluer le sol en profondeur	X	X
Contribuer à la recharge des nappes	X	
Préserver les ressources naturelles	X	X
Etre maintenable techniquement et facilement par l'organisation	X	X
Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels	X	X
Produire des déchets facilement gérables	X	X
Avoir un coût peu élevé	X	X
Qualité de l'aménagement	X	
Acceptabilité sociale d'un scénario		X

Démarche proposée

La démarche du présent travail consistera donc à alimenter chacune des étapes définies précédemment pour chaque problématique : conception & suivi.

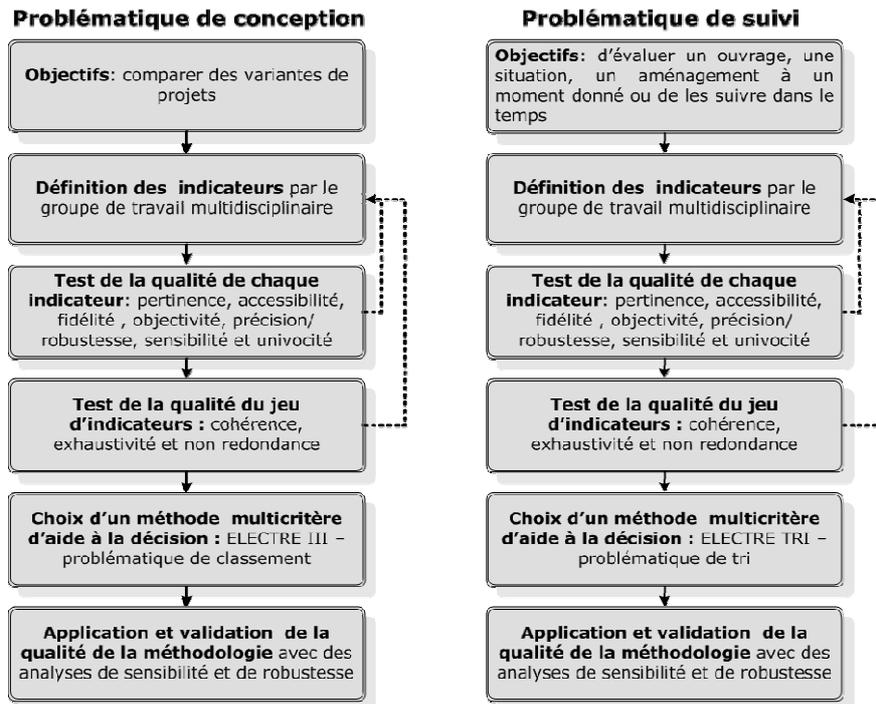


Figure 0.2 – Etapes de la construction d’une méthode multicritère d’aide à la décision, pour les phases de conception et de suivi des systèmes

Chapitre 1 Proposition d'indicateurs et de méthodes d'aide au choix multicritère pour une problématique de conception des ouvrages

1.1 Introduction

Le présent chapitre a pour but présenter les performances considérées pour l'évaluation des systèmes d'infiltration pour la phase de conception de ces systèmes.

Dans un premier temps, ce chapitre s'attachera à définir, pour chaque performance, son objectif, les considérations et points de vue adoptés pour aboutir à la proposition d'indicateurs. La description de chaque indicateur comporte son mode d'évaluation, sa qualité et parfois des exemples d'application. On trouvera dans (Moura, 2008) également l'historique des différentes formulations d'indicateurs qui ont conduit à la définition retenue *in fine*.

Dans un deuxième temps, la méthode multicritère utilisée pour l'agrégation des indicateurs sera exposée et suivie d'une étude de cas. Rappelons que la méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration pour cette phase de conception vise à fournir aux décideurs des outils leur permettant de comparer des variantes de projets, d'actions de gestion sur un ouvrage ou un aménagement ou encore d'actions sur la structure d'un ouvrage ou un aménagement.

1.2 Présentation des performances et des indicateurs associés

1.2.1 Protéger contre les inondations

1.2.1.1 Considérations

Cette performance reflète l'aptitude d'un système d'infiltration à assainir une zone déterminée en la protégeant c'est-à-dire en préservant, autant que faire se peut, les biens et les personnes contre les inondations. Cependant, la protection ne peut être totale ; elle fera donc référence au risque pris et assumé lors de la conception des systèmes.

Le problème de la quantification du risque d'inondation n'est pas nouveau. On peut trouver dans la littérature de très nombreuses études concernant cet aspect. Plusieurs générations de méthodes ont fait évoluer la construction des indicateurs de risque d'inondation. Selon Hauger *et al.* (2006), originellement, les indicateurs de risque d'inondation n'ont considéré que l'aléa, sans prendre en compte les caractéristiques de l'occupation du sol. Progressivement le risque a intégré les conséquences physiques de l'aléa comme les hauteurs de submersion par exemple. Cependant ces notions se sont montrées insuffisantes car ne prenant pas en compte la vulnérabilité des surfaces touchées. En effet une hauteur de submersion de 50 cm sur un parking ne présente pas le même degré de vulnérabilité que sur une cours de maternelle en jour de semaine, par exemple.

Ainsi la notion de risque d'inondation a t-elle évoluée vers la définition qui est aujourd'hui couramment admise, c'est-à-dire celle de la conjonction de l'aléa et de la vulnérabilité d'une zone. La vulnérabilité tente d'intégrer, suivant le problème traité, la sensibilité des « entités » touchées (type d'habitation et d'habitants, matériel utilisé dans les constructions, existence de routes alternatives aux routes inondées...). Nous avons plutôt retenu, pour notre part, cette dernière conception du risque.

La performance hydraulique d'une variante de projet est d'autant meilleure que la fréquence de débordement, prise en compte pour le dimensionnement, est élevée, que le volume débordé pour un évènement exceptionnel n'est pas trop important et ce en considérant la vulnérabilité des zones.

1.2.1.2 Définition retenue

Finalelement, la définition retenue des indicateurs pour la performance « Protéger contre les inondations » a utilisé les mêmes bases que les définitions précédemment testées, mais avec une simplification pour le calcul des volumes débordés et l'utilisation de l'expertise pour l'évaluation de la vulnérabilité des zones touchées par les débordements. Le problème du biais lié à l'agrégation a été traité en multipliant leur nombre en autant d'indicateurs que de type d'usage du sol.

Les définitions sont donc les suivantes :

Indicateur de fréquence de dimensionnement

$IC_{HYDI} = T_{dim}$ (en années, Préférence croissante, $]0, + \infty [$)	(Équation 1.1)
---	----------------

Avec :

T_{dim} : Temps de retour utilisé pour le dimensionnement du système, en années

Indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées

Les indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées sont au nombre de sept et sont complémentaires. La vulnérabilité des surfaces touchées va ainsi être donnée par un volume débordé sur différents types de surface (voirie, parking, espaces verts, ...). L'importance relative de chaque indicateur sera donnée non plus par des « taux de substitution » intégrés dans une fonction d'agrégation mais par des pondérations utilisées directement dans la méthode d'exploitation des indicateurs. Pour être pertinent cela imposera de recourir à une méthode d'agrégation partielle qui autorise des pondérations.

Notons que nous proposons sept types d'usage du sol dans les définitions qui vont suivre, cependant la méthode peut être facilement utilisée pour d'autres types d'usage définis par l'utilisateur de la méthode.

$IC_{HYD_{VOI}} = V_{debvoi}$	(en m ³ , Préférence décroissante, [0,+ ∞ [)	(Équation 1.2)
$IC_{HYD_{PARK}} = V_{debpark}$	(en m ³ , Préférence décroissante, [0,+ ∞ [)	(Équation 1.3)
$IC_{HYD_{HAB}} = V_{debhab}$	(en m ³ , Préférence décroissante, [0,+ ∞ [)	(Équation 1.4)
$IC_{HYD_{PARC}} = V_{debparc}$	(en m ³ , Préférence décroissante, [0,+ ∞ [)	(Équation 1.5)
$IC_{HYD_{IAR}} = V_{debiar}$	(en m ³ , Préférence décroissante, [0,+ ∞ [)	(Équation 1.6)
$IC_{HYD_{IFR}} = V_{debifr}$	(en m ³ , Préférence décroissante, [0,+ ∞ [)	(Équation 1.7)
$IC_{HYD_{ACP}} = V_{debacp}$	(en m ³ , Préférence décroissante, [0,+ ∞ [)	(Équation 1.8)

Avec :

V_{debvoi} : volume total débordé dans la voirie en m³

$V_{debpark}$: volume total débordé dans les parkings en m³

V_{debhab} : volume total débordé dans les habitats en m³

$V_{debparc}$: volume total débordé dans les parcs, espaces verts, chemins piétons en m³

V_{debiar} : volume total débordé dans les zones occupées par industries considérées à risque en m³

V_{debifr} : volume total débordé dans les zones occupées par industries considérées à faible risque en m³

V_{debacp} : volume total débordé dans les zones occupées par des équipements d'accueil au public en m³

Chacun des volumes étant défini pour une pluie de période de retour importante supérieure à la période de retour de dimensionnement et laissée au choix du concepteur (par exemple 50 ans).

1.2.1.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

En ce qui concerne la **vulnérabilité des zones touchées** de nombreuses approches ont pu être développées. Globalement les approches sont probabilistes associant une probabilité d'occurrence à un effet adverse identifié comme par exemple Penning-Rowse *et al.* (2005), ou basées sur la notion de risque accepté comme la méthode *Inondabilité* (Gilard, 1998), soit encore sur la vulnérabilité économique estimée par les pertes financières directes, voire indirectes liées aux dommages créés par les inondations comme Grünthal *et al.* (2006).

La méthode d'évaluation du risque, utilisée par Penning-Rowse *et al.* (2005), est une procédure basée typiquement sur une approche probabiliste simple qui évalue la probabilité et la sévérité des événements adverses. Elle s'effectue classiquement en quatre phases : l'identification puis la caractérisation du danger, l'évaluation de l'exposition et enfin la caractérisation finale du risque. L'identification du danger consiste à déterminer les « potentiels » de pertes physiques et humaines dues à une inondation. La caractérisation du danger évalue les effets de l'exposition à l'aléa. Il considère par exemple la profondeur et la vitesse de l'inondation, les caractéristiques des constructions touchées et de la population affectée. L'étape d'évaluation de l'exposition fait la liaison entre l'occurrence de débordement et la probabilité d'effets adverses. Pour finir, la caractérisation du risque combine l'aléa de l'inondation avec les probabilités des personnes ou de biens d'être touchés.

La méthode *Inondabilité* par exemple est représentative des méthodes basées sur le « risque accepté », elle a été développée à l'origine pour apporter une réponse opérationnelle aux acteurs en charge de la gestion et l'aménagement des cours d'eau. Elle quantifie l'aléa et la vulnérabilité dans une même unité de mesure : une période de retour. Pour chaque parcelle d'une zone d'étude considérée, l'aléa est défini comme la période moyenne de retour de la première crue inondant cette surface (TAL). Elle est calculée sur la base de modélisations hydrauliques et hydrologiques des inondations. De même sur chaque parcelle la vulnérabilité est déduite d'enquêtes de perception du risque auprès des occupants. Les individus interrogés doivent exprimer leur besoin de protection minimale à partir des mêmes variables que celles utilisées pour décrire l'aléa (période moyenne de retour de l'inondation, durée de l'inondation et hauteur d'eau et éventuellement la vitesse de l'eau). Les variables sont ensuite traduites, à partir de modèles débit-durée-fréquence, en périodes moyennes de retour (TOP). Enfin sur chaque parcelle, la valeur de l'aléa (TAL) est comparée à celle de la vulnérabilité (TOP). Ainsi les zones où l'aléa (TAL) est supérieur à la vulnérabilité (TOP) sont repérées comme étant des zones à risque, les autres sont considérées comme des zones présentant une situation de « crédit » de protection (Gilard, 1998).

Enfin la méthode utilisée par Grünthal *et al.* (2006) est illustrative des méthodes « économiques » basées sur l'estimation des pertes financières liées à une inondation. Dans la méthode cinq phases sont considérées : l'estimation de l'aléa, le développement d'un inventaire de capital, l'évaluation de la vulnérabilité, l'estimation des pertes et la synthèse. L'estimation de l'aléa est ciblée sur la probabilité d'une inondation. La phase de développement de l'inventaire de capital identifie les biens qui sont exposés et vulnérables à l'inondation. L'évaluation de la vulnérabilité quantifie le degré d'exposition du capital à l'inondation, pour chaque type d'activité une valeur économique unitaire est attribuée. L'estimation des pertes superpose les zones inondées et la vulnérabilité pour chaque scénario d'inondation. Dans l'étude de Grünthal *et al.* (2006), seules les pertes financières directes ont été considérées. A la fin une synthèse est faite, elle lie l'estimation des pertes financières et l'aléa.

Dans notre cas, aucune des trois approches présentées n'est vraiment applicable en l'état pour des opérations de conception. Elles demandent des études spécifiques importantes, liées au site d'étude et qui ne sont pas compatibles avec le temps imparti aux études. Par ailleurs, certaines peuvent être contestables notamment celles qui sont basées sur la vulnérabilité économique.

Nous avons donc utilisé une approche plus simple, qui lie la vulnérabilité d'une zone aux activités qui y sont prévues. Ainsi la vulnérabilité des surfaces touchées va être traduite par le poids relatif accordé à chaque type d'occupation du sol. Ce poids relatif sera utilisé ultérieurement dans la méthode d'exploitation des indicateurs. Ainsi la vulnérabilité se traduit par un volume débordé sur un type de surface et sa gravité par une pondération particulière.

Pour attribuer des poids pour chaque type d'occupation et les estimer de manière cohérente, nous avons opté pour la méthode des valeurs propres (ou AHP - Analytic Hierarchic Process) développée par Saaty (1977).

Pour évaluer les poids w_i des activités, nous comparons ces activités deux à deux. Nous obtenons ainsi une matrice V carrée de dimension n , appelée matrice de comparaisons binaires, où n est le nombre d'activités. Le remplissage de la matrice se fait en associant une valeur v_{ij} à la comparaison des activités deux à deux représentant w_i/w_j . Dans notre cas, par exemple, lorsque l'on compare une activité i à une activité j , la note v_{ij} peut prendre les valeurs :

1 : si l'activité i présente le même niveau de vulnérabilité que l'activité j ;

3 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité légèrement plus important que l'activité j ;

5 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité nettement plus important que l'activité j ;

7 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité indiscutablement nettement plus important que l'activité j ;

1 / 3 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité légèrement moins important que l'activité j ;

1 / 5 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité nettement moins important que l'activité j ;

1 / 7 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité négligeable par rapport à l'activité j .

La matrice V de comparaisons binaires est non symétrique mais réciproque.

Si le décideur (l'expert qui remplit la matrice) est cohérent, ce que ne suppose pas *a priori* la méthode, alors un certain nombre de propriétés doivent être vérifiées comme la transitivité par exemple

$$\left(v_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \frac{w_i}{w_k} \times \frac{w_k}{w_j} = v_{ik} \times v_{kj} \right)$$

$$V \cdot \vec{w} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & & & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} = n \cdot \vec{w} \quad (\text{Équation 1.9})$$

On constate alors que la propriété $V \cdot \vec{w} = n \cdot \vec{w}$ est vérifiée si bien que si l'expert est cohérent, alors n le nombre d'activités est une valeur propre de V , on montre même que c'est la valeur propre dominante (Pomerol & Barba Romero, 1993).

Pour s'assurer de sa cohérence, on laissera l'expert remplir la matrice V , on calculera la plus grande valeur propre λ_{\max} de la matrice V et on s'assurera qu'elle est proche de n (c'est-à-dire du nombre d'activités à juger). Pour traduire cette proximité à n , on calcule un taux d'incohérence :

$CI = \frac{|\lambda_{\max} - n|}{n - 1}$ que l'on comparera au taux maximal d'incohérence appelé aussi coefficient d'incohérence aléatoire CIA (obtenu pour des matrices V construites de manière complètement aléatoire) et dont il existe des valeurs guides pour différents n . Si le rapport $\frac{CI}{CIA}$ est inférieur à 10% on considère que l'expert est cohérent.

Nous avons demandé à quatre personnes – P1, P2, P3 et P4 - (trois chercheurs et une personne qui travaille dans le service d'exploitation des systèmes d'assainissement du Grand Lyon) de remplir des matrices de comparaisons binaires. Les résultats sont donnés à la Figure 1.1. Les taux d'incohérence sont tous dans les limites acceptables. Les différences de poids entre les personnes seront utilisées ultérieurement comme incertitude dans la méthode d'exploitation des indicateurs. Les poids relatifs à utiliser sont présentés au Tableau 1.1, il fournit la valeur moyenne des poids obtenus pour chaque personne interviewée.

Les résultats de l'application de la méthode pour des personnes différentes montrent la subjectivité d'une telle évaluation. Nous pouvons observer que les tendances sont les mêmes, toutefois les résultats sont tous différents.

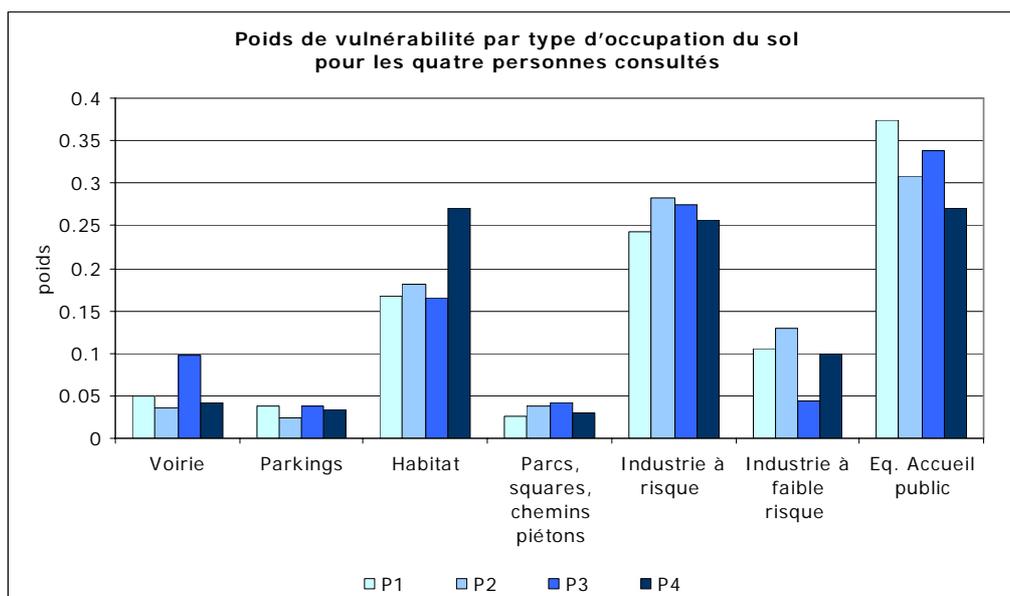


Figure 1.1 – Poids de vulnérabilité par type d'occupation du sol, pour les quatre personnes consultées

Tableau 1.1 – Poids de vulnérabilité par type d'occupation du sol

Type d'occupation du sol	Poids	Ecart type	CV (%)
Voirie	0,056	0,028	48,9
Parking	0,033	0,006	19,1
Habitat	0,196	0,050	25,6
Parcs, squares, chemins piétons	0,033	0,007	21,6
Industrie à risque	0,264	0,018	6,8
Industrie à faible risque	0,094	0,036	38,3
Equipements d'accueil au public	0,323	0,044	13,7

1.2.1.4 Qualité des indicateurs

Indicateur de fréquence de dimensionnement

Les incertitudes sur l'indicateur de fréquence de dimensionnement sont nulles car cette indicateur reflète un parti pris de risque assumé, choisi par le concepteur. Cependant le dimensionnement des ouvrages selon cette période de retour choisie présente des incertitudes pouvant être importantes. On n'est en effet pas toujours sûr que la période de retour correspondant au dimensionnement est celle choisie.

La qualité globale de l'indicateur de fréquence de dimensionnement est évaluée selon les critères proposés par Labouze & Labouze (1995). Les résultats sont donnés au Tableau 1.2.

Tableau 1.2 – Evaluation de l'indicateur de fréquence de dimensionnement - critère tout à fait satisfait

(+++): critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
++	+++	+++	+++	+++	+++	+++

Cet indicateur ne présente aucun problème quant à sa calculabilité. Par contre sa pertinence peut être discutable dans le cas où deux alternatives de projet ont une période de retour de dimensionnement différentes, car placées différemment dans la zone à aménager. Un ouvrage étant placé à proximité des habitations, par exemple et l'autre dans un parc ne nécessitent pas de la même protection. En effet dans le parc le risque d'inondation accepté peut être plus importante. Dans tous les cas la décision a été de maintenir l'indicateur en l'état.

Indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées

Les estimations des volumes débordés possèdent des incertitudes importantes et l'évaluation qualitative du type de surface inondée est subjective, même si nous croyons que le concepteur des systèmes connaît bien l'aménagement et peut identifier correctement quel type de surface va être inondé. De plus, le biais que peut avoir l'évaluation de ces indicateurs est relativement constant, ce qui ne porte pas préjudice pour la comparaison des systèmes.

Les incertitudes des indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées sont dues à l'estimation des volumes débordés. Ces incertitudes sont liées aux modèles hydrologiques ainsi qu'à la capacité d'infiltration de l'ouvrage. Ces modèles possèdent, selon Refsgaard & Storm (1996) dans Gnouma (2006) quatre types d'incertitudes. L'incertitude liée à la nature, qui produit une fonction aléatoire dans le processus de genèse du ruissellement. L'incertitude des données utilisées dans ces modèles. L'incertitude liée aux paramètres calés du modèle. Finalement, l'incertitude liée à l'incapacité du modèle à représenter les processus physiques réels du ruissellement. On estime généralement ces incertitudes à 20 % sur les volumes calculés.

L'évaluation de la qualité des indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées est donnée au Tableau 1.3.

Tableau 1.3 – Evaluation de l'indicateur de vulnérabilité des surfaces touchées - critère tout à fait satisfait (+++): critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
++	+++	+++	++	+++	+++	+++

La pertinence définie par Labouze & Labouze (1995) comme « la capacité à refléter toute la signification d'un concept ou tous les aspects d'un phénomène » n'est pas très bien vérifiée pour les indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées, en effet, l'utilisation des volumes débordés au lieu de la surface touchée par l'inondation ne permet pas une représentation idéale du phénomène. Ce problème a déjà été discuté au § 1.2.1.1. Cependant le compromis entre pertinence et accessibilité nous a conduit à les garder, faute de mieux. L'objectivité de l'indicateur n'est pas non plus très nette car l'identification du type de surface touchée par un débordement n'est pas toujours facile et peut

varier selon la personne qui fait l'étude. Néanmoins, au vu des essais que nous avons réalisés le risque de subjectivité nous a paru assez mineur.

1.2.2 Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas dégrader la qualité de la nappe / Ne pas polluer le sol en profondeur)

1.2.2.1 Considérations

Cette performance reflète le fait que le système d'infiltration ne doit pas détériorer la qualité de la nappe et ne pas laisser la pollution pénétrer trop en profondeur de manière à ce qu'on puisse facilement l'extraire.

Dans ce contexte plusieurs approches peuvent être mise en œuvre.

La **première approche** consiste à adopter une vision liée au risque de pollution de la nappe en confrontant la pression anthropique et la vulnérabilité de la nappe. Nous verrons dans le paragraphe suivant comment a pu être mise en œuvre une telle approche pour notre problème (Cf. § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Dans la littérature peu de méthodes existent sur ce principe. Quand elles existent, elles ont pour but soit de traiter de la faisabilité des solutions d'infiltration selon des critères très grossiers (par exemple VSA, 2002, Stahre & Urbonas, 1990) soit de prescrire des équipements complémentaires comme (Grand Lyon, 2007). La méthode du Grand Lyon (2007) par exemple aide à définir si un système d'infiltration doit posséder un prétraitement des eaux ou pas. Pour cela un indicateur est défini sur la base du croisement des risques d'apport de la pollution au milieu naturel et de la sensibilité du milieu récepteur jugée selon les usages. Comme peut être vu dans le Tableau 1.4, l'indicateur peut recevoir une note de 1 à 4.

Tableau 1.4 – Grille d'analyse de l'indicateur – notes d'état (adapté de Grand Lyon, 2007)

Risque \ Sensibilité	Forte	Moyenne
	(alimentation en EP)	(nappe sans usage immédiat)
Très fort (zones industrielles, parkings des transports de matières dangereuses, stations services, installations classés avec impact sur l'eau)	1	1
Fort (autoroutes, routes à fort trafic, boulevards périphériques, gares de marchandises et parkings poids lourds)	1	2
Moyen (zones périurbaines denses, habitats collectifs, centres des villages, zones d'artisanat, garages automobiles, parkings de plus de 50 places et voiries à trafic moyen)	2	3

Faible (zones périurbaines peu denses, zones pavillonnaires, espaces ludiques et stades, voiries légères et internes, parkings de moins de 50 places, couloirs de bus ou de tram)	3	4
--	---	---

Les notes d'état sont :

- Note 1 : Prétraitement obligatoire. Traitement par décantation dimensionné pour une vitesse de séparation inférieure à 2m/h, sur la pluie d'occurrence annuelle et avec des dispositifs de fermeture de l'exutoire automatiques et facilement manipulables. Traitement des flottants à prévoir également ;
- Note 2 : Ouvrage de prétraitement obligatoire : décanteur à vanne d'isolement avant filtration ;
- Note 3 : Pas de prétraitement nécessaire dans le cas des systèmes d'infiltration superficiel ou à ciel ouvert (fossés, noues, bassins) ; prévoir une hauteur de 2 m de zone non saturée et une couche filtrante de 0,20 à 0,50 m sur membrane anticontaminante (géotextile) ; prévoir un prétraitement par décantation avec vanne d'isolement en cas d'infiltration souterraine (puits) ;
- Note 4 : Pas de prétraitement nécessaire.

La **deuxième approche** consiste à essayer de quantifier l'aptitude à retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas dégrader la qualité de la nappe / Ne pas polluer le sol en profondeur) en examinant les conditions de transfert des polluants dans le sol.

Nous avons vu dans la partie bibliographique que le risque de transfert des polluants dans le sol sous un système d'infiltration peut être limité si le choix de l'emplacement de l'ouvrage considère en plus des caractéristiques hydrauliques, les caractéristiques physico-chimiques du sol qui jouent un rôle important dans la capacité du sol à retenir les polluants usuellement apportés par les eaux de ruissellement (Cf. § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

En phase d'étude de faisabilité, des investigations préliminaires sont nécessaires (occupation précédente du site, type de sous-sol et de sol ...). Il est cependant très difficile, en phase de conception, de caractériser l'aptitude potentielle qu'aura le sol à retenir la pollution. D'après les recherches publiées et les expérimentations en cours (Citeau, 2006), trois facteurs majeurs sont souvent identifiés comme prépondérants : l'épaisseur de la zone non saturée sous l'ouvrage (qui va servir de « filtre »), les caractéristiques du sol en place et la pression exercée par le bassin versant sur la surface d'infiltration.

La zone non saturée est en effet un point important. Il est de bonne pratique, généralement, d'imposer une épaisseur d'au moins 1 m en phase de faisabilité, seuil qui dépend en France des collectivités. Des études montrent que plus l'épaisseur de la zone non saturée est importante plus grande est la protection

de la nappe, vis-à-vis des apports d'eau de ruissellement (Datry, 2003). Par contre, aucune valeur seuil autre que le seuil de faisabilité n'existe. On peut alors considérer que plus cette épaisseur est importante, meilleure est l'aptitude du sol à retenir la pollution.

En ce qui concerne les caractéristiques du sol, les paramètres à considérer, si l'on se réfère à la littérature et notamment à la synthèse bibliographique de Citeau (2006), sont : la vitesse d'infiltration, le pH et la capacité d'échange cationique. Une faible vitesse d'infiltration favorise la rétention des polluants, le temps de contact entre les polluants et les éléments du sol étant plus long. En revanche, une vitesse élevée risque d'entraîner les polluants. Dechesne (2002) constate par exemple que des bassins d'infiltration qui possèdent de fortes conductivités hydrauliques présentent aussi des fronts de pollution plus profonds que les autres en ce qui concernent les métaux lourds sans jamais toutefois dépasser 1m de profondeur. La vitesse d'infiltration minimale recommandée pour les systèmes d'infiltration est généralement située aux alentours de 10^{-6} m/s, la vitesse maximale d'infiltration pour qu'il n'existe pas de transfert de polluants dans les couches plus profondes du sol n'est jamais déterminée avec précision. Des valeurs de l'ordre de 10^{-3} m/s sont souvent avancées (Barraud *et al.*, 2006b ; Citeau, 2006). Le risque peut également venir de l'existence de chemins préférentiels présents dans les sols contenant une quantité importante de limons fins ou d'argiles ou qui possèdent des structures grossières comme le fluvio-glaciaire. Barbosa (2000) recommande, par exemple, de ne pas utiliser des sols ayant une teneur en argile supérieure à 10 % et une teneur en limons fins supérieure à 25%.

Le pH est un paramètre qui contrôle le processus de sorption des polluants par le sol. C'est la raison pour laquelle on recommande souvent un pH « pas trop acide ». Il existe bien quelques valeurs guides en phase de faisabilité ou d'admissibilité (par exemple celles de VSA, 2002) qui préconise des pH du sol superficiel de plus de 5,5 et si possible de plus de 6,5, mais là encore rien n'est donné pour évaluer la plus ou moins bonne aptitude du sol à retenir la pollution suivant ce paramètre.

La capacité d'échange cationique (CEC) est également citée par quelques auteurs comme étant un paramètre important. En effet la CEC d'un sol est une mesure du nombre total de sites disponibles pour l'échange de cations, elle exprime également la capacité d'un sol à résister aux changements de pH (capacité tampon) et est fortement liée à sa composition. Citeau (2006) recommande une CEC minimale de 5 meq/100g dans les sols soumis à l'infiltration. Cependant ce paramètre s'avère assez peu pertinent. En effet la CEC des sols sous les systèmes d'infiltration est modifiée très rapidement après leur construction quel que soit le sol en place pour prendre les valeurs dictées par les sédiments qui sont apportés aux ouvrages (Dechesne, 2002).

La pression anthropique caractérise l'importance des apports de polluants par rapport à la surface d'infiltration. Il est clair qu'elle doit être la plus petite possible. La mesure des apports de polluants dans un bassin versant est cependant difficile à mesurer. Les mesures de concentration en polluants

dans les eaux de ruissellement sont souvent effectuées, toutefois leurs concentrations sont très dépendants du contexte local et de l'événement pluvieux en lui-même. Malgré cela nous allons utiliser des coefficients de risque de pollution pour chaque type d'occupation des bassins versants dans l'indicateur.

Nous retiendrons donc pour cette approche que la performance vis-à-vis de la qualité de la nappe et la rétention de la pollution par le sol au moment de la conception sera jugée d'autant meilleure que la nappe est protégée par une zone non saturée importante sous les ouvrages composant le système et que l'aptitude du sol à retenir la pollution est grande. Cette aptitude du sol à retenir la pollution peut-être caractérisée par un pH neutre à basique, une vitesse d'infiltration pas trop élevée et une pression anthropique faible exercée sur les surfaces d'infiltration par le bassin versant.

1.2.2.2 Définition retenue

Elle est basée sur trois sous-indicateurs.

Indicateur de protection de la nappe : épaisseur de zone non saturée (ZNS)

Il part du principe que plus grande est l'épaisseur de la zone non saturée, (qui doit être supérieure à 1 m, limite de faisabilité) meilleure est la protection que le sol offre à la nappe.

$IC_{NS1} = ZNS$ (en m, Préférence croissante, $[1, + \infty [$)	(Équation 1.10)
---	-----------------

Avec :

ZNS : épaisseur la plus faible de la zone non saturée sous les différents dispositifs d'infiltration dans la zone à aménager, en m

Indicateur d'aptitude du sol à la rétention des polluants

La première formulation reprend les caractéristiques du sol :

Le pH

Si $pH \geq 5 \rightarrow IC_{NS2} = pH$;	(Équation 1.11)
--	-----------------

sinon $IC_{NS2} = 0$ (en unités pH, Préférence croissante, $[0 ; 5,14]$)

Avec :

pH : pH du sol sous l'ouvrage, dans la zone à aménager

La vitesse d'infiltration (V_i)

La vitesse d'infiltration recommandée pour les sols des ouvrages d'infiltration se situe entre : 10^{-6} et 10^{-4} m/s.

Si $10^{-6} \leq V_i \leq 10^{-4}$

alors $IC_{NS3} = V_i$ (Équation 1.12)

Sinon $IC_{NS3} = 1$ (en m/s, Préférence décroissante, $[10^{-6}, 10^{-4}; 1]$)

Avec :

V_i : plus importante vitesse d'infiltration du sol sous l'ouvrage d'infiltration, dans la zone à aménager, en m/s

La deuxième formulation consiste à remplacer les conditions de pH par le même essai montré dans la deuxième proposition de l'indicateur (Cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Indicateur de pression anthropique

L'indicateur de pression anthropique vise à prendre en compte la pression exercée sur les surfaces d'infiltration par le bassin versant, en considérant le type d'occupation du bassin versant. Un facteur de pénalisation est utilisé pour les systèmes qui devraient avoir un prétraitement mais qui ne l'ont pas.

$IC_{PR} = \text{Max}_i \left(\frac{Sa_i}{Sinf_i} \times F_i \times F_j \right)$ (Adimensionnel, Préférence décroissante, $]0, +\infty[$) (Équation 1.13)

Avec :

Sa_i : surface du bassin versant, en m^2

$Sinf_i$: surface d'infiltration, en m^2

F_i : Facteur de pondération par rapport au type d'occupation du bassin versant

F_j : Facteur de pénalisation fonction du type de prétraitement et du contexte.

Les facteurs de pondérations F_i et F_j sont obtenus par expertise selon la méthode décrite au paragraphe 1.2.2.3.

1.2.2.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Pour l'indicateur de protection de la nappe, l'épaisseur de la zone non saturé est obtenue à partir de sondages faits sur le terrain où vont être implantés les ouvrages d'infiltration ou à partir d'études hydrogéologiques antérieures.

Le pH doit être mesuré dans le sol de la zone à aménager sur plusieurs échantillons.

Des mesures de conductivité hydraulique sont indispensables pour le projet de dispositifs d'infiltration, la vitesse d'infiltration utilisée dans l'indicateur IC_{NS3} doit être considéré comme la situation la plus défavorable : la conductivité hydraulique la plus importante dans la zone à aménager.

Les mesures de conductivité hydrauliques doivent être réalisées à saturation. Plusieurs méthodes existent, selon la granulométrie du sol. Les méthodes utilisent, en général une charge d'eau constante et mesurent la hauteur d'eau infiltrée dans le temps à aide d'un anneau. La norme NF X 30-418 spécifie une méthode d'essai pour déterminer la conductivité hydraulique au moyen d'un dispositif à charge constante permettant de mesurer l'écoulement de l'eau dans les sols granulaires, en utilisant un double anneau rigide.

Les facteurs F_i de pondération par rapport au type d'occupation du bassin versant ont été obtenus par la méthode des valeurs propres ou méthode AHP, en calant les coefficients sur des jugements d'experts comme présenté au § 1.2.1.3. Les résultats sont donnés au Tableau 1.5.

Le facteur F_j de pénalisation fonction du type de prétraitement est égal a 1 si il y a un système de prétraitement. Si l'ouvrage ne possède pas de système de prétraitement un coefficient de pénalisation est proposé. Il est de 1 pour les voies cyclables, chemins piétons ou infrastructures semblables ainsi que pour l'habitat quand les risques pour la nappe sont faibles ($IC_{NS1 \geq 2m}$ et $IC_{NS2 \neq 0}$ et $IC_{NS3 \neq 1}$) et 1,5 dans tous les autres cas.

Tableau 1.5 - Facteur de pondération par type d'occupation du bassin versant (F_i)

Type d'occupation	Facteur de pondération (F_i)	Ecart type	Coefficient de variation (%)
Voies cyclables, chemins piétons, etc	0,049	0,013	26
Habitat	0,114	0,067	59
Industrie	0,502	0,131	26
Route	0,335	0,144	43

Un exemple numérique de calcul de l'indicateur de pression anthropique est donné ici à titre d'illustration. Il concerne un aménagement fictif avec trois alternatives possibles : une alternative avec assainissement avec 12 puits, une deuxième alternative avec drainage par 2 tranchées et une dernière avec 100 mètres linéaires de noues. Les éléments relatifs à chaque option d'aménagement sont donnés au Tableau 1.6.

Tableau 1.6 – Éléments pour le calcul de l'indicateur de pression anthropique de l'exemple

	Alternative 1			Alternative 2		Alternative 3		
	Puits 1 à 3	Puits 4 à 6	Puits 7 à 12	Tranchée 1	Tranchée 2	Noue 1	Noue 2	Noue 3
Surface d'infiltration par ouvrage (m ²)	6,0	6,0	6,0	40,0	40,0	35,0	25,0	50,0
Surface active du bassin versant par ouvrage (m ²)	100,0	100,0	100,0	500,0	500,0	385,0	275,0	550,0
Type d'occupation du bassin versant	routes	habitat	espaces verts	route	habitat + espaces verts	route	habitat	espaces verts

L'indicateur de pression anthropique a été calculé pour chaque ouvrage, comme le montre le Tableau 1.7. Dans le cas de la Tranchée 2 un facteur F_i correspondant à une occupation du bassin versant par des habitats a été choisi, pour des motifs de sécurité, même si l'occupation du bassin versant est mixte. Les choix de ces facteurs doivent être faits selon l'expertise du décideur.

Tableau 1.7 – Résultats du calcul de l'indicateur de pression anthropique de l'exemple

	Alternative 1			Alternative 2		Alternative 3		
	Puits 1 à 3	Puits 4 à 6	Puits 7 à 12	Tranchée 1	Tranchée 2	Noue 1	Noue 2	Noue 3
F_i	0,335	0,114	0,049	0,335	0,114	0,335	0,114	0,049
F_j	1,5	1	1	1	1	1,5	1	1
IC_{PR} par ouvrage	8,38	1,90	0,82	4,19	1,43	5,53	1,25	0,54
IC_{PR}	8,38			4,19		5,53		

L'indicateur de pression anthropique doit donc prendre la valeur maximale pour chaque alternative d'aménagement.

1.2.2.4 Qualité de l'indicateur

Les incertitudes ont été estimées pour chacun des sous indicateurs.

Indicateur de protection de la nappe

Pour l'épaisseur de la zone non saturée, elle présente une incertitude de 0,5 m selon l'expert en hydrogéologie.

La qualité intrinsèque de l'indicateur est donnée au Tableau 1.8.

Tableau 1.8 – Evaluation de l'indicateur de protection de la nappe - critère tout à fait satisfait (+++) : critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++

L'indicateur de protection de la nappe ne présente aucun problème selon les critères de Labouze & Labouze (1995).

Indicateurs d'aptitude du sol à la rétention de polluants

Pour le pH du sol, en général, les appareils de mesure ont des incertitudes de l'ordre de 0,05 unité de pH, toutefois, le principal facteur d'incertitude à prendre en compte dans notre cas est celui de l'incertitude de l'échantillonnage du sol, dû à l'hétérogénéité de ce dernier. Si l'on considère cette hétérogénéité les incertitudes sont plutôt de l'ordre de 0,6 unité de pH selon Bedell *et al.* (2001).

L'incertitude de la perméabilité provient surtout, elle aussi, de l'hétérogénéité du sol. Selon les spécialistes et la littérature, l'incertitude est très disparate : elle va d'un facteur 2 jusqu'à un facteur 10. En accord avec les experts du groupe nous avons opté pour un facteur 5.

La qualité de IC_{NS2} et IC_{NS3} est synthétisée au Tableau 1.9.

Tableau 1.9 – Evaluation des indicateurs d'aptitude du sol à la rétention de polluants - critère tout à fait satisfait (+++) : critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Indicateur	Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
IC _{NS2}	+++	+	+++	++	+++	+++	+++
IC _{NS3}	+++	+++	+++	+++	+	+++	+++

L'indicateur IC_{NS2}, qui utilise la valeur du pH du sol n'est pas très compliqué à acquérir, cependant c'est une valeur qui n'est jamais mesurée usuellement. Il est important de souligner que, d'après la

normalisation française pour la gestion de sites et sols pollués (MEDD, 2007a), des mesures physico-chimiques du sol du site, avant l'implantation des systèmes, sont recommandées, à partir de 2007. Ces mesures serviront à caractériser le bruit de fond, qui permettra d'apprécier la contribution du site à la dégradation des milieux.

Notons que la vitesse d'infiltration utilisée dans l'indicateur IC_{NS3} , engendre un problème de précision. L'incertitude dans la mesure de la vitesse d'infiltration est très importante en raison de l'hétérogénéité du sol. Or la mesure de vitesse d'infiltration est primordiale pour la conception des ouvrages, leurs volumes de stockage sont calculés à partir de cette mesure. Nous allons donc utiliser l'indicateur en prenant compte les incertitudes.

Indicateur de pression anthropique

L'indicateur de pression anthropique est, en lui-même, une source de questionnement par rapport à sa pertinence. Nous savons que « la connaissance du type d'urbanisme ou d'activité sur une zone urbaine donnée ne suffit pas à prévoir les concentrations ou les masses de polluants qui seront générées par les événements pluvieux » (Chocat *et al.*, 2007). Cependant si les quantités sont loin de pouvoir être prédites, les tendances nous semblent dans un premier temps suffisantes. C'est pour cette raison que nous avons gardé l'indicateur, qui pourra être affiné à mesure que les connaissances dans le domaine de la prévision de la charge en polluants par les eaux pluviales avanceront.

En ce qui concerne l'incertitude de cet indicateur sa valeur maximale a été estimée à partir de la loi de propagation des incertitudes à 467%, en considérant que la surface du bassin versant, la surface d'infiltration et les facteurs de pondération sont indépendants.

F_j : Facteur de pénalisation fonction du type de prétraitement et du contexte.

Les incertitudes dans l'obtention des surfaces actives ont été estimées à 2,5%, à partir de tests réalisés avec un groupe de trois personnes qui mesuraient des surfaces en utilisant différentes méthodes : à l'aide du logiciel Autocad et par intégration des surfaces à la main.

Les incertitudes des surfaces d'infiltration ont été estimées à 3,5%, en utilisant les mêmes tests que pour l'estimation des incertitudes des surfaces actives et selon le jugement des trois personnes pour l'estimation des coefficients d'apport pour chaque type d'occupation du sol.

La loi de propagation des incertitudes a été appliquée avec les valeurs d'incertitudes estimées pour les surfaces d'infiltration et le bassin versant, le plus grand écart type pour l'estimation du facteur F_i, l'incertitude intrinsèque au facteur F_j a été considérée comme nulle.

L'évaluation de sa qualité est donnée au Tableau 1.10.

**Tableau 1.10 – Evaluation de l'indicateur de pression anthropique - critère tout à fait satisfait (+++) :
critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)**

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
++	+++	+++	++	+	+++	+++

La pertinence de l'indicateur est discutable, comme nous avons vu précédemment, car les caractéristiques de l'occupation du bassin versant ne suffisent pas à expliquer la pollution lessivée sur ces surfaces. Nous partons du principe que l'occupation peut malgré tout nous donner des pistes sur le risque de pollution, c'est pour cela que l'indicateur est maintenu.

1.2.3 Contribuer à la recharge des nappes

1.2.3.1 Considérations

Cette performance doit refléter le fait que le système d'infiltration contribue à recharger la nappe.

Notons que cette performance n'est pas majeure car la contribution à la recharge de nappe est généralement minime à l'échelle d'un ouvrage ou d'une opération d'aménagement. Cependant cela constitue un point positif dans un contexte où l'imperméabilisation des villes est de plus en plus suspectée de contribuer aux baisses de niveau de nappes (Miquel, 2003).

Cependant, cette performance est liée à la précédente (« permettre un bon état de la nappe ») car la recharge d'une nappe n'est un avantage que si l'eau infiltrée est de qualité acceptable.

La contribution à la recharge de la nappe est d'autant meilleure que les quantités d'eau qui s'infiltrent représentent une part importante des quantités précipitées sur la zone d'aménagement et que l'eau infiltrée n'est pas susceptible de polluer la nappe.

1.2.3.2 Définition retenue

La définition retenue pour l'indicateur « contribuer à la recharge de la nappe » est la suivante.

Si l'indicateur de qualité de nappe n'est pas trop mauvais, c'est-à-dire si au moins une des trois conditions est satisfaite : $IC_{NS1} \geq 2m$ et $IC_{NS2} \neq 0$ et $IC_{NS3} \neq 1$

alors $IC_{NAPPE} = \frac{S_{di}}{S_{dt}}$ Sinon $IC_{NAPPE} = 0$ (Adimensionnel, Préférence croissante, [0,1]) (Équation 1.14)

Avec :

S_{di} : total des surfaces drainées par infiltration, en m^2

S_{dt} : surface totale du bassin versant concerné par l'étude, en m^2

1.2.3.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Le calcul de l'indicateur IC_{NAPPE} est très simple : il faut vérifier le pourcentage des surfaces non drainés par infiltration et la surface total de l'aménagement.

1.2.3.4 Qualité de l'indicateur

L'incertitude de l'indicateur de recharge des nappes a été estimée à partir de la loi de propagation des incertitudes à 5%, à partir d'une incertitude estimée de 3,5% dans l'obtention des surfaces des bassins versants (Cf. § 1.2.2.4).

La qualité de l'indicateur est évaluée selon les mêmes principes que précédemment et est synthétisée au Tableau 1.11.

Tableau 1.11 – Evaluation de l'indicateur contribuer à la recharge des nappes - critère tout à fait satisfait
(+++): critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++

1.2.4 Préserver les ressources naturelles

1.2.4.1 Considérations

L'évaluation de la consommation de ressources naturelles dans les systèmes d'infiltration est une approche nouvelle, mais tout à fait pertinente. Nous avons décidé de l'évaluer par le biais d'un inventaire des matières et énergies consommées pour la construction et la gestion de ces systèmes. Un bilan des entrants dans les systèmes est effectué.

La performance « préserver les ressources naturelles » est d'autant meilleure que la quantité de matières et d'énergie utilisée par la construction et pour la gestion des systèmes est faible.

1.2.4.2 Définition retenue

Limites de l'étude

Pour prendre en compte cet indicateur, une première analyse préliminaire du cycle vie des différents ouvrages nous a conduit aux simplifications suivantes :

- La phase de fin de vie de l'ouvrage n'est pas considérée car actuellement il n'existe pas de démolition en fin de vie, l'ouvrage est généralement réaménagé.
- En ce qui concerne les matériaux consommés pour la construction des ouvrages, les matières premières utilisées ne sont pas considérées comme ressources épuisables.
- Ainsi cet inventaire peut se ramener à un bilan de l'énergie primaire consommée pour la fabrication des matériaux (à l'exception des géosynthétiques qui consomment également de la matière première pétrole), (énergie intrinsèque) et pour les différents travaux (excavation, transport, etc.).
- Étant donnée que cet inventaire est centré sur la consommation énergétique, il devient inutile de détailler les rejets sortants (effet de serre, eutrophisation, etc.) car ces rejets sont directement proportionnels à la consommation énergétique et pour chaque ouvrage car le choix de l'énergie utilisée n'est pas possible.

Nous proposons de traduire la consommation énergétique primaire dans une unité facilement appréhendable par toute personne non experte : l'équivalent habitant. Le calcul de l'équivalent habitant nécessite au préalable que l'ensemble des consommations énergétiques soit converti dans une unité commune qui est la tonne d'équivalent pétrole (tep). Ensuite, il est possible de normaliser les consommations en les divisant par la consommation moyenne annuelle par habitant. Nous détaillons ci-dessous les hypothèses énergétiques nécessaires aux calculs.

La durée de vie du système est estimée à 15 ans, ce qui correspond à une période moyenne entre deux réfections importantes du système.

Hypothèses énergétiques

Le tableau 15 ci-dessous présente les équivalences entre les différentes énergies, exprimées en tonne équivalent pétrole.

Tableau 1.12 - Equivalences entre les énergies et la tonne équivalent pétrole (DGEMP, 2002)

	tonne équivalent pétrole (tep)
Gazole (t)	0,952
Electricité d'origine nucléaire (MWh)	0,260
Electricité d'origine de gaz naturel (MWh)	0,077
Electricité d'origine pétrolière (MWh)	1,000
Electricité d'autres origines (MWh)	0,086

Concernant l'énergie électrique, elle est produite à partir de différentes énergies, c'est ce que l'on appelle le mix électrique. Nos valeurs sont basées sur le mix électrique de la France en 2004 (DGEMP, 2007), Figure 1.2 ci-dessous.

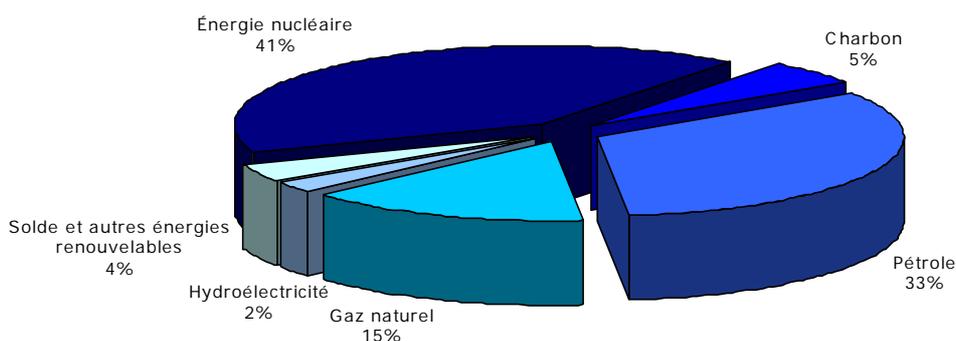


Figure 1.2 - Le Mix énergétique de la France en 2004 (DGEMP, 2007)

Le Tableau 1.13 ci-dessous détail l'énergie primaire intrinsèque associée à chaque matériau et exprimée en équivalent pétrole :

Tableau 1.13 - Equivalences entre les matériaux et la tonne équivalent pétrole (¹Jansen *et al.*, 1990 dans <<http://home.scarlet.be/chlorophiles/Fr/PVCLCA.Fr.html>>. ; ²Ballant, 2007)

	tonne équivalent pétrole (tep)
Géosynthétique en PVC (m ³)	0,860 ¹
Béton armé (m ³)	0,159 ²
Enrobé (m ³)	0,167 ²
Conduite en acier (m ³)	4,900 ²
Conduite en grès (m ³)	0,275 ²
Conduite en PVC (m ³)	5,159 ²
Conduite en béton armé (m ³)	0,159 ²

Concernant le calcul de l'équivalent habitant, la consommation énergétique française a été évaluée en 2004 (DGEMP, 2007) à 4,4 tep/habitant. Ainsi, 1 tep est équivalente à 0,227 équivalent habitant. Ce ratio de conversion est basé sur l'année 2004 car ce sont les chiffres fiables les plus récents que nous avons pu obtenir (et de plus on considère que ce ratio varie peu d'une année sur l'autre).

Évaluation de la phase de construction des systèmes

Pour l'estimation de la quantité de ressources naturelles utilisées pour la construction des systèmes d'infiltration les opérations suivantes vont être considérées :

- L'excavation ;
- Le transport des matériaux excavés ;
- Le transport des matériaux de remplissage ;
- L'énergie et la consommation de pétrole pour la fabrication des géosynthétiques ;
- L'énergie pour la fabrication du béton.

Les travaux et les matériaux à utiliser vont dépendre fortement du type d'ouvrage. Par exemple, pour une noue seuls l'excavation et le transport des matériaux excavés seront à considérer, tandis que pour un bassin, l'excavation, le transport, le géosynthétique (s'il y en a) seront à prendre en considération. Le Tableau 1.14 indique quels sont les travaux et les matériaux potentiellement utilisés pour chaque type de structure.

Tableau 1.14 - Travaux et matériaux considérés pour chaque type de structure (✓) et travaux et matériaux qui peuvent être considérés pour chaque type de structure (☑)

	Bassin rétention	Bassin infiltration	Chaussée	Puits	Tranchée	Fossé ou noue	Canalisation
Excavation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Transport matériau excavé	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Transport matériau remplissage	☑	☑	✓	☑	✓		✓
Géosynthétique	☑	☑	☑	☑	✓		
Béton	☑			☑			
Enrobé	☑						
Conduite	☑	☑	☑	☑	☑	☑	✓
Pompe	☑						
Curage	✓	✓	☑	☑	☑	✓	✓

La durée de vie du système est estimée à 15 ans, ce qui correspond à une période moyenne entre deux réfections importantes du système.

Le cas des chaussées est particulier, nous considérons seulement la différence d'entrants entre la construction d'une chaussée d'infiltration et une chaussée classique, car nous considérons que la chaussée sera construite quelle que soit la solution d'aménagement étudiée.

Les hypothèses pour l'excavation sont l'utilisation d'une pelle hydraulique de 10 t avec moteur de 60kW. Sa consommation moyenne de combustible est donnée par le fabricant et s'élève à 9 L /h, avec une capacité d'excavation de 48 m³/heure (avec une pelle de capacité de 240 L). Si on considère que l'excavation sera faite avec d'autres machines la variation de la consommation de combustible par mètre cube excavé sera de + ou - 2%. Ces données ont été obtenues directement avec les fabricants des équipements de chantier.

Le transport sera effectué en camion (capacité de 5 m³), la consommation en carburant est de 50 L pour 100 km ; les fourchettes de valeurs de consommation de combustible des poids lourds vont de 37,69 L/100km à 47,7 L/100km (PACT, 2003 et ICE & GREEN, 2003). Pour le matériau excavé, le facteur de foisonnement considéré est de 30%.

Les géosynthétiques peuvent être fabriqués à partir de divers types de plastiques, nous avons pris comme référence les consommations énergétiques et en pétrole pour la fabrication des géosynthétiques en PVC, car ces sont les plus « gourmands » en énergie au mètre carré. Le géosynthétique peut apparaître dans différentes parties du système : dans le fond des bassins d'infiltration (géotextile), sur les berges des bassins de rétention (géomembrane), les chaussées ont également des géosynthétiques (géotextile) au dessous et au dessus de la structure réservoir, les puits sont entourés par un

géosynthétique (géotextile) et les tranchées ont des géosynthétiques (géotextile) autour de la structure réservoir.

Le Tableau 1.15 présente les consommations énergétiques unitaires pour chaque type de travaux et de matériaux, pour la phase de construction des systèmes, exprimés en équivalent habitants fois 100 000.

Tableau 1.15 – Consommations énergétiques pour travaux ou matériaux (en France)

Travaux/matériau	unité	équivalent habitants x 100 000
Excavation	m ³	0,27
Transport des matériaux excavés	m ³ excavé/km	0,36
Géosynthétiques	m ²	64,58
Béton	m ³	238,74
Transport des matériaux de remplissage	m ³ /km	0,28
Conduite en grès	m ³	412,91
Conduite en PVC	m ³	7 746,25
Conduite en béton armée	m ³	238,74
Conduite en acier	m ³	7 357,36

Evaluation de la phase de fonctionnement des systèmes

Pour l'estimation de la quantité de ressources naturelles utilisées pour la gestion et la maintenance des systèmes d'infiltration les opérations suivantes vont être considérées :

- Le transport des matériaux curés lors de la maintenance des bassins ;
- La consommation en énergie électrique par les pompes ou d'autres équipements électriques qui peuvent faire partie des systèmes.

Les opérations de maintenance concernent uniquement les bassins, car la maintenance des autres systèmes est répartie et beaucoup moins importante, et par conséquent, elle est beaucoup plus difficile à estimer.

Pour le transport des matériaux curés, étant donné la mauvaise connaissance du volume curé annuellement par bassin et l'impossibilité de l'estimer avec une bonne précision, nous n'allons considérer seulement que la distance de transport d'un camion qui vient récupérer les matériaux curés et les déposer sur le site de traitement. Pour les bassins de rétention nous savons qu'un camion suffit largement au transport des sédiments curés. La consommation en carburant des machines de curage est négligeable par rapport à la consommation de carburant pour le transport. Cette dernière est estimée à 50L/100 km.

Pour les pompes, la consommation énergétique va dépendre de leur puissance et de leur temps de fonctionnement par an.

Le Tableau 1.16 présente les consommations énergétiques unitaires pour le transport et les pompes, pour la phase de fonctionnement des systèmes, exprimés en équivalent habitants fois 100 000.

Tableau 1.16 – Consommations énergétiques (en France)

Type de consommation	unité	équivalent habitants x 100 000
Pompes	kW/h	10,31
Transport matériau curé	m ³ /km	22,07

Evaluation de l'indicateur de préservation des ressources

L'indicateur représente l'équivalent habitant (multiplié par 100 000) en énergie pour la construction et l'utilisation des ouvrages. Il est divisé en quatre sous indicateurs, un premier pour l'excavation des matériaux pendant la construction des ouvrages, un deuxième pour les matériaux consommés pour la construction, un troisième pour le transport et un quatrième pour la consommation en énergie nécessaire au fonctionnement et à la maintenance des ouvrages.

Sous indicateur de ressources naturelles relatif à l'excavation

$$I_{RNexc} = 0,27 \times V_{exc} \quad (\text{Adimensionnel, Préférence décroissante, } [0, +\infty[) \quad (\text{Équation 1.15})$$

Avec :

V_{exc} : Volume d'excavation pour l'implantation du système, en m³

Sous indicateur de ressources naturelles relatif aux matériaux

$$I_{RNmat} = 64,58 \times S_{géo} + 238,74 \times V_{bet} + 250,75 \times V_{enr} + q_i \times V_{cond}$$

(Adimensionnel, Préférence décroissante, $[0, + \infty [$)

(Équation 1.16)

Avec :

$S_{\text{géo}}$: Quantité de géosynthétique utilisée dans la construction du système, en m^2

V_{bet} : Volume de béton utilisé pour la construction du système, en m^3

V_{enr} : Volume d'enrobé utilisé pour la construction du système, en m^3

q_i : Coefficient dépendant du type de matériau utilisé pour les canalisations (Cf. Tableau 1.15)

V_{cond} : Volume de matériaux utilisés pour les conduites, en m^3

Sous indicateur de ressources naturelles relatif au transport

$$I_{\text{RNtransp}} = 0,36 \times V_{\text{exc}} \times D_{\text{exc}} + 0,28 \times V_{\text{mr}} \times D_{\text{mr}}$$

(Adimensionnel, Préférence décroissante, $[0, + \infty [$)

(Équation 1.17)

Avec :

V_{exci} : Volume de l'excavation pour l'implantation du système, en m^3

D_{exci} : Distance de transport pour évacuer les matériaux excavés, en km

V_{mr} : Volume de matériaux de remplissage utilisé lors de la construction, en m^3

D_{mr} : Distance de livraison des matériaux de remplissage du système, en km

Sous indicateur de ressources naturelles relatif à la maintenance

$$I_{\text{RNmain}} = 10,31 \times T_{\text{pompes}} \times P_{\text{pompes}} + 22,07 \times D_{\text{curage}}$$

(Adimensionnel, Préférence décroissante, $[0, + \infty [$)

(Équation 1.18)

Avec :

T_{pompes} : Temps de fonctionnement estimé des pompes ou d'autres équipements électriques par an, en heures

P_{pompes} : Puissance des moteurs des pompes ou d'autres équipements électriques, en kW

D_{curage} : Distance entre le bassin et le centre de traitement des sédiments curés, en km

L'indicateur est donc obtenu par la somme des quatre sous indicateurs en équivalent habitants \times 100 000.

$$IC_{RN} = IC_{RNexc} + IC_{RNmat} + IC_{RNtransp} + IC_{RNmain}$$

(en eq. habitants \times 100.000, Préférence décroissante, $]0, + \infty [$)

(Équation 1.19)

1.2.4.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Il est important de mentionner que le présent indicateur s'adapte à un contexte local. Les équivalents habitant proposés et donc les résultats des indicateurs, serviront seulement au contexte Français. A titre d'exemple pour montrer l'influence du contexte local dans le calcul de l'indicateur nous avons calculé les coefficients pour le contexte brésilien, qui a une part importante de sa production énergétique en hydraulique et où la consommation énergétique par habitant (1,1 tep/hab) est plus faible qu'en France (4,4 tep/hab). La Figure 1.3 montre le mix énergétique du Brésil pour l'année 2004 (MME, 2005) et le Tableau 1.17 montre les consommations énergétiques unitaires calculées.

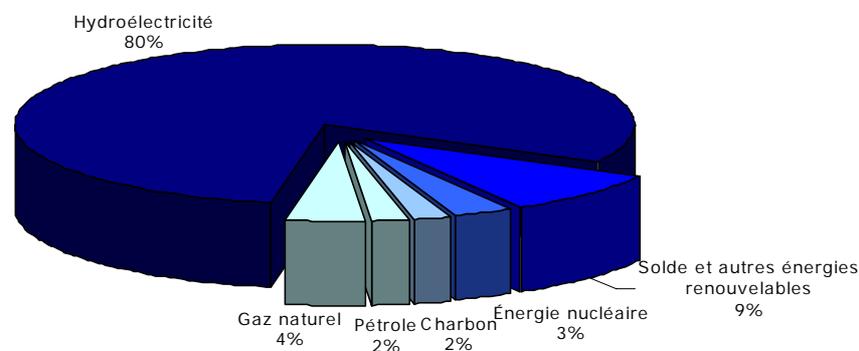


Figure 1.3 - Le Mix énergétique du Brésil en 2004 (MME, 2005)

Tableau 1.17 – Consommations énergétiques pour travaux ou matériaux (conditions brésiliennes)

Travaux/matériaux	unité	équivalent habitants x 100.000
Excavation	m ³	1,07
Transport des matériaux excavés	m ³ excavé/km	1,47
Géosynthétiques	m ²	104,23
Béton	m ³	963,64
Transport des matériaux de remplissage	m ³ /km	1,13
Conduite en grès	m ³	31.255
Conduite en PVC	m ³	586.026
Conduite en béton armée	m ³	39.068
Conduite en acier	m ³	586.026

Nous prenons comme exemple de calcul de l'indicateur de « préservation des ressources naturelles » trois alternatives d'un projet fictif. La première concerne une solution de drainage par puits, la deuxième par tranchées et la troisième par noues. Les puits sont creux et protégés par une buse de béton, entourés d'un géotextile et ont une profondeur de 3 mètres. Les tranchées sont remplies de galets et entourés d'un géotextile. Les noues sont enherbées et ne consomment aucun matériau de construction.

Les données relatives aux différentes alternatives sont montrées au Tableau 1.18.

Tableau 1.18 – Éléments pour le calcul de l'indicateur de préservation des ressources naturelles

Opérations	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
	12 puits	2 tranchées	3 noues (100 mètres linéaires)
Excavation (m ³)	37,68	140	10
Béton (m ³)	9,05	-	-
Géotextile (m ²)	151	366	-
Distance de transport matériau excavé (km)	10	10	10
Distance de transport matériau de remplissage (km)	-	2	-

Les résultats du calcul de l'indicateur de préservation des ressources naturelles sont présentés dans le Tableau 1.19. Nous pouvons observer que les alternatives qui utilisent beaucoup de matériaux sont celles qui consomment plus de ressources. La différence importante entre la consommation de ressources des puits et des tranchées est due à la quantité plus importante de géotextile nécessaire pour les tranchées.

Tableau 1.19 - Résultats du calcul de l'indicateur de préservation des ressources naturelles

	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
	12 puits	2 tranchées	3 noues (100 mètres linéaires)
IC _{RNexc}	10,1	37,8	2,7
IC _{RNmat}	11 901,3	23 636,2	-
IC _{RNtransp}	156,7	582,4	41,6
IC _{RN} (eq. habitants × 100 000)	12 068	24 256	44

1.2.4.4 Qualité de l'indicateur

Les incertitudes de l'indicateur de ressources naturelles apparaissent dans chaque élément de sa définition. Les rapports tep/énergie ou tep/matériau possèdent des incertitudes, probablement très importantes, mais qui nous sont inconnues. Le volume excavé, le volume de béton et le volume de matériau de remplissage à transporter ont des incertitudes de l'ordre de 10% selon l'opinion des professionnels interviewés. L'incertitude de la quantité de géosynthétique est estimée en 10% en raison des pertes et des raccordements. L'incertitude de la distance de transport des matériaux excavés est variable selon la zone à aménager. Il peut y avoir de cas où cette distance est bien connue car l'endroit est identifié mais au moment de la conception l'endroit n'est pas toujours connu.

L'incertitude totale de l'indicateur a été estimée par la loi de propagation des incertitudes, prenant pour hypothèse que les distances et les volumes excavés sont indépendants, et doit être calculé à chaque fois par :

$$u(IC_{RN}) = \sqrt{611,67 + 0,0013D_{exc}^2 + 0,13V_{exc}^2 u(D_{exc})^2 + 0,008D_{exc}^2 + 0,13V_{exc}^2 u(D_{exc})^2} \quad (\text{Équation 1.20})$$

Avec :

$u(IC_{RN})$: Incertitude associé à l'indicateur de ressources naturelles

D_{exc} : Distance de transport pour évacuer les matériaux excavés, en km

V_{exc} : Volume de l'excavation pour l'implantation du système, en m³

$u(D_{exc})$: Incertitude dans la distance de transport pour évacuer les matériaux curés, en km

V_{mr} : Volume de matériel de remplissage utilisé dans la construction du système, en m^3

D_{mr} : Distance parcourue pour apporter les matériaux de remplissage du système, en km

$u(D_{mr})$: Incertitude dans la distance parcourue pour apporter les matériaux de remplissage du système, en km

L'indicateur de ressources naturelles a été évalué selon les critères de Labouze & Labouze (1995), Cf. Tableau 1.20.

Tableau 1.20 – Evaluation de l'indicateur préserver les ressources naturelles - critère tout à fait satisfait (+++): critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	+++	++	++	++	+++	+++

Les problèmes présentés par l'indicateur sont sa fidélité, son objectivité et sa précision. L'indicateur présente des variations importantes selon le contexte local où il est utilisé et l'évaluation des quantités de matériaux est incertaine.

1.2.5 Etre maintenable facilement

1.2.5.1 Considérations

Cette performance a pour but d'estimer la facilité d'entretien d'un système d'infiltration. La facilité d'entretien est très variable selon le gestionnaire du système, à cause de la formation du personnel dont il dispose, des matériels disponibles, etc.

Un système est maintenable facilement si les tâches de maintenance peuvent être effectués par le gestionnaire sans contraintes importantes.

1.2.5.2 Définition retenue

Après ces tentatives, la conclusion est que cette performance est très variable par rapport au type de gestionnaire. Une grande collectivité dispose de personnel et d'équipements, ce dont une petite collectivité ne dispose pas. Nous avons décidé de créer un indicateur qui laisse le décideur plus libre de juger la difficulté d'entretien de chaque type d'ouvrage et qui par conséquent prend en compte les spécificités de chaque gestionnaire.

La proposition consiste à donner une note à chaque type de système d'infiltration par rapport à leur facilité d'entretien. Pour l'obtention de cette note particulière à l'opération traitée. Le gestionnaire doit classer les différents systèmes par ordre de difficulté d'entretien, selon les équipements et personnels dont il dispose. Les notes sont attribuées par la méthode de classement simple (Pomerol & Barba-Romero, 1993), déjà présentée au § 1.2.5.3. Afin d'aider le gestionnaire dans le classement des systèmes, un tableau avec les tâches et fréquence d'entretien par type de système est présenté a été établi (Cf. § 1.2.5.3.)

1.2.5.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

La performance « Etre maintenable facilement » est évaluée par un seul indicateur (IC_{MAIN}) : une note pour la difficulté d'entretien d'un système d'infiltration. Les notes, doivent être données par le gestionnaire, au cas par cas, nous donnons une méthodologie pour guider l'attribution de ses notes (indicateur ordinal) basée sur le classement simple (Pomerol & Barba-Romero, 1993).

Le gestionnaire / décideur doit ordonner les systèmes utilisés dans les alternatives d'aménagement à évaluer par rapport à ses difficultés d'entretien, du plus au moins contraignant. En sachant qu'il peut y avoir des systèmes qui sont aussi contraignants et qui, par conséquent, vont avoir la même classification et que le gestionnaire peut utiliser des cartes blanches pour mettre en évidence une grande différence entre les degrés de contrainte des deux systèmes. Le Tableau 1.21 présente les tâches et fréquences d'entretien par type de technique ; il peut servir à orienter le gestionnaire au moment de l'ordination des systèmes.

Le système le moins contraignant reçoit la note 1 et les autres systèmes reçoivent des notes supérieures à 1 en fonction de leurs contraintes d'entretien.

Tableau 1.21 - Types de systèmes et tâches d'entretien

Bassins secs avec revêtement planté

Curage du bassin, pour le cas des bassins de rétention, périodiquement. Entretien des espaces verts, tous les 6 mois. Nettoyage des ouvrages de prétraitement : curage des dessableurs une fois par an, nettoyage des régulateurs de débit une fois par an, enlèvement des flottants des séparateurs à hydrocarbures deux fois par an et nettoyage complet une fois par an. Dans le cas des bassins d'infiltration, remplacement de la couche de surface tous les 15 ans.

Bassins secs avec revêtement minéral

Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté. Grattage de la surface (pour les bassins sans géotextile) une fois par an. Désherbage, du fond et des berges du bassin, une fois par an. Remplacement de la couche de surface tous les 15 ans.

Bassins secs avec revêtement étanche (pour les bassins de rétention en amont des bassins d'infiltration)

Curage du bassin une fois par an. Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté. Changement du revêtement selon la nécessité.

Bassin en eau avec berges plantées

Entretien des espaces verts, tous les 6 mois. Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté.

Bassin en eau avec berges minérales

Désherbage des berges du bassin une fois par an. Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté.

Bassin enterré

Curage du bassin une fois par an. Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté.

Chaussées avec enrobé drainant

Nettoyage des dispositifs (orifices, paniers, dispositifs d'épuration,...), curage des regards et des avaloirs, assez fréquemment, mais très variables selon la région (Azzout *et al.*, 1994); en moyenne tous les 6 mois (MEE, 1994). Hydrocurage avec aspiration une fois par an. Comme entretien curatif, fraisage de la surface avec thermo recyclage de l'enrobé, dès que la surface est colmatée.

Chaussées avec enrobé étanche

Nettoyage des dispositifs (orifices, paniers, dispositifs d'épuration,...), curage des regards et des avaloirs, tous les 6 mois (MEE, 1994).

Fossés et noues sans cloisons

Nettoyage des dispositifs annexes : regard de décantation, déshuileurs, tous les 6 mois (UPRCT, 2004). Entretien des espaces verts, avec arrosage pendant les périodes sèches. Remplacement de la couche de terre végétale colmatée, comme entretien curatif, quand le système présente de problèmes de dysfonctionnement (Azzout *et al.*, 1994).

Fossés et Noues avec cloisons

Nettoyage des dispositifs annexes, nettoyage des orifices, tous les 6 mois (UPRCT, 2004). Entretien des espaces verts, avec arrosage pendant les périodes sèches. Remplacement de la couche de terre végétale colmatée, comme entretien curatif, quand le système présente de problèmes de dysfonctionnement (Azzout *et al.*, 1994).

Puits avec revêtement planté

Nettoyage des dispositifs annexes : regard de décantation, déshuileurs, tous les mois (Azzout *et al.*, 1994). Entretien des espaces verts tous les mois. Curage ou pompage curatifs tous les 5 ans (Azzout *et al.*, 1994).

Puits avec revêtement minéral

Nettoyage des dispositifs annexes : regard de décantation, déshuileurs, tous les mois (Azzout *et al.*, 1994). Curage ou pompage curatifs tous les 5 ans (Azzout *et al.*, 1994).

Puits avec revêtement étanche

Nettoyage des dispositifs annexes : regard de décantation, déshuileurs, chaque mois (Azzout *et al.*, 1994). Curage ou pompage curatifs tous les 5 ans (Azzout *et al.*, 1994).

Tranchées avec revêtement planté

Nettoyage des dispositifs annexes : regards, paniers, décanteurs, déshuileurs, chaque mois. Entretien des espaces verts, chaque mois.

Tranchées avec revêtement minéral

Nettoyage des dispositifs annexes : regards, paniers, décanteurs, déshuileurs, chaque mois.

Tranchées avec revêtement étanche

Nettoyage des dispositifs annexes : regards, paniers, décanteurs, déshuileurs, chaque mois.

Par exemple supposons que sur une zone à aménager cinq alternatives différentes de projet soient conçues (Cf. Tableau 1.22).

Tableau 1.22 – Alternatives de projet d'aménagement d'une zone fictive

Alternatives	Système doté de :
Alternative 1	Un bassin de rétention et un bassin d'infiltration
Alternative 2	Des tranchées et puits
Alternative 3	Seulement des puits
Alternative 4	Chaussées drainantes d'infiltration
Alternative 5	Des tranchées et des noues

Si l'on suppose encore que le système sera maintenu par une petite collectivité qui ne dispose pas d'équipements spécifiques pour l'entretien, on va demander au gestionnaire de classer par ordre de contrainte du plus au moins contraignant, supposons que son classement soit celui de la Figure 1.4.

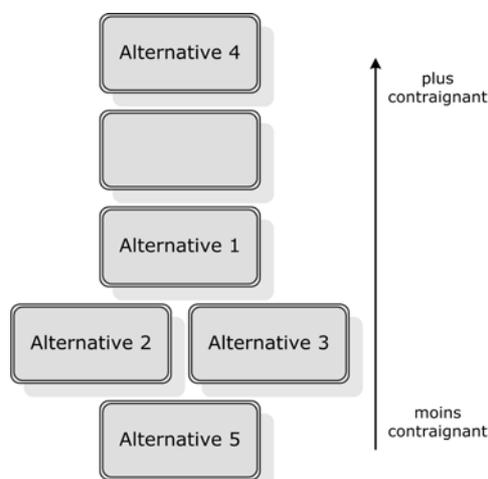


Figure 1.4 – Classement des alternatives de projet selon leurs contraintes de maintenance

L'alternative la moins contraignante reçoit la note 1, les alternatives 2 et 3 présentent un même niveau de contrainte, elles recevront la même note (2) et ainsi de suite (Cf. Tableau 1.23).

Tableau 1.23 – Notes obtenues pour l'indicateur de maintenance du exemple

Alternatives	Note
Alternative 1	3
Alternative 2	2
Alternative 3	2
Alternative 4	5
Alternative 5	1

1.2.5.4 Qualité de l'indicateur

L'incertitude estimée par l'indicateur est de 1. Il a été considéré qu'une personne peut hésiter dans un classement entre, au maximum, deux rangs successifs.

Le Tableau 1.24 récapitule les jugements pour chaque critère de qualité.

Tableau 1.24 – Evaluation de l'indicateur de maintenance - critère tout à fait satisfait (+++) : critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
++	+++	+++	+	+++	+++	+++

L'indicateur n'est pas très objectif, son évaluation va dépendre de l'évaluateur.

1.2.6 Garantir la sécurité des usagers/personnels

1.2.6.1 Considérations

La performance « Garantir la santé et sécurité des usagers / personnels » vise à évaluer un système par rapport à ses effets sur la santé et la sécurité des personnes qui fréquentent ces ouvrages ou qui interviennent sur ces ouvrages.

La santé et sécurité des personnes liées aux ouvrages d'infiltration sont très souvent négligées, cependant nous devons nous poser la question des risques d'accidents liés à ces systèmes. Les risques d'accidents sont principalement liés à leur structure.

Le danger concerne :

- le type de systèmes : une tranchée est moins dangereuse pour toutes les activités qu'une noue, qui elle-même est moins dangereuse qu'un bassin par exemple ;
- la conception même des systèmes : un bassin profond aux berges escarpées est plus dangereux qu'un bassin de faible profondeur dont l'évacuation a été « travaillée » (escaliers, rampes, ...).

1.2.6.2 Définition retenue

Pour cet indicateur, nous avons identifié, avec l'aide du groupe d'experts, diverses typologies et arrangements des systèmes. La Figure 1.5 récapitule ces différentes configurations qui peuvent avoir un impact potentiel sur la sécurité. Nous avons ensuite affecté à ces différentes configurations des notes attribuées par expertise. Le mode d'attribution des notes ainsi que les notes sont donnés au § 1.2.6.3.

La typologie des systèmes est basée sur :

- les principaux types de techniques : les fossés ou noues, les tranchées ou structures réservoirs d'infiltration et les bassins. Les tranchées, les puits et les structures réservoirs d'infiltration, comme les chaussées par exemple, ne sont souvent pas connus des usagers, sont comblés et présentent par conséquent un risque moindre par rapport à un bassin ouvert.
- les modes d'accès potentiels à ces techniques (ouvert ou non au public, difficile ou non d'accès, ...)
- les modes de sécurisation prévus notamment pour les bassins : présence de signalétique permettant d'informer le public de la possible montée des

eaux. L'absence de signalisation peut être plus ou moins problématique suivant la localisation des bassins. Si le bassin se trouve dans une zone facilement accessible aux personnes le risque va être plus important que si le bassin est en zone difficilement accessible. Par contre si le bassin est visible il y aura également possibilité de repérer plus facilement un possible accident et d'intervenir plus rapidement que si le bassin est complètement isolé.

- Sécurité de l'ouvrage lui-même :
- facilité d'évacuation de l'ouvrage : faibles pentes (la littérature grise issue de l'expérience des collectivités donne un maximum de 1 : 3 ou 1 : 4 lorsque l'ouvrage est en eau permanente),
- présence d'escaliers ou de rampes permettant d'évacuer facilement le bassin en cas d'arrivée d'eau, indications claires de chemins de sortie bien sécurisés,
- présence de dispositifs de sécurité autour des bassins ayant de fortes profondeurs (barrières de protection),
- dispositifs de protection des entrées d'eau et de sortie (grille empêchant l'intrusion dans les réseaux d'alimentation ou de sortie par exemple, protection des organes de régulation, entrée d'eau répartie réduisant les vitesses d'arrivée d'eau).

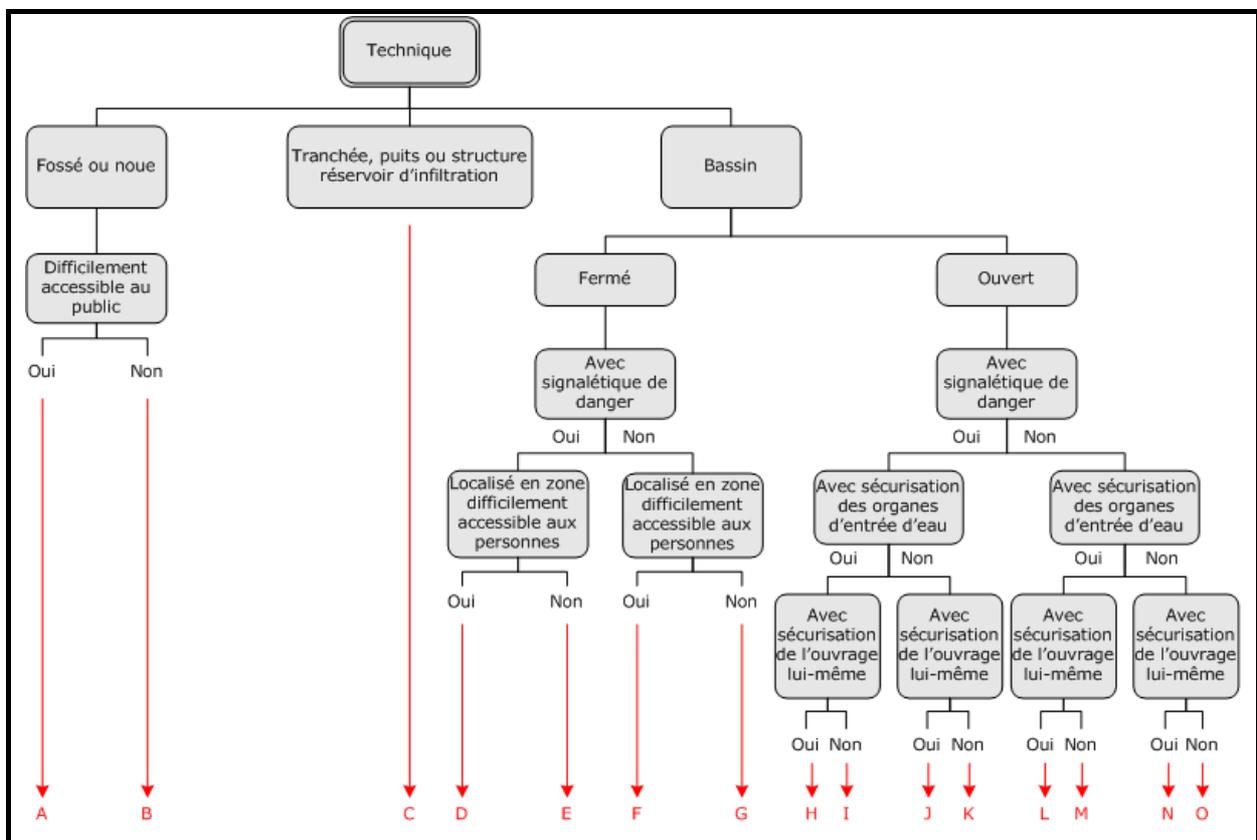


Figure 1.5 - Typologies des ouvrages et dispositifs annexes

1.2.6.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Pour définir les notes correspondant à la typologie des systèmes que nous avons établi précédemment nous avons utilisé méthode de classement simple (Pomerol & Barba-Romero, 1993), dont le principe a déjà été présenté au § 1.2.5.3. Cette méthode consiste à utiliser des cartes avec chaque typologie d'ouvrage et classer les types d'ouvrages du plus sûr au moins sûr. La méthode prévoit le recours aux cartes blanches permettant d'exprimer une différence importante entre deux systèmes et la possibilité de types ex-æquos. Nous avons fait cette classification avec un groupe d'experts composé de trois chercheurs, deux représentants de bureaux d'études et un représentant du Grand Lyon. La Figure 1.6 montre un exemple de classement réalisé.

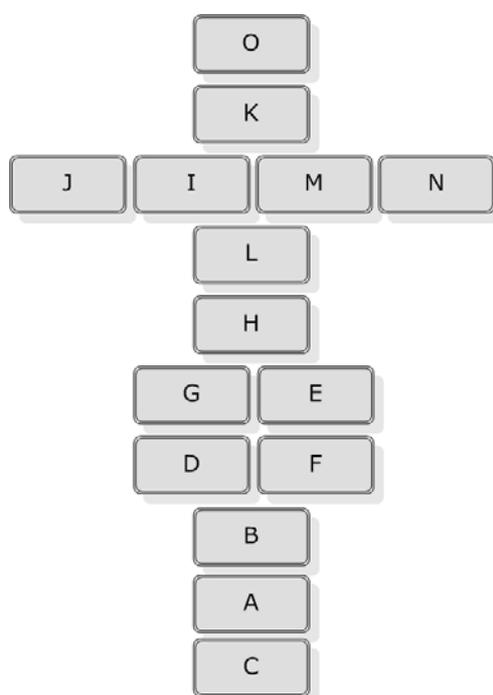


Figure 1.6 – Exemple de classement fait par un expert

Nous pouvons voir, Figure 1.7, les notes calculées pour chaque expert. Il y a des écarts importants, toutefois, la majorité des notes suivent une même tendance. Ultérieurement, nous utiliserons la moyenne des notes obtenues pour notre indicateur (Tableau 1.25). Cependant pour une étude particulière, cette méthode ordinale peut être appliquée simplement avec les solutions à comparer.

Cet exercice nous a paru intéressant car il permet de faire remonter des réflexions sur les systèmes eux-mêmes et constitue un excellent support de discussion entre partenaires. Les perceptions du risque sont en effet parfois assez différentes et l'explication de chacun sur le classement qu'il fournit permet d'y voir plus clair. Par exemple dans l'exercice que nous avons mené, certains partenaires considéraient qu'à partir du moment où un ouvrage était clos, la sécurité était assurée alors que d'autres pensaient au contraire que l'accès au public constituait une solution plus sûre car les accidents y étaient plus facilement repérables. Les résultats de la Figure 1.7 sont les résultats bruts quasiment

avant discussions, nous pensons même que sur une étude particulière, cet exercice aurait probablement conduit à un consensus après discussion et aurait eu le mérite de préciser les arguments.

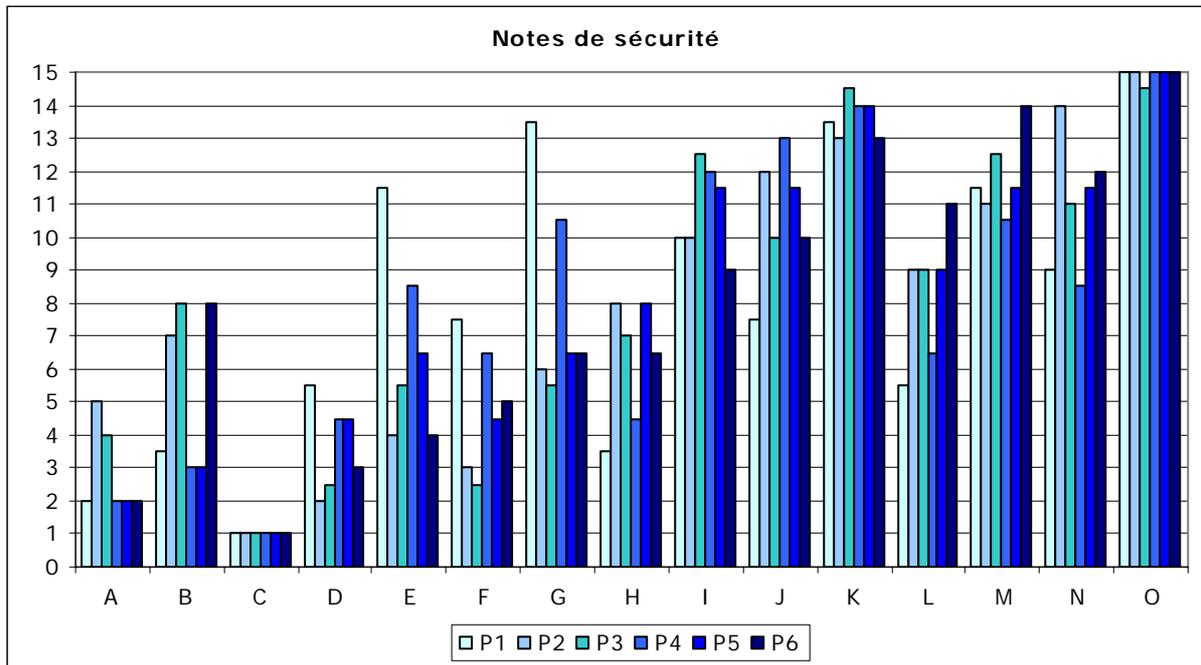


Figure 1.7 – Notes de sécurité par expert

Tableau 1.25 – Moyennes et écarts types des notes de sécurité par type d'ouvrage

Types d'ouvrage	Note	Ecart type	Coefficient de variation (%)
A	2,8	1,3	46,9
B	5,4	2,5	46,1
C	1,0	0,0	0,0
D	3,7	1,4	37,3
E	6,7	2,9	43,6
F	4,8	1,9	40,2
G	8,1	3,2	39,6
H	6,3	1,9	29,8
I	10,8	1,4	12,6
J	10,7	1,9	18,2
K	13,7	0,6	4,4

L	8,3	2,0	23,9
M	11,8	1,3	10,6
N	11,0	2,0	18,4
O	14,9	0,2	1,4

1.2.6.4 Qualité de l'indicateur

L'incertitude dans l'indicateur de santé et sécurité des usagers et personnels a été considéré comme l'écart moyen des notes obtenues par la consultation aux experts. L'incertitude vaut alors 1,6.

Par rapport aux critères de qualité de Labouze & Labouze (1995) l'indicateur de sécurité des usagers et personnels ne présente pas de défaillance majeure. Le Tableau 1.26 montre les critères et le jugement de l'indicateur.

Si l'on prend stricto-sensu les évaluations des systèmes par notre groupe de travail et si on les utilise pour d'autres études, les variations relatives sont en moyenne de 25%. L'erreur moyenne commise sur la notation est de 1,6 (valeur qui nous servira dans l'analyse multicritère).

Tableau 1.26 – Evaluation de l'indicateur de sécurité des usagers et personnels - critère tout à fait satisfait (+++) : critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	+++	+++	++	++	+++	+++

L'objectivité et la précision de l'indicateur proposé ne sont pas tout à fait satisfaites, cela est dû à la méthode d'élaboration de l'indicateur lui-même : les notes proposées n'étant pas très précises et pouvant varier selon le contexte et selon le jugement de l'expert.

1.2.7 Produire des déchets facilement gérables

1.2.7.1 Considérations

Cette performance vise à évaluer la facilité de gestion des déchets produits par des ouvrages d'infiltration. Dû à un manque de connaissance en ce qui concerne ces déchets, et en première approche la présente performance va être évalué par le biais de la quantité de déchets qui seront produits par les systèmes d'infiltration.

Les modèles d'estimation des quantités de solides (notamment des MES) apportés par les bassins versants nous donnent des pistes pour la proposition d'un indicateur. Ces modèles sont basés sur le lessivage des surfaces urbaines par l'eau de pluie (Chocat, 1997). Les eaux de ruissellement provoquent l'arrachement et l'entraînement des particules accumulées sur la surface des bassins versants. Plusieurs études statistiques ou synthèse d'études (Servat, 1984 ; Philippe & Ranchet, 1987 *apud* Chocat, 1997 ; Saget, 1994) ont mis en évidence les principaux facteurs qui peuvent expliquer la masse des matières en suspension produite par un bassin versant. Il s'agit de l'intensité de la pluie, le volume total ruisselé et la masse de polluants déposé sur le bassin versant. Le travail de Saget (1994), plus particulièrement, met en évidence une corrélation non linéaire entre la surface active des bassins versants avec les masses en matières en suspension à l'exutoire. Cependant, aucune corrélation généralisable n'a pu être identifiée et les modèles d'apports de solides sont encore, quant à eux, peu consistants.

Si bien que la seule règle générale que l'on puisse tirer est relativement pauvre et consiste à dire que moins il y a de phénomènes de lessivage des bassins versants, moindre est la quantité de sédiments apportés aux ouvrages d'assainissement. Cette performance sera d'autant meilleure que le volume de déchets générés est faible.

1.2.7.2 Définition retenue

$$IC_{DEC} = \frac{\sum Sa_i}{n} \quad (\text{en m}^2, \text{Préférence décroissante, }]0, +\infty[) \quad (\text{Équation 1.21})$$

Avec :

Sa_i : surface active de l'ouvrage i , en m^2

n : nombre total d'ouvrages dans la zone à aménager

1.2.7.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

L'indicateur est facilement calculable même s'il ne reflète pas précisément les quantités réelles de déchets produits. Les données des surfaces actives pour chaque ouvrage sont les seules données nécessaires au calcul.

Un exemple numérique est donné pour le calcul de cet indicateur. Il concerne trois alternatives d'aménagement. Un aménagement drainé par des puits, un autre drainé par des tranchées et un troisième drainé par des noues. Les données relatives à chacune des alternatives d'aménagement sont présentées dans le Tableau 1.27, ainsi que les résultats obtenus.

Tableau 1.27 – Données et résultats du calcul de l'indicateur « produire des déchets facilement gérables »

	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3		
	12 Puits	2 Tranchées	Noue1	Noue 2	Noue 3
Surface active total du bassin versant	1 200	1 000	385	275	550
Nombre total d'ouvrages	12	2		3	
IC _{DEC}	100	500		403	

Nous pouvons noter à partir de l'application de l'indicateur « produire des déchets facilement gérables » que l'alternative que draine plus proche à la source est préférable.

1.2.7.4 Qualité de l'indicateur

L'incertitude considérée pour le présent indicateur est celle de l'estimation des surfaces actives, c'est-à-dire de 2,5% (selon explicité dans le §1.2.2.4).

L'indicateur pour la performance « produire des déchets facilement gérables » a été lui aussi évalué selon les critères de Labouze & Labouze (1995), la qualité est donnée au Tableau 1.28.

Tableau 1.28 – Evaluation de l'indicateur de déchets solides - critère tout à fait satisfait (+++) : critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+	+++	+++	+++	++	+++	+++

1.2.8 Avoir un coût peu élevé

1.2.8.1 Considérations

La performance « avoir un coût peu élevé » vise l'évaluation des coûts d'implantation et de maintenance et gestion d'un aménagement ou d'un ouvrage.

Les coûts utilisés sont des coûts estimatifs d'implantation et de maintenance des systèmes. Nous savons que ces estimations ne sont pas toujours justes, particulièrement en ce qui concerne les coûts de gestion et maintenance. Ces coûts peuvent être trouvés dans la bibliographie, mais ils présentent des plages d'incertitude très étendues. On se basera tout de même sur ces données, faute de mieux.

La performance économique est d'autant meilleure que le système présente un coût d'investissement, d'études préalables et de maintenance prévisionnelle peu élevés. Les coûts sont actualisés.

1.2.8.2 Définition retenue

La définition retenue pour l'indicateur « Avoir un coût peu élevé » considère deux indicateurs, le premier par rapport aux coûts estimés pour la construction du système et le second par rapport aux coût d'entretien des systèmes.

$$IC_{\text{COUT1}} = C_i + C_e \quad (\text{en } \text{€}, \text{Préférence décroissante},]0, +\infty[) \quad (\text{Équation 1.22})$$

Avec :

C_i : coût d'investissement (incluant les coûts fonciers), en euros

C_e : coût des études préalables, en euros

$$IC_{\text{COUT2}} = \text{VAN}(C_m) \quad (\text{en } \text{€}, \text{Préférence décroissante},]0, +\infty[) \quad (\text{Équation 1.23})$$

Avec :

$\text{VAN}(C_m)$: valeur actuelle nette des coûts totaux de maintenance des ouvrages de l'aménagement, pendant la période d'analyse, en euros

1.2.8.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Les coûts d'implantation sont estimés par les concepteurs du système avec une certaine fiabilité, par contre, les coûts de maintenance sont plus difficiles à estimer. Ces coûts peuvent être estimés à partir de données de la bibliographie. Nous avons conscience que ces estimations vont avoir des incertitudes très importantes, mais faute de mieux nous les utiliserons.

Le constat est qu'un effort doit être fait par les gestionnaires pour acquérir ces données dont ils sont très demandeurs. Il est sans doute temps de créer les conditions de développement de bases de données fiables concernant ces coûts.

Les coûts des études préalables sont considérés essentiellement en raison des différences de types d'études géotechniques qui doivent être faits pour l'implantation des ouvrages. Selon le type d'ouvrage les études sont plus ou moins importantes par rapport au coût d'implantation. Le Tableau 1.29 rappelle les études à mener pour l'implantation de chaque type de technique d'infiltration.

Tableau 1.29 – Liste des études effectuées *in situ*, par type de technique (Azzout, 1996)

Techniques	Etudes
Bassin d'infiltration	Perméabilité en plusieurs endroits, études géologiques, géotechniques et hydrogéologiques
Chaussée	Perméabilité superficielle et de la portance ⁽¹⁾
Fossé ou noue	Perméabilité superficielle
Puits	Perméabilité en profondeur
Tranchée	Perméabilité superficielle

⁽¹⁾ Les études de portance pour les chaussées doivent être faites de toute façon qu'elle soit chaussée réservoir ou non. Nous serons tentés, cependant, de ne pas les considérer dans l'état d'études initiales. La valeur actuelle nette est un « flux de trésorerie actualisé représentant l'enrichissement supplémentaire d'un investissement par rapport au minimum exigé par les apporteurs de capitaux » (Rousseau, 1990).

Le point critique de cette méthode concerne le choix du taux d'actualisation à appliquer. Malgré cette difficulté le VAN est un des meilleurs outils pour l'analyse de projets d'investissement. Le taux d'actualisation, selon Thuesen (1977 *apud* Cury, 2004) reflète le risque, associé à l'incertitude du retour de l'investissement et les expectatives d'inflation. Il agit en tant que protection contre les pertes possibles du pouvoir d'achat de la monnaie. Le choix du taux d'actualisation est l'élément le plus

controversé d'une analyse économique. Les taux d'actualisation typiques sont entre 6 et 12% par an, selon les conditions économiques locales (Heathcote, 1998).

Dans la bibliographie, plusieurs références de coûts peuvent être trouvées. Field *et al.* (2006) ont fait un bilan des coûts d'investissement pour l'implantation des systèmes à partir de différentes études. Les estimations qu'ils ont pu recueillir sont données sous forme d'équations issues de statistiques qui utilisent les surfaces ou volumes comme variables explicatives. Le Tableau 1.30 présente ces données à titre d'illustration. Les coûts sont en Dollars Américains avec pour date de référence décembre 2002 et ne comprennent pas les coûts fonciers. Le Tableau 1.31 donne, quant à lui, les coûts de maintenance en pourcentage par rapport au coût d'investissement.

Tableau 1.30 – Coûts d'investissement des systèmes d'infiltration, d'après Field *et al.* (2006)

Types de système	Coûts estimés (\$)	Observations	Références
Tranchées d'infiltration	$C=173V^{0,63}$ $C=5V$	C : coût estimé ; V : volume de l'ouvrage en ft ³	Young <i>et al.</i> , 1996
Bassin d'infiltration	$C=16,9V^{0,69}$		Brown & Schueler, 1997
Noues	\$0,25 à \$0,50	Par ft ²	Young <i>et al.</i> , 1996
Chaussées	\$2 à \$3		WERF, 2003

Tableau 1.31 – Coûts de maintenance des systèmes d'infiltration, d'après Field *et al.* (2006)

Types de système	Coûts de maintenance estimés par rapport aux coûts d'implantation (hormis les coûts fonciers)	Références
Tranchée d'infiltration	5 à 20%	Schueler, 1987 ; SWRPC, 1991
Bassin d'infiltration	1 à 3%	Livingston <i>et al.</i> , 1997 ; SWRPC, 1991
	5 à 10%	Wiegand <i>et al.</i> , 1986 ; Schueler, 1987 ; SWRPC, 1991
Noues	5 à 7%	SWRPC, 1991

D'autres auteurs proposent aussi des coûts d'implantation et maintenance des systèmes, comme indiqué au Tableau 1.32. Ces coûts sont en Euros avec date de référence janvier de 2006 et n'incluent pas les coûts fonciers.

Tableau 1.32 – Fourchettes de coûts d’implantation et de maintenance ou coûts moyens et écart type des systèmes d’infiltration (d’après Baptista & Barraud, 2001; Certu, 1998; USDT, 2002 ; Moura, 2004)

	Certu (1998)		Baptista & Barraud (2001)		USDT (2003)	Moura (2004)	
	implantation	maintenance	implantation	maintenance	implantation	implantation	maintenance
Bassins							
de rétention	10-69 ¹	0,17-0,51 ^{1*}					
d’infiltration						16 ¹	7,41 ^{1*}
végétalisés			133 ± 194 ¹	1,03 ± 0,86 ^{1*}		20 ¹	8,72 ^{1*}
en béton			277 ± 2608 ¹	6,93 ± 6,56 ^{1*}		25 ¹	8,32 ^{1*}
intégrés			139 ± 107 ¹				
non intégrés			180 ± 250 ¹				
en eau	11-75 ¹		173 ± 187 ¹	3,75 ± 3,00			
Chaussées		0,17-0,85 ^{2*}	178 ± 2202 ²	0,06 ± 7,87 ^{2*}			
Fossés			302 ± 137 ¹	7,87 ± 7,87			
Noues	17-35 ³				13 - 40 ³	37 ³	7,21 ^{3*}
Puits	3 ⁵	0,17 ^{5*}	1630 ⁴	94 ^{4*}		82 ¹	8,55 ^{1*}
Tranchées			137 ± 425 ¹			36 ³	11,12 ^{3*}

¹€/m³ ; ²€/m² ; ³€/mL ; ⁴€ par puits ; ⁵€/m² surface active

^{1*}€/m³/an ; ^{2*}€/m²/an ; ^{3*}€/mL/an ; ^{4*}€ par puits/an ; ^{5*}€/m² surface active/an

Un exemple a été réalisé de façon à illustrer l’application des deux indicateurs de la performance « Avoir un coût peu élevé ». L’exemple concerne deux alternatives de projet pour l’aménagement d’une zone donnée. La première alternative consiste à drainer la zone avec un système bassin de rétention / bassin d’infiltration et la deuxième alternative à drainer la zone par un système mixte, composé de tranchées d’infiltration et de noues d’infiltration. Pour cet exemple les coûts ont été pris dans la littérature.

Les coûts d'implantation, d'étude, de maintenance et de réfection, ainsi que la durée de vie estimée pour chaque ouvrage sont donnés au Tableau 1.33.

Tableau 1.33 – Coûts d'implantation, d'études, de maintenance et de réfection, et durée de vie des ouvrages

Systèmes		Coûts implantation	Coûts études	Coûts maintenance	Durées de vie	Coûts de réfection
Alternative 1	bassin	15 201,16	912,07	805,66	30 ans	-
Alternative 2	tranchée	9 736,25	486,81	1 022,31	15 ans	486,81
	noues	4 281,25	214,06	269,72	10 ans	214,06

IC_{COUT1} est simplement calculé par la somme des coûts d'implantation et d'études. Le calcul de IC_{COUT2} est un peu plus élaboré car la durée de vie des systèmes des alternatives est différente. Dans ce cas il faut calculer le coût de réfection du système. A la fin de la durée de vie les systèmes d'infiltration sont très rarement démolis, ils sont en général curés, avec remplacement du matériaux de remplissage, géotextiles... Cette réfection doit être refaite autant de fois que nécessaire, jusqu'à l'obtention d'une durée de vie égale à celle du système ayant la plus grande durée de vie. Dans notre cas les tranchées et noues doivent être refaites jusqu'à obtention d'une durée de vie de 30 ans (la durée de vie du bassin). La Figure 1.8 illustre les coûts annuels de maintenance et de réfection à considérer pour chaque type d'ouvrage considéré.

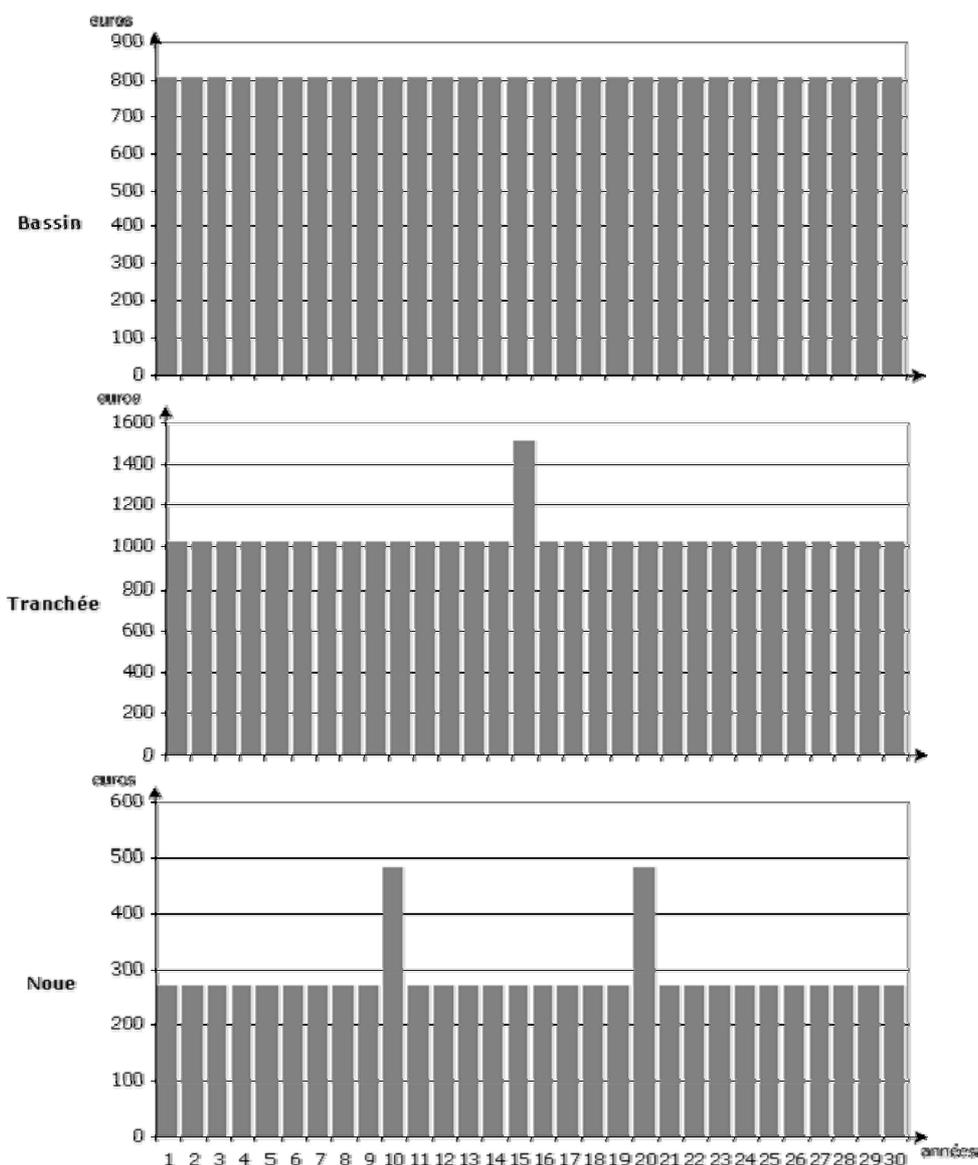


Figure 1.8 - Coûts de maintenance et de réfection à considérer pour une période de 30 ans

Les résultats des indicateurs de coûts pour chacune des alternatives sont fournis au Tableau 1.34 : on constate que les solutions de gestion à la source (tranchées et noues) sont plus économiques, ce qui est assez réaliste.

Tableau 1.34 – Résultats des indicateurs pour les deux alternatives étudiées

Systèmes	IC _{COUT1}	IC _{COUT2}
Alternative 1	IC _{COUT1} =15 201,16+912,07=16 113,23€	IC _{COUT2} =15 459,40
Alternative 2	IC _{COUT1} =14 017,50+700,88=14 718,38€	IC _{COUT2} =25 382,23

1.2.8.4 Qualité de l'indicateur

L'incertitude pour l'indicateur de coûts d'implantation peut être estimée à 10% de la valeur calculée, selon les experts. Pour l'indicateur de coûts de maintenance, l'incertitude sur le calcul de la valeur actuelle nette a été calculée à partir de la loi de propagation des incertitudes. Des incertitudes entre 9 et 30% ont été trouvées, selon les valeurs du taux d'actualisation et la période d'analyse. Pour ce calcul il a été utilisé une incertitude de 20% dans l'estimation des coûts de maintenance, de 50% dans les valeurs du taux d'actualisation et de 100% sur la période d'analyse, ce dernier visant à exprimer l'incertitude des durées de vie des systèmes.

La qualité des indicateurs est donnée au Tableau 1.35.

Tableau 1.35 – Evaluation des indicateurs de coûts - critère tout à fait satisfait (+++) : critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Indicateur	Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
IC _{COUT1}	+++	++	+++	+++	++	+++	+++
IC _{COUT2}	+++	+	+++	+++	+	+++	+++

Les deux indicateurs présentent sensiblement les mêmes problèmes selon les critères de Labouze & Labouze (1995) : l'accessibilité et la précision. Ces deux problèmes proviennent d'une même cause : le manque de données fiables sur les coûts des systèmes d'infiltration. En ce qui concerne les coûts d'implantation, les données deviennent de plus en plus fiables, toutefois cette fiabilité est très loin de celle des données des coûts des systèmes classiques de drainage. D'une part ces données sont difficiles à extrapoler à cause de la gamme de possibilités de conception que les systèmes d'infiltration possèdent et d'autre part à cause des concepteurs, qui ont commencé très tardivement à donner de l'importance à ces données. Les coûts de maintenance des systèmes sont encore plus entachés d'incertitudes, les données par rapport à ces coûts sont rares et peu fiables.

1.2.9 Qualité de l'aménagement

1.2.9.1 Considérations

Les systèmes d'assainissement urbain peuvent, en général, être plus ou moins bien perçus pour les usagers ou riverains. Notre recherche bibliographique nous amène à la conclusion que l'acceptabilité sociale d'un système d'infiltration va être liée aux autres fonctions que ces systèmes possèdent et à leur insertion dans le paysage urbain.

Un système d'infiltration des eaux pluviales peut assurer diverses fonctions, en gardant sa fonction principale d'assainissement. Ces systèmes peuvent avoir des fonctions de loisirs, comme des terrains de sport, squares, parcs, vélodromes, entre autres. Ils peuvent aussi avoir une simple fonction d'aménagement paysager ou aucune autre fonction que la fonction d'assainissement pluvial.

Les systèmes d'assainissement peuvent, en général, être plus ou moins bien perçus pour les usagers ou riverains.

Dans la bibliographie des approches plus ou moins basées sur les fonctions et leur insertion sont présentes. Azzout (1996) a proposé une liste des impacts possibles vis-à-vis de la population selon le type de technique alternative d'assainissement. Ces impacts vont des changements d'habitude jusqu'à des gênes visuelles pour les noues et les fossés, ou encore des problèmes d'odeurs ou d'apparition de moustiques dues aux bassins.

Ils concernent principalement les points suivants :

- Impact paysager
- Possibilité de fonctions de loisir
- Autres fonctions techniques possibles
- Impact du chantier sur la population

Castro (2002) a proposé des indicateurs pour le choix des systèmes d'assainissement. Les indicateurs concernaient :

- la prolifération des insectes, les impacts visuels
- la création de zones de récréation et loisir ou d'équipements urbains, l'impact sur les conditions de trafic, les autres fonctions techniques possibles et l'expropriation des zones

Barraud *et al.* (2001) a montré que les différents systèmes peuvent occasionner des gênes possibles ou un sentiment de risque, selon le Tableau 1.36.

Tableau 1.36 - Impacts possibles des différentes techniques d'infiltration pouvant occasionner de la gêne ou le sentiment de risque (Barraud *et al.*, 2001)

Techniques alternatives	Perception possible des gênes et risques
Fossé, toiture stockante et infiltration en pied d'immeuble	Gêne visuelle, crainte due à la présence d'eaux de pluie, risque de moustique ou d'odeurs
Noue (en terrain privatif)	Gêne visuelle, crainte due à la présence d'eaux de pluie, plantation particulière, risque de moustiques de moucheron, d'odeurs...
Bassin sec	Gêne visuelle, crainte due à la présence d'eaux de pluie, risque de moustique ou d'odeurs, risque de noyade en cas de pluie et de bassin profond, pollution du sol, ...
Equipement à revêtement drainant	Nécessité d'une grande discipline et de changements des habitudes quotidiennes (papiers, mégots de cigarettes, tonte de pelouse,...).

Ces études nous amènent à penser que l'acceptation sociale d'un système d'infiltration est bien liée aux autres fonctions que ces systèmes possèdent. Par ailleurs, il semble que l'acceptabilité sociale d'un système soit également, et on le comprend, lié à ses performances techniques. Si un système est techniquement performant son acceptabilité sociale va être d'autant mieux assurée. De même, si un système est bien entretenu il va être mieux accepté.

Nous allons évaluer l'acceptabilité sociale par le biais des autres fonctions qu'il peut accomplir. Dans la bibliographie on trouve plusieurs références à cette liaison : plus un système a d'autres fonctions mieux il est accepté.

Cependant, même si la multi-fonction est considérée en général comme un plus, encore faut-il que les usages supplémentaires soient conformes aux souhaits de l'aménageur ou du décideur et mieux ...des futurs usagers. Pourquoi dirait-on qu'un bassin d'infiltration servant de terrain de football serait meilleur qu'un bassin purement hydraulique s'il existe déjà des terrains de sport à proximité ?

Un système présente une meilleure qualité d'aménagement quand il a un usage supplémentaire conforme aux souhaits de l'aménageur ou du décideur.

1.2.9.2 Définition retenue

L'indicateur va donc évaluer l'aptitude d'un aménagement à répondre à d'autres usages souhaités.

Nous proposons donc un indicateur qualitatif marquant le fait qu'un aménagement, un ouvrage :

- va tout à fait dans le sens des souhaits du maître d'ouvrage / aménageur
- apporte un plus selon les souhaits du maître d'ouvrage / aménageur
- dont la plurifonctionnalité n'a aucune importance
- ne va pas du tout dans le sens des souhaits du maître d'ouvrage / aménageur

Selon le jugement du système il reçoit une note qui va être explicité dans le § 1.2.9.3.

1.2.9.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

- Les notes données à chaque jugement sont présentées au Tableau 1.37.

Tableau 1.37 – Notes selon les caractéristiques de l'aménagement ou de l'ouvrage

Caractéristiques de l'aménagement ou de l'ouvrage	Note
Va tout à fait dans le sens des souhaits du maître d'ouvrage / aménageur	7
Apporte un plus selon les souhaits du maître d'ouvrage / aménageur	5
Dont la plurifonctionnalité n'a aucune importance	4
Ne va pas du tout dans le sens des souhaits du maître d'ouvrage / aménageur	1

Ces notes ont été obtenues selon la méthodologie qu'Azzout (1996) a utilisé pour l'évaluation d'indicateurs de cette même nature. Elle consistait dans la définition de seuils d'indifférence et préférence entre les jugements, comparés deux à deux. Une différence de note de 1 point a été utilisé quand deux jugements sont considérés comme indifférents, une différence de 2 points a été utilisé quand un jugement était considéré préférable par rapport à un autre. Ces différences de notes ont été appelés seuils d'indifférence (q) et de préférence (p), respectivement. Ces seuils peuvent être observés dans la Figure 1.9.

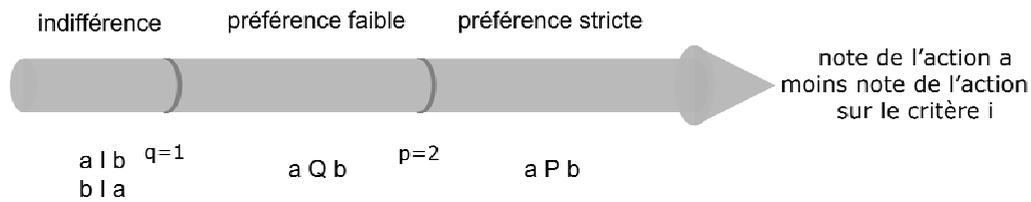


Figure 1.9 – Seuils d’indifférence et de préférence choisis

Des relations d’indifférence (I), de préférence faible (Q) ou de préférence stricte (P) ont été établies entre deux échelons. L’évaluation a été faite par deux chercheurs et est donnée à la Figure 1.10.

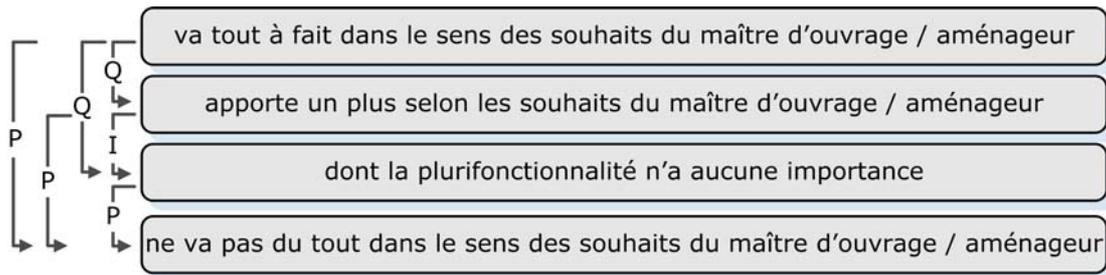


Figure 1.10 – Relations d’indifférence, préférence faible ou préférence stricte entre les différentes situations

Les notes sont donc obtenues par la vérification des contraintes suivantes, à propos de la différence entre deux situations :

- Inférieure ou égale à 1 dans le cas d’une relation d’indifférence ;
- Inférieure ou égale a 2, dans le cas d’une relation de préférence faible ;
- Strictement supérieure à 2 dans le cas d’une préférence stricte.

Une note égale à 1 est donnée à la situation la plus défavorable et à partir des relations entre deux jugements les notes sont attribuées.

1.2.9.4 Qualité de l’indicateur

En ce qui concerne l’incertitude de l’indicateur de qualité de l’aménagement, elle vaut 1, ce qui correspond à la valeur attribuée au seuil d’indifférence lors de la proposition des notes.

La qualité globale de l’indicateur de qualité de l’aménagement est évaluée toujours selon les critères proposés par Labouze & Labouze (1995) (Cf. Tableau 1.38).

Tableau 1.38 – Evaluation de l’indicateur de qualité de l’aménagement - critère tout à fait satisfait (+++) : critère satisfait, (++) : critère moyennement satisfait, (+) : critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+	+++	+++	+++	+++	+++	+++

Cet indicateur a une pertinence discutable, car il évalue l'acceptabilité sociale par le biais des autres fonctions de l'ouvrage et par l'appréciation du maître d'ouvrage et non des futurs usagers pour qui sont faits les aménagements. Le peu d'études sur ce thème explique sans doute cela. Nous espérons que la recherche dans le domaine de l'acceptabilité sociale des systèmes d'infiltration se développe et qu'une nouvelle proposition d'évaluation de cet indicateur puisse voir le jour d'une façon plus pertinente.

A la qualité d'objectivité, nous avons évalué le critère comme étant complètement objectif ce qui peut paraître paradoxal vu que l'indicateur est basé sur un avis qui, lui, est complètement subjectif. Cependant ici, la subjectivité est complètement assumée et voulue.

1.3 Récapitulatif des indicateurs de performances en phase de conception

Tableau 1.39 – Données nécessaires pour l'évaluation des indicateurs – phase de conception

Performance	Indicateur	Données pour l'évaluation des indicateurs
Protéger contre les inondations	Indicateur de fréquence de dimensionnement (IC_{HYD1})	Période de retour de dimensionnement des ouvrages
	Indicateur de vulnérabilité des surfaces touchées ($IC_{HYD2VOL}$, $IC_{HYD2PARK}$, $IC_{HYD2HAB}$, $IC_{HYD2PARC}$, $IC_{HYD2IAR}$, $IC_{HYD2IFR}$, $IC_{HYD2ACP}$)	Volume de stockage des ouvrages Surfaces actives drainées par chaque ouvrage et type de surface
		Pluie de temps de retour important supérieur à la période de retour de dimensionnement des ouvrages
Retenir la pollution dans l'ouvrage	Indicateur de protection de la nappe (IC_{NS1})	ZNS : Epaisseur des zones non saturées sous les ouvrages
	Indicateurs d'aptitude du sol à la rétention des polluants (IC_{NS2} , IC_{NS3})	pH du sol sous l'ouvrage, dans la zone à aménager Ks : Conductivité hydraulique du sol (à saturation)
	Indicateur de pression anthropique (IC_{PR})	Surface d'infiltration Surface active du bassin versant
		Facteur de pondération par rapport au type d'occupation du sol (expertise) Facteur de pondération par rapport à la présence ou non de prétraitement (expertise)
Contribuer à la recharge des nappes	Indicateur de recharge des nappes (IC_{NAPPE})	Surface du bassin versant drainé par infiltration
		Surface totale du bassin versant
Préserver les ressources naturelles	Indicateur de consommation de ressources naturelles (IC_{RN})	Volume excavé
		Distance de transport des matériaux excavés
		Quantité de géotextile utilisé
		Volume de béton utilisé

Performance	Indicateur	Données pour l'évaluation des indicateurs
		Volume des matériaux de remplissage utilisé
		Distance de transport pour l'apport des matériaux de remplissage
		Quantité de canalisations à construire
		Temps de fonctionnement des pompes ou autres équipements électriques
		Puissance des moteurs des pompes ou autres équipements électriques
		Distance de transport des résidus de curage

Tableau 1.39 – Données nécessaires pour l'évaluation des indicateurs – phase de conception (cont.)

Performance	Indicateur	Données pour l'évaluation des indicateurs
Etre maintenable facilement par l'organisation	Indicateur de maintenance (IC _{MAIN})	Connaissance des contraintes de maintenance des ouvrages et dispositifs (évaluation experte)
Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels	Indicateur de sécurité des ouvrages (IC _{SS})	Expertise type d'ouvrage
Produire des déchets facilement gérables	Indicateur de déchets solides (IC _{DEC})	Surfaces actives drainées par chaque ouvrage
Avoir un coût peu élevé	Indicateur de coûts d'implantation (IC _{COU1})	Coût d'investissement
		Coût des études préalables
	Indicateur de coûts de maintenance et gestion (IC _{COU2})	Coût estimé de maintenance par an
		Durée de vie
		Taux d'actualisation
Qualité de l'aménagement	Indicateur de qualité de l'aménagement (IC _{QUAL})	Expertise par type d'ouvrage

1.4 Considérations sur la qualité du jeu d'indicateurs

Comme énoncé précédemment, une bonne qualité d'un jeu d'indicateurs signifie que les indicateurs doivent être :

- Cohérents ;

- Exhaustifs ;
- Non redondants.

En ce qui concerne la redondance, nous avons examiné les facteurs et données nécessaires à leur évaluation. Ces données sont parfois communes (Cf. Figure 1.11 et Figure 1.12), cependant elles n'impliquent pas de liaisons entre les indicateurs qui traduisent donc bien des points de vue différents et non redondants.

La cohérence est assurée lors de la construction des critères et lors de l'application.

En ce qui concerne l'exhaustivité, nous avons utilisé la même approche que Y. Azzout (1996), nous avons proposé une liste d'indicateurs au groupe et avons demandé de compléter, supprimer, modifier jusqu'à obtenir un consensus. Cela ne garantit pas l'exhaustivité vis-à-vis du problème, mais l'exhaustivité vis-à-vis des points de vue du groupe.

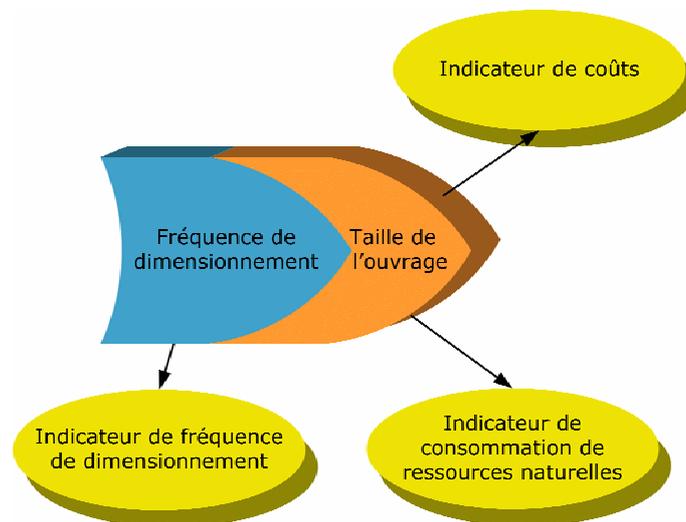


Figure 1.11 – Influence de la fréquence de dimensionnement sur différents indicateurs

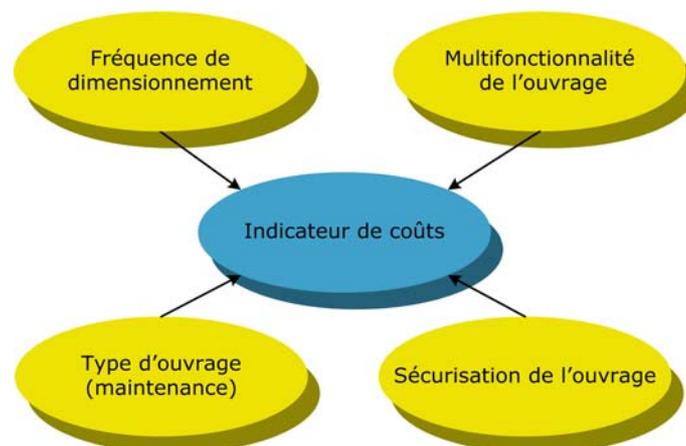


Figure 1.12 – Effets qui influencent l'indicateur de coûts

1.5 Choix et application d'une méthode de sélection

1.5.1 Méthode multicritère choisie

La méthode multicritère qui a été choisie pour l'agrégation des différents indicateurs est la méthode ELECTRE III (Cf. Annexe F). Ce choix vient :

- du fait que l'objectif est de choisir une alternative parmi plusieurs alternatives de projet (problématique γ) ;
- du fait que nous avons des indicateurs de natures différentes et évalués selon modes et échelles divers ;
- du fait que les incertitudes de certains indicateurs sont importantes et doivent pourtant être prises en compte (recours aux pseudo-critères) ;

De plus, nous préférons des méthodes d'agrégation partielle, pour ne pas avoir de compensation entre les critères.

1.5.2 Etude de cas - ZAC du Petit Bourg

1.5.2.1 Présentation sommaire du projet

La ZAC du Petit Bourg est localisée à Saint Bonnet de Mure, au sud-est de Lyon dans la plaine de l'Est Lyonnais. La superficie concernée par le projet est d'environ 2,6 ha.

L'aménagement comprend 5 programmes :

- Programme A : habitat collectif et commerces ;
- Programme B : habitat collectif ;
- Programme C : habitat individuel groupé ;
- Programme D : voirie ;
- Programme E : création d'un parc public.

Des essais de perméabilité du sol ont été effectués sur deux points de la zone d'aménagement, localisés sur le plan (Cf. Figure 1.13). Au point S1 le test a été réalisé à une profondeur variant de 3,4 à 3,8 m. On trouve une conductivité hydraulique à saturation de 10^{-3} m/s. Au point S2 (Cf. Figure

1.13) la conductivité hydraulique à saturation a été estimée à 4.10^{-3} m/s, pour les mêmes profondeurs. La conductivité hydraulique à saturation retenue pour le dimensionnement des ouvrages est de 1×10^{-4} m/s.

La nappe n'a pas été trouvée au cours des trois sondages, qui se sont arrêtés à 4,0 m, 4,1 m et 4,3 m de profondeur, respectivement pour P1, P2 et P3.

1.5.2.2 Les alternatives

Sur cette zone, trois alternatives ont été envisagées. Elles sont présentées dans le Tableau 1.39 et plus en détail dans l'Annexe B.

Tableau 1.39 – Description des alternatives

Description	
Alternative 1 - drainage effectué par des puits et des tranchées	Les puits recueillent l'eau des toitures et les infiltrent sans prétraitement Les tranchées sont alimentées de manière répartie par ruissellement superficiel et ont une couverture de 1,20 m pour permettre le croisement de tous les autres réseaux sans démolition de l'ouvrage d'infiltration
Alternative 2 - drainage effectué par des bassins de rétention – infiltration	Les eaux pluviales sont recueillies par un réseau et acheminées à un système comprenant un bassin de rétention puis un bassin d'infiltration en cascade localisés dans le parc du lotissement
Alternative 3 - drainage effectué exclusivement par des puits d'infiltration	L'assainissement pluvial est basé sur l'infiltration par puits seulement sans prétraitement

Les Figure 1.13, Figure 1.14 et Figure 1.15 présentent des schémas des systèmes projetés pour chaque alternative.

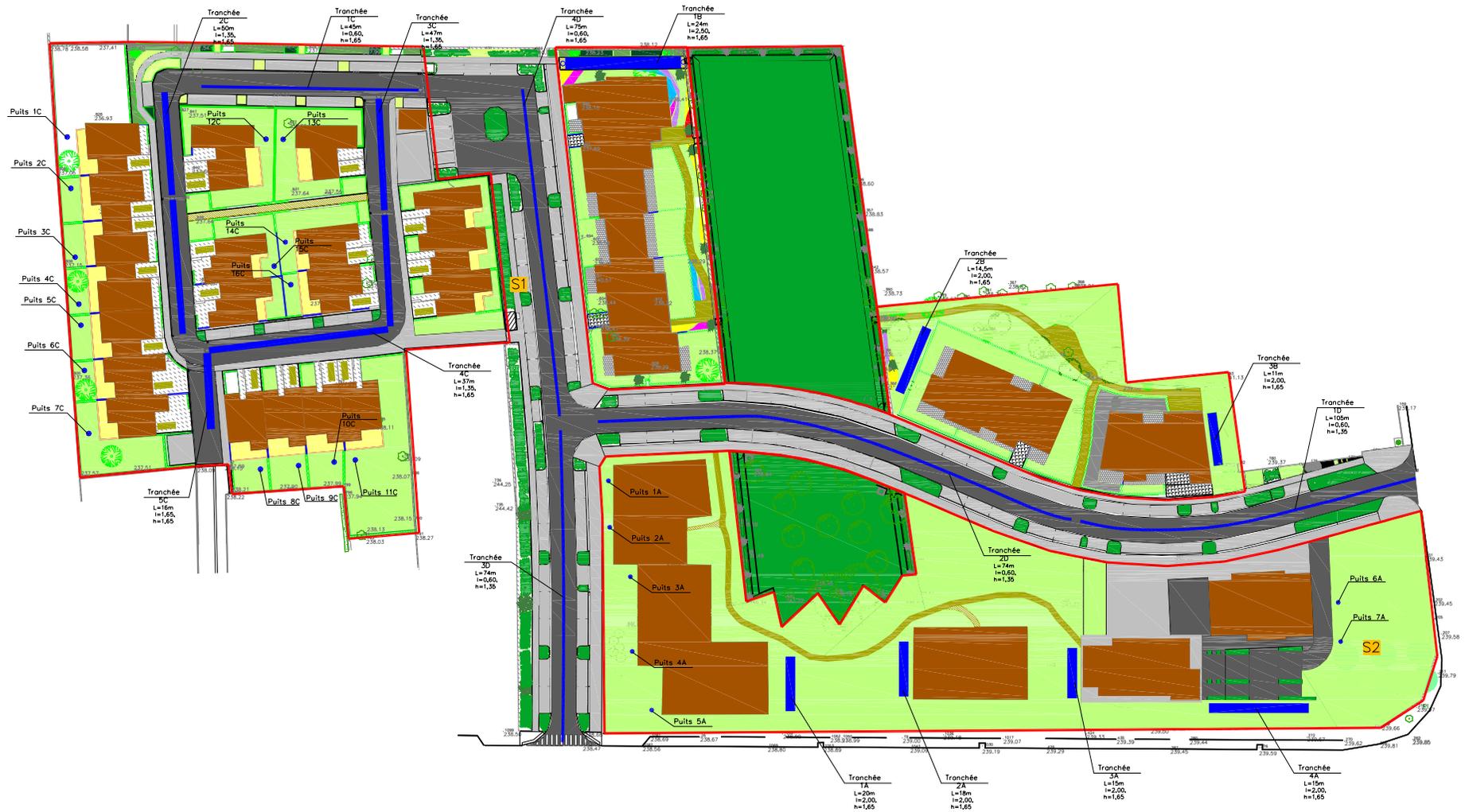


Figure 1.13 - Alternative 1 - système puits et tranchées



Figure 1.14 - Alternative 2 - système drainé par bassins



Figure 1.15 - Alternative 3 - système drainé par puits

1.5.2.3 L'évaluation des indicateurs

Tous les indicateurs ont été calculés pour les trois alternatives de projet, excepté l'indicateur IC_{NS2}, les analyses de pH du sol n'ayant pas été effectuées.

Le Tableau 1.40 montre les valeurs de chaque indicateur, pour les trois alternatives de projet.

Tableau 1.40 – Résultats des calculs des indicateurs, ZAC du Petit Bourg

Indicateurs		Alternative 1 (Puits+ tranchées)	Alternative 2 (Bassins)	Alternative 3 (Puits)
Indicateur de fréquence de dimensionnement	IC _{HYD1} (ans)	10	20	10
	IC _{HYD2VOI} (m ³) ⁽¹⁾	49	0	30
	IC _{HYD2PARK} (m ³) ⁽¹⁾	0	0	0
	IC _{HYD2HAB} (m ³) ⁽¹⁾	1	0	20
Indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées	IC _{HYD2PARC} (m ³) ⁽¹⁾	0	0	0
	IC _{HYD2IAR} (m ³) ⁽¹⁾	0	0	0
	IC _{HYD2IFR} (m ³) ⁽¹⁾	0	0	0
	IC _{HYD2ACP} (m ³) ⁽¹⁾	0	0	0
Indicateur de protection de la nappe	IC _{NS1} (m)	1	1	1
Indicateurs d'aptitude du sol à la rétention des polluants	IC _{NS3} (m/s)	1	1	1
Indicateur de pression anthropique	IC _{PR} (Adim.)	10,64	110,06	11,16
Indicateur de recharge des nappes	IC _{NAPPE} (Adim.)	1,00	1,00	1,00
Indicateur de consommation de ressources naturelles	IC _{RN} (Eq. Habitant × 100 000)	42 774	53 340	117 138
Indicateur de maintenance	IC _{MAIN} (Adim.)	2	4	1
Indicateur de sécurité des ouvrages	IC _{SS} (Adim.)	1,00	10,80	1,00
Indicateur de déchets solides	IC _{DEC} (m ²) ⁽¹⁾	348,67	13 662,80	116,44
Indicateur de coûts d'implantation	IC _{COUT1} (€)	149 988,15	624 435,21	111 618,00
Indicateur de coûts de maintenance et gestion	IC _{COUT2} ⁽²⁾ (€)	84 127,72	672 527,13	14 425,75
Indicateur de qualité de l'aménagement	IC _{QUAL} (Adim.)	4	4	4

⁽¹⁾ indicateurs estimés avec une période de retour de 50 ans

⁽²⁾ indicateur calculé selon les coûts de la bibliographie (Moura, 2004)

1.5.2.4 Définition des paramètres de la méthode

Définitions des seuils

On rappelle que la méthode ELECTRE III présente des seuils pour limiter les zones d'indifférence, de préférence faible et de préférence stricte de chaque indicateur. Ces seuils, choisis pour chaque indicateur sont présentés au Tableau 1.41.

Tableau 1.41 – Seuils choisis pour chaque indicateur

Indicateur	Seuil d'indifférence	Commentaires sur le choix du seuil d'indifférence	Seuil de préférence stricte	Commentaires sur les choix du seuil de préférence stricte	Seuil de veto
IC _{HYD1}	0	arbitraire basé sur l'expérience	2	arbitraire	-
IC _{HYD2VOI} IC _{HYD2PARK} IC _{HYD2HAB} IC _{HYD2PARC} IC _{HYD2IAR} IC _{HYD2IFR} IC _{HYD2ACP}	20%	arbitraire basé sur l'expérience	50%	incertitude dans le calcul des volumes	-
IC _{NS1}	0,5	indifférence dans l'établissement de l'épaisseur de la zone non saturée	0,5	indifférence dans l'établissement de l'épaisseur de la zone non saturée	-
IC _{NS2}	0,6	incertitude des mesures de pH	1	une unité de pH	-
IC _{NS3}	500%	l'incertitude des mesures de vitesse d'infiltration	1.000%	l'incertitude des mesures de vitesse d'infiltration	-
IC _{PR}	467%	l'incertitude de l'indicateur	467%	l'incertitude de l'indicateur, car elle est déjà importante	-
IC _{NAPPE}	5%	l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	5%	l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	-
IC _{RN}	u(IC _{RN})	l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	2u(IC _{RN})	Deux fois l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	-
IC _{MAIN}	1	l'incertitude maximale considérée c'est-à-dire, l'hésitation que le décideur peut avoir au moment de donner les notes	2	Deux fois l'incertitude	10 *
IC _{SS}	1,6	l'écart type moyen des jugements donnés par les experts	3,2	la valeur du plus grand écart type des jugements des experts	-
IC _{DEC}	2,5%	l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	5%	double de celui d'indifférence	-
IC _{COU1}	10%	l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	20%	double de celui d'indifférence	-
IC _{COU2}	30%	l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	60%	double de celui d'indifférence	-
IC _{QUAL}	1	a été fait de manière combinée aux évaluations	2	a été fait de manière combinée aux évaluations	-

*Un seuil de veto a été choisi car nous croyons qu'une différence excessive dans les notes n'est pas désirable, elle atteint la capacité de jugement d'une personne

Définitions des pondérations

Les poids des indicateurs utilisés dans les études de cas ont été proposés selon trois points de vue différents : un point de vue « techniciste », un point de vue « environnementaliste » et un point de vue du « développement durable ».

Les poids obtenus pour chacune des visions sont comparés dans le graphique de la Figure 1.16.

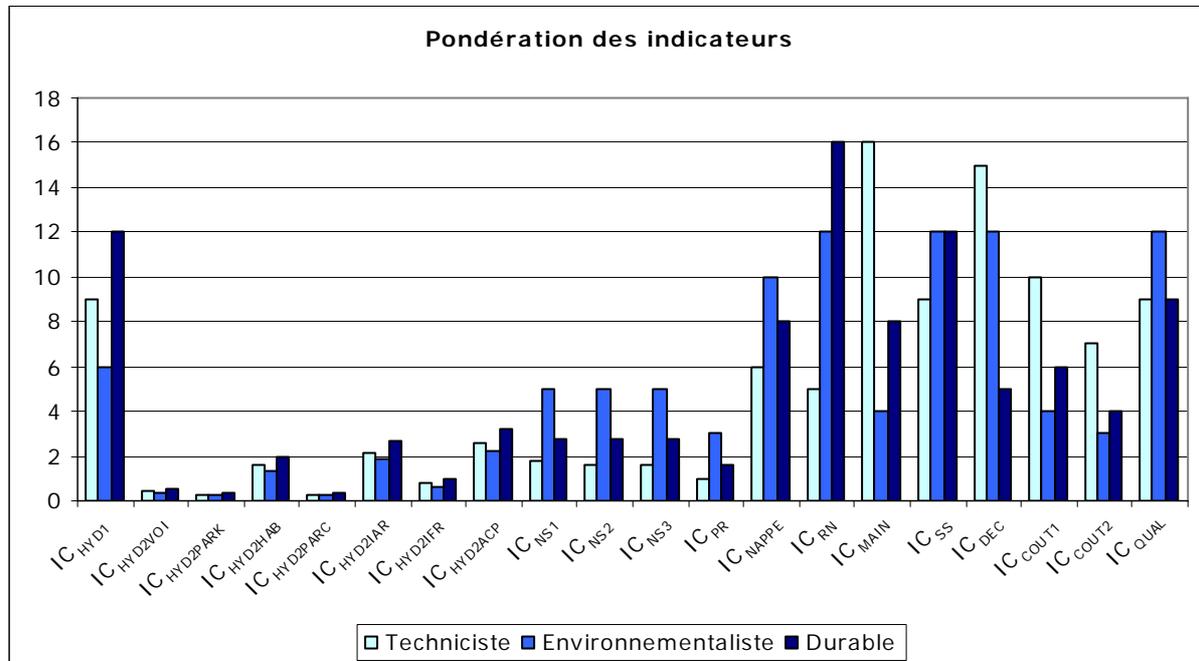


Figure 1.16 – Comparaison des poids relatifs à chacun des trois points de vue

Le Tableau 1.42 présente les valeurs des poids des trois points de vue, pour chaque performance et pour leurs indicateurs respectifs.

Tableau 1.42 – Poids des performances et indicateurs selon les points de vue

Performances	Indicateurs	Poids point de vue techniciste		Poids point de vue environnementaliste		Poids point de vue durable	
Protéger contre les inondations	Indicateur de fréquence de dimensionnement (IC _{HYD1})		9,00		6,00		12,00
	(IC _{HYD2PARK})		0,45		0,39		0,56
	(IC _{HYD2HAB})		0,27		0,24		0,33
	(IC _{HYD2PARC})	17	1,57	13	1,37	22	1,96
	Indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées (IC _{HYD2IAR})		0,27		0,23		0,33
	(IC _{HYD2IFR})		2,10		1,85		2,64
	(IC _{HYD2ACP})		0,76		0,66		0,95
	(IC _{HYD2PARK})		2,58		2,26		3,23
Retenir la pollution dans l'ouvrage	Indicateur de protection de la nappe (IC _{NS1})		1,80		5,00		2,80
	Indicateurs d'aptitude du sol (IC _{NS2})		1,60		5,00		2,80
	à la rétention des polluants (IC _{NS3})	6	1,60	18	5,00	10	2,80
	Indicateur de pression anthropique (IC _{PR})		1,00		3,00		1,60
Contribuer à la recharge des nappes	Indicateur de recharge des nappes (IC _{NAPPE})	6	6,00	10	10,00	8	8,00
Préserver les ressources naturelles	Indicateur de consommation de ressources naturelles (IC _{RN})	5	5,00	12	12,00	16	16,00
Etre maintenable facilement par l'organisation	Indicateur de maintenance (IC _{MAIN})	16	16,00	4	4,00	8	8,00
Garantir la sécurité des usagers/personnels	Indicateur de sécurité des ouvrages (IC _{SS})	9	9,00	12	12,00	12	12,00
Produire des déchets facilement gérables	Indicateur de déchets solides (IC _{DEC})	15	15,00	12	12,00	5	5,00
Avoir un coût peu élevé	Indicateur de coûts d'implantation (IC _{COUT1})	17	10,00	7	4,00	10	6,00
	Indicateur de coûts de maintenance (IC _{COUT2})		7,00		3,00		4,00
Qualité de l'aménagement	Indicateur de qualité de l'aménagement (IC _{QUAL})	9	9,00	12	12,00	9	9,00

1.5.2.5 Application de la méthode de choix ELECTRE III, résultats et discussion

Démarche

La méthode ELECTRE III a été appliquée à l'étude de cas en utilisant les pondérations des indicateurs pour les trois points de vue différents. Des analyses de sensibilité et de robustesse ont ensuite été réalisées. Les paramètres que l'on a fait varier sont : les poids, les seuils d'indifférence et de préférence stricte.

Résultats

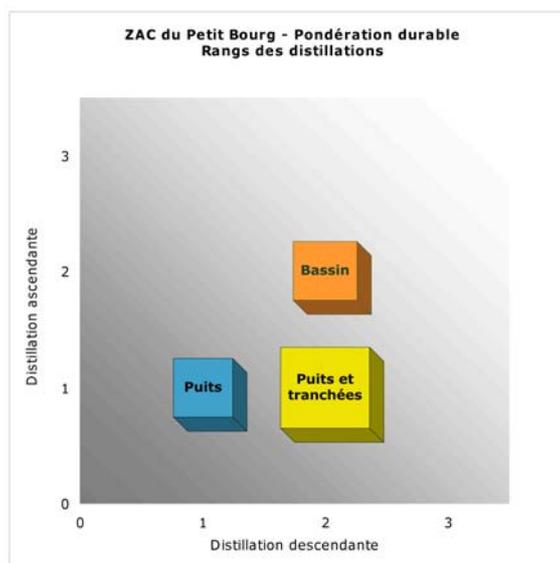
Les résultats de l'application d'ELECTRE III diffèrent selon les trois points de vue utilisés dans la pondération des indicateurs, comme le montre le Tableau 1.43, qui présente le classement des alternatives et les rangs de distillation ascendante et descendante.

Tableau 1.43 – Résultats de l'ELECTRE III pour les pondérations des trois points de vue différents

Pondération	Classement	Rangs des distillations
Techniciste	<p>Puits</p> <p>Puits et tranchées</p> <p>Bassin</p>	<p>ZAC du Petit Bourg - Pondération techniciste Rangs des distillations</p> <p>Distillation ascendante</p> <p>Distillation descendante</p>
Environnementaliste	<p>Puits</p> <p>Puits et tranchées - Bassin</p>	<p>ZAC du Petit Bourg - Pondération environnementaliste Rangs des distillations</p> <p>Distillation ascendante</p> <p>Distillation descendante</p>

Durable

Puits
Bassin
Puits et tranchées



Même si les résultats diffèrent selon la pondération, nous avons pu observer que les solutions de drainage à la source, comme les puits, sont toujours mieux classés. Même s'il est important d'insister sur le fait que le bassin de cette étude est un petit bassin de rétention / infiltration qui par conséquent se rapproche d'une solution à la source.

On constate également que les puits sont toujours en tête de classement.

1.5.2.6 Analyses de sensibilité et de robustesse

Une **analyse de robustesse** de la méthode appliquée à l'étude de cas de la ZAC du Petit Bourg a été effectuée. Les paramètres poids, les seuils d'indifférence et de préférence stricte ont été considérés.

L'analyse de robustesse consiste à tester les plages de valeurs possibles pour chaque paramètre.

Une **analyse de sensibilité** de la méthode est réalisée en faisant varier les seuils d'indifférence, de préférence stricte et de veto des indicateurs.

L'analyse de sensibilité consiste à analyser l'influence de chacun des paramètres sur le résultat de l'application de la procédure d'agrégation des indicateurs (Roy & Bouyssou, 1993). Selon Simos (1990) il s'agit d'une analyse de l'instabilité par rapport aux différents paramètres concernés. Elle consiste à répéter l'analyse multicritère en faisant varier, isolément ou collectivement, les valeurs attribuées à l'origine aux différents paramètres de la méthode.

L'analyse de robustesse a été effectuée dans un premier temps, et a permis d'identifier les critères les moins robustes. L'analyse de sensibilité leur a ensuite été appliquée.

Analyse de robustesse

L'analyse de robustesse de la méthode a été réalisée en trois temps. Dans un premier temps l'étude a consisté à faire varier un à un les poids des indicateurs. Dans un deuxième temps, il s'est agit de faire varier les seuils d'indifférence et de préférence stricte des indicateurs. Dans le troisième nous faisons varier les seuils d'indifférence et de préférence stricte de certains indicateurs en même temps.

L'étude de la variation des poids des indicateurs un a un a été menée sur la moyenne des pondérations des trois points de vue. Pour la majorité des critères les variations n'ont entraîné aucune modification dans le classement excepté pour les indicateurs IC_{HYD1} , $IC_{HYD2VOI}$, $IC_{HYD2HAB}$, IC_{RN} , IC_{DEC} , IC_{COUT1} et IC_{COUT2} .

Pour chacun de ces 7 indicateurs la Figure 1.17 donne de plages de valeurs de pondération donnant la solution de base (classement initial) et les différents plages donnant d'autres classements et les classement pour chaque plage.

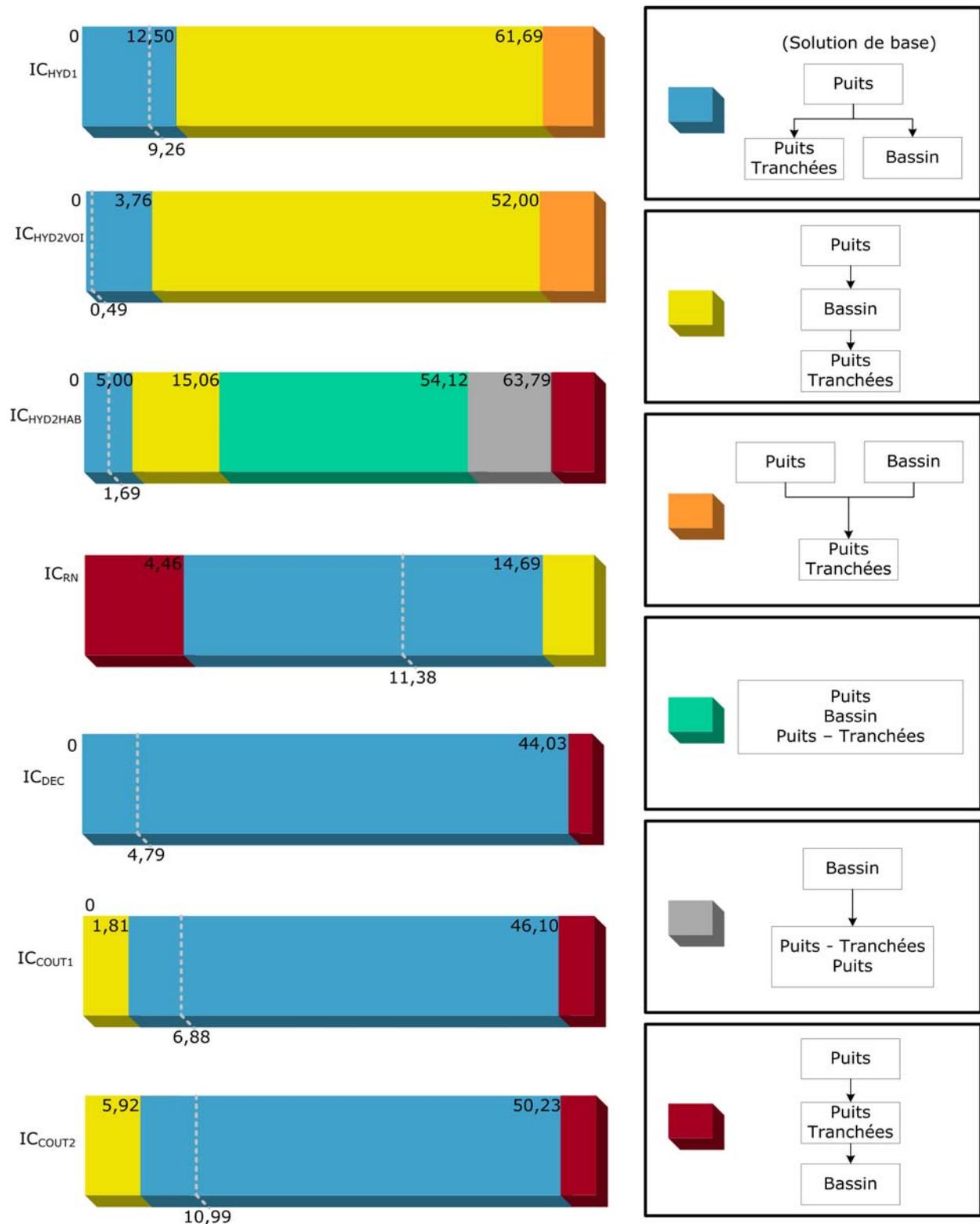


Figure 1.17 – Résultats de l’analyse de robustesse à la variation des poids pour les indicateurs présentant de résultats différents de la solution de base – le domaine donné la solution de base apparaît en bleu, les valeurs indiquées par un trait pointillé gris correspondent à la pondération moyenne initiale de l’indicateur – les valeurs des poids dans chaque domaine de solution indiquent les valeurs au delà desquels il a changement de solution

On observe que les indicateurs sont tous robustes par rapport aux variations des poids. Ceux qui sont relativement les moins robustes sont les indicateurs hydrauliques (IC_{HYD1} , $IC_{HYD2VOL}$, $IC_{HYD2HAB}$), pour lesquels des classements différents de la solution de base et qui ne font pas apparaître des puits en premier, sont possibles – cependant ces changements se font pour des plus fortes variations de poids.

Dans un deuxième temps nous faisons varier à la fois les seuils d'indifférence et de préférence stricte. En majorité, les résultats ne montrent pas de changement par rapport à la solution de base, seuls les indicateurs IC_{HYD1} , IC_{RN} , IC_{SS} , IC_{MAIN} , IC_{DEC} , IC_{COUT1} , et IC_{COUT2} diffèrent significativement, comme le montre la Figure 1.18.

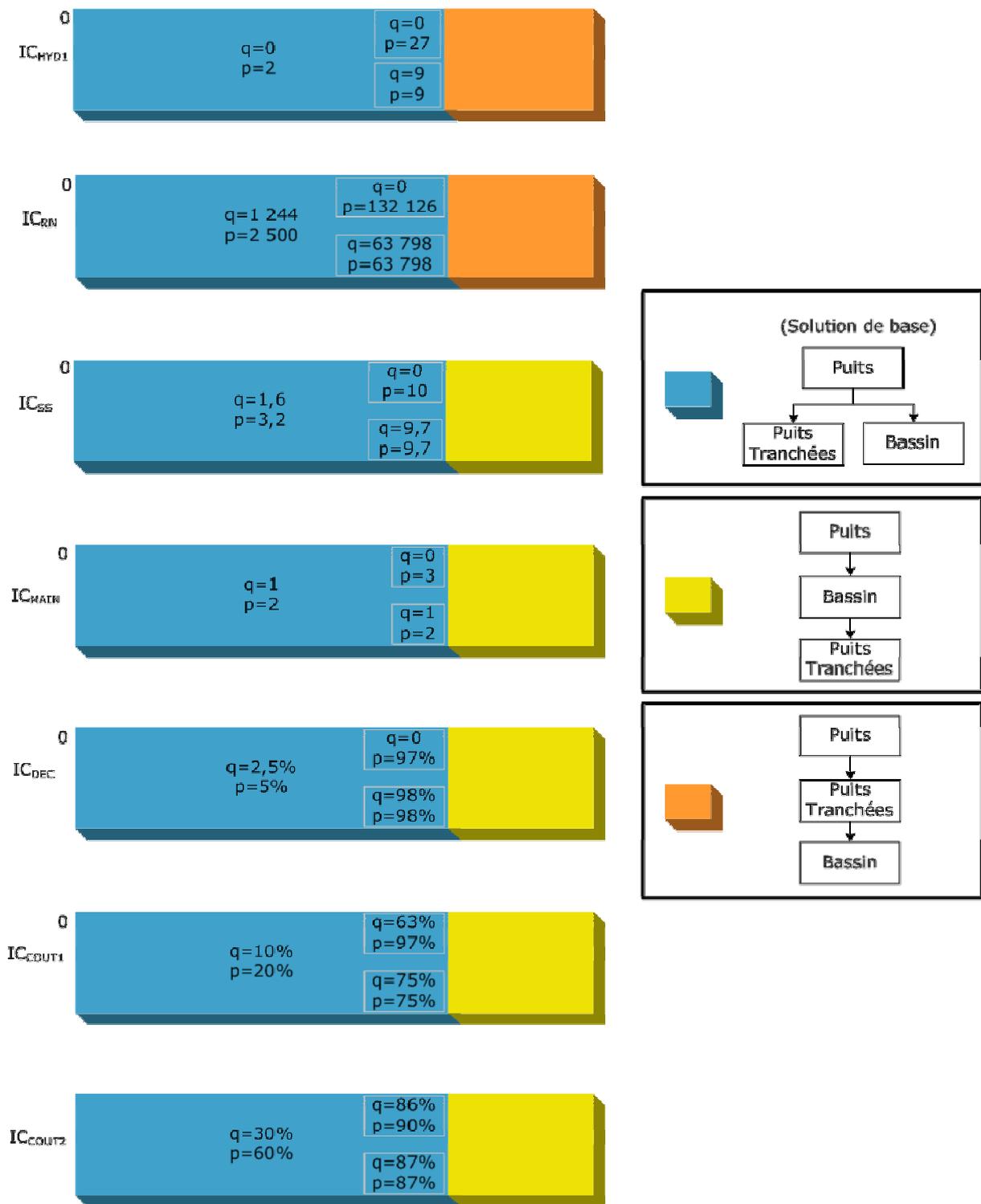


Figure 1.18 – Schématisation des résultats de l’analyse de robustesse à la variation des seuils pour les indicateurs IC_{HYD1}, IC_{RN}, IC_{SS}, IC_{MAIN}, IC_{DEC}, IC_{COUT1}, et IC_{COUT2} - le domaine donnant la solution de base apparaît en bleu, les valeurs des seuils d’indifférence (q) et de préférence stricte (p) utilisés initialement dans l’analyse est au centre, les valeurs dans les cadres gris sont les couples de seuils au delà desquels la solution de base n’est pas maintenue (la longueur des zones n’est ici pas significative d’une quelconque mesure)

On peut voir que les seuils choisis sont robustes pour la majorité de ces indicateurs. Les limites de la solution de base étant assez larges. Seuls les indicateurs IC_{HYD1} et IC_{MAIN} présentent des valeurs limites (valeurs très proches pour l'indicateur IC_{MAIN}).

Dans un troisième temps, on s'intéresse aux deux indicateurs qui se sont montrés les moins robustes dans l'approche précédente : IC_{HYD1} et IC_{MAIN} , que l'on teste en effectuant des variations des seuils conjointement. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 1.19.

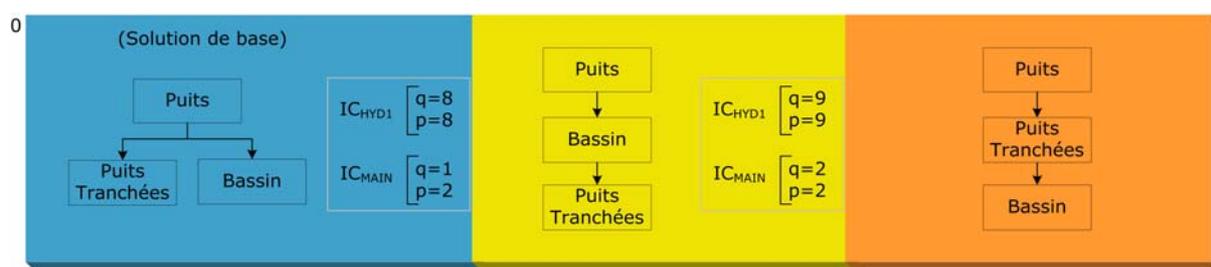


Figure 1.19 – Schématisation des résultats de l'analyse de robustesse relative à la variation simultanée des seuils de IC_{HYD1} et IC_{MAIN} - le domaine donnant la solution de base apparaît en bleu : les valeurs des seuils d'indifférence (q) et de préférence stricte (p) ; les valeurs dans les cadres gris sont les couples de seuils au delà desquels la solution n'est pas maintenue (sachant que les seuils initiaux étaient de $q=0$ et $p=2$ pour IC_{HYD1} et $q=1$ et $p=2$ pour IC_{MAIN})

De manière générale on peut conclure que la méthode est robuste et que le choix des seuils a été judicieux, hormis pour l'indicateur de maintenance (IC_{MAIN}), dont le classement est limite stable. Toutefois nous estimons que le choix des seuils de cet indicateur reste acceptable car le classement reste toujours cohérent donnant les puits en première position et ne changeant potentiellement que les actions de rang 2 qui peuvent devenir ex-æquos.

Analyse de sensibilité

En nous basant sur les résultats de l'analyse de robustesse, nous avons choisi des indicateurs pour effectuer une analyse de sensibilité. Les indicateurs choisis sont ceux qui se sont montrés les moins robustes aux changements de seuils : IC_{HYD1} , IC_{RN} et IC_{MAIN} .

Des simulations ont été effectuées avec les trois jeux de pondérations (techniciste, environnementaliste et durable) utilisés dans l'exploitation de la méthode. 24 simulations ont été effectuées, chacune avec 3 jeux de poids et les seuils d'indifférence et de préférence stricte, indiqués sur la Figure 1.20 (soient 72 simulations au total).

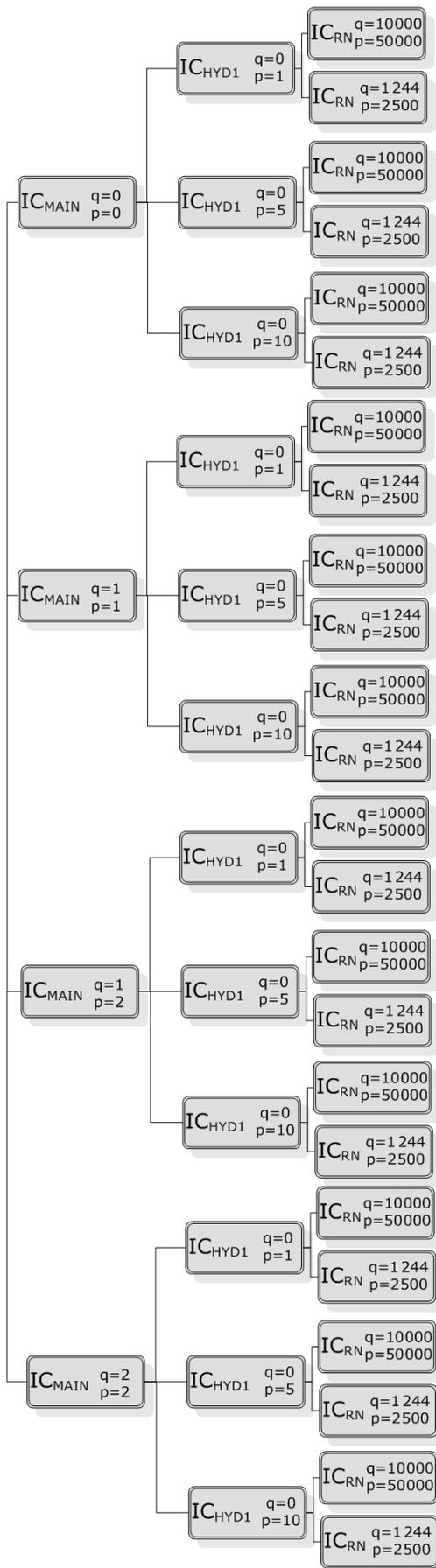


Figure 1.20 – Combinaison de paramètres de l’analyse de sensibilité pour chacune des pondérations

Les résultats obtenus, au sein d'une même stratégie techniciste, environnementaliste ou durable, sont strictement identiques à ceux obtenus au classement initial. Par contre chaque stratégie donne des résultats différents. Nous pouvons en conclure que la méthode n'est pas sensible aux seuils d'indifférence et de préférence stricte appliqués aux indicateurs mais sensible à la stratégie de pondération (ce qui est légitime).

Analyse des poids employés

Une analyse des poids choisis a été effectuée, en comparant les poids choisis à des poids calculés par la méthode des entropies.

Rapellons que cette méthode a été proposée par Zenely (1982 apud Pomerol & Barba-Romero, 1993) et vise la détermination des poids sans l'interférence du décideur, en fonction des valeurs des indicateurs des alternatives évalués. L'idée de cette méthode est que l'importance relative de chaque critère est fonction de la quantité d'information apportée par ce critère. Autrement dit un critère va avoir un poids d'autant plus important que la dispersion des différents alternatives selon ce critère est grande. Plus de détails sur cette méthode peuvent être vus dans l'Annexe E.

Les résultats sont donnés au Tableau 1.44.

Tableau 1.44 – Pondération des indicateurs par la méthode des entropies

Indicateur	Poids méthode des entropies
IC _{HYD1}	4,59
IC _{HYD2VOI}	5,73
IC _{HYD2PARK}	4,41
IC _{HYD2HAB}	7,16
IC _{HYD2PARC}	4,41
IC _{HYD2IAR}	4,41
IC _{HYD2IFR}	4,41
IC _{HYD2ACP}	4,41
IC _{NS1}	4,41
IC _{NS2}	4,41
IC _{NS3}	7,76
IC _{PR}	4,41
IC _{NAPPE}	5,10
IC _{RN}	4,85
IC _{MAIN}	6,11
IC _{SS}	7,26
IC _{DEC}	5,30
IC _{COUT1}	6,43
IC _{COUT2}	4,41
IC _{QUAL}	4,59

Les Figure 1.21, Figure 1.22 et Figure 1.23 montrent les corrélations entre les poids calculés par la méthode de l'entropie et les poids choisis pour chaque point de vue.

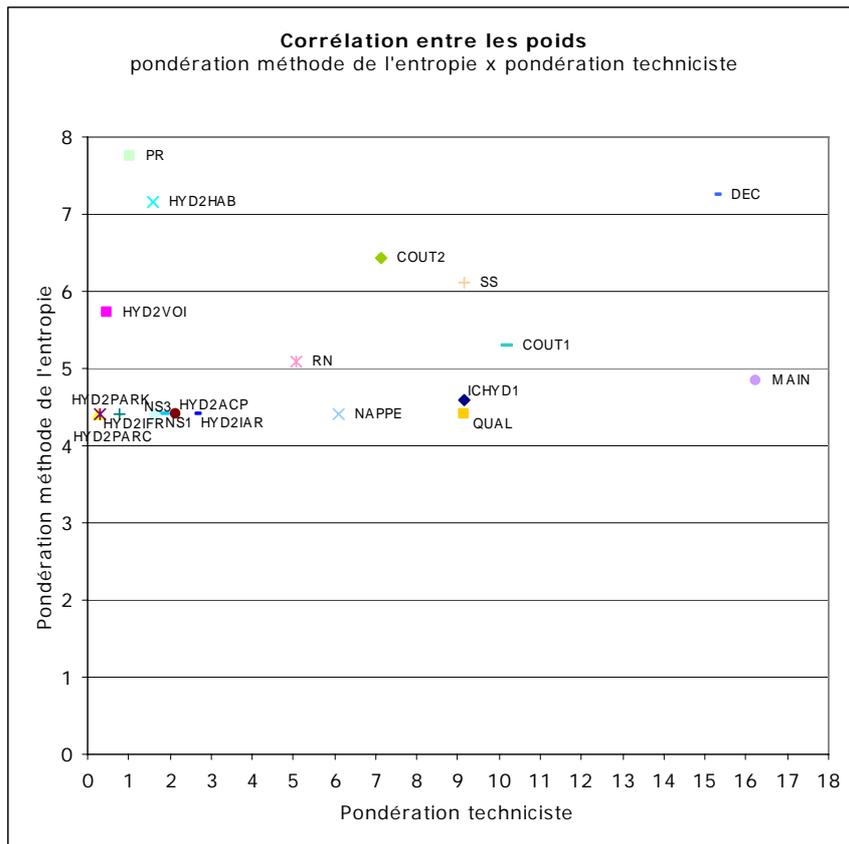


Figure 1.21 – Combinaison de paramètres de l'analyse de sensibilité pour chacune des pondérations

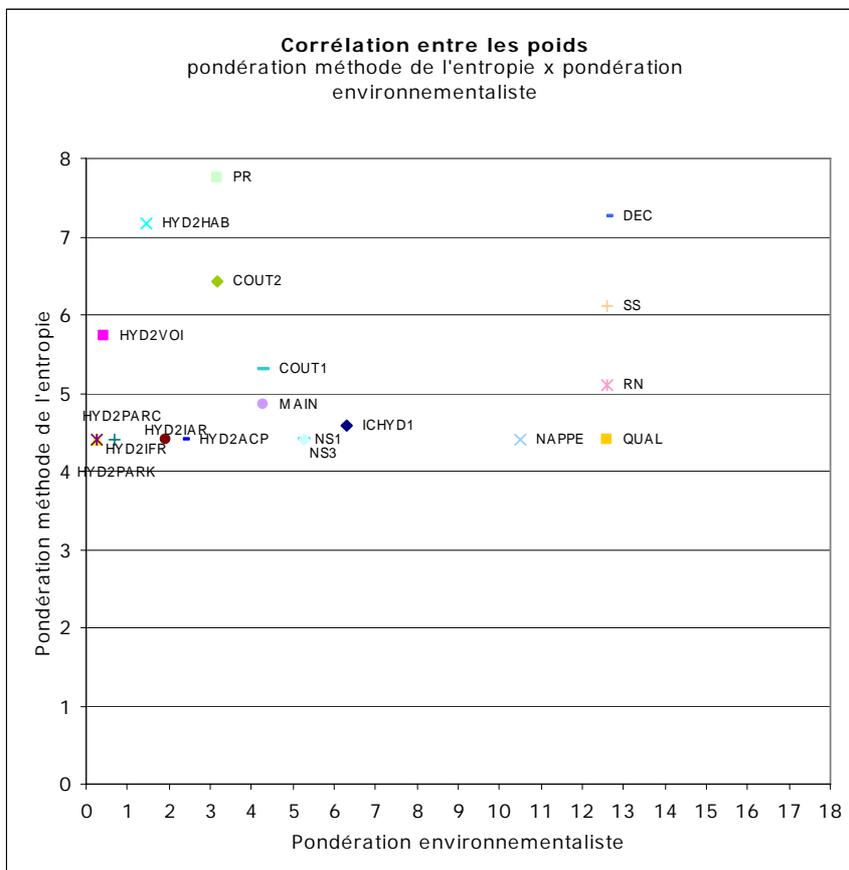


Figure 1.22 – Combinaison de paramètres de l’analyse de sensibilité pour chacune des pondérations

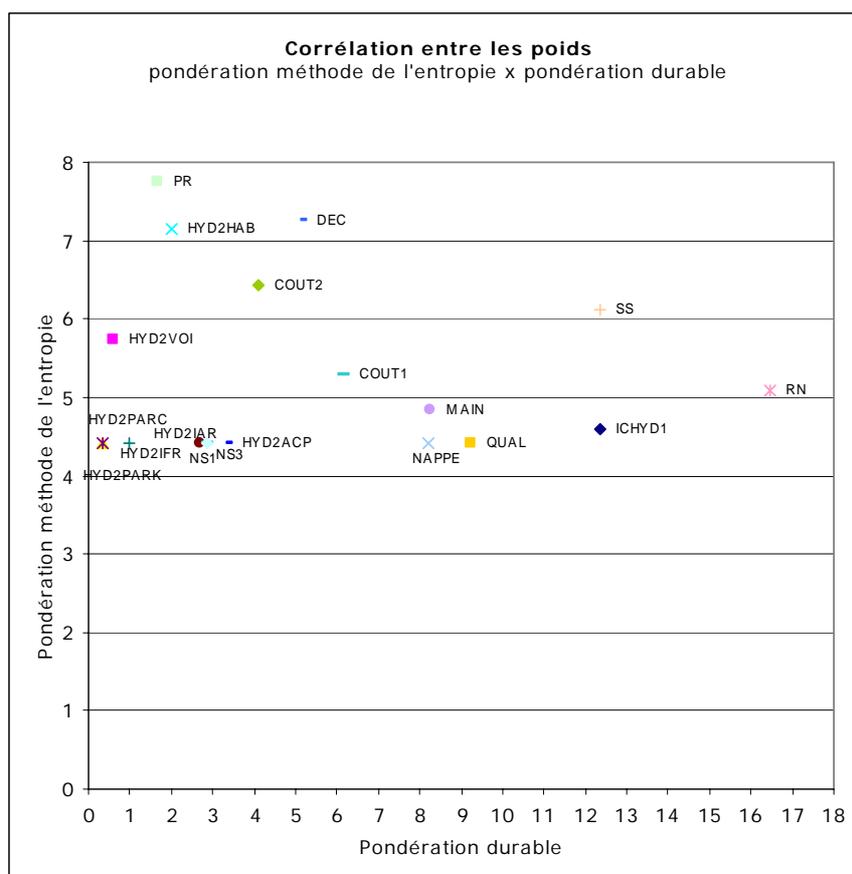


Figure 1.23 – Combinaison de paramètres de l’analyse de sensibilité pour chacune des pondérations

On peut constater quelques disparités dans les pondérations.

- Pour le jeu de pondération « techniciste » on constate qu’un poids important est donnée à la maintenance alors que ce critère discrimine peu les solutions et n’est pas spécialement discriminant par rapport aux autres - alors que les alternatives sont bien différents. L’échelle resserrée de ces évaluations en est la cause.
- Pour le jeu de pondération « environnementaliste » les déchets, la sécurité, la consommation en ressources naturelles, la qualité de l’aménagement et la recharge des nappes ont un poids important donné par le décideur mais qui ne discrimine pas les solutions. Pour beaucoup d’entre eux, cette situation s’explique par le fait que les solutions ont des évaluations identiques ou très proches, comme IC_{QUAL} , IC_{NAPPE} .
- Pour le jeu de pondération « durable » l’hydraulique a un poids important donné par le décideur, mais IC_{HYD1} n’est pas très discriminant par rapport aux autres critères, dû au fait que les alternatives ont des évaluations proches pour cet indicateur.

Il aurait été intéressant de continuer cette analyse et de supprimer les critères qui présentent de faibles poids selon la méthode de l’entropie de manière à examiner s’ils sont bien discriminants dans les

prescriptions décisionnelles finales. Cependant sur l'exemple, les solutions des alternatives ne sont pas suffisamment contrastées pour que cette étude soit intéressante.

1.6 Conclusions

Ce présent chapitre a présenté la construction des indicateurs pour la problématique de conception des systèmes d'infiltration. Pour chaque performance les considérations pour la construction des indicateurs, les indicateurs testés et la formulation retenue ont été présentées. En plus la qualité des indicateurs proposés a été testée.

Après avoir présenté les indicateurs proposés le chapitre donne une application de la méthodologie, en utilisant la méthode multicritère ELECTRE III. Des analyses de sensibilité et robustesse ont été réalisées et ont montré que la méthodologie était robuste et peu sensible aux variations des paramètres de la méthode mais sensible aux coefficients d'importance (poids) des indicateurs, ce qui est satisfaisant.

Chapitre 2 Proposition des indicateurs et méthodes multicritères pour une problématique de suivi des ouvrages

2.1 Introduction

Le présent chapitre va présenter les performances considérées pour l'évaluation des systèmes d'infiltration pour une problématique de suivi.

Dans un premier temps, pour chaque performance nous présentons successivement : les objectifs et points de vue adoptés, la proposition retenue, l'explicitation des méthodes d'évaluation ou d'estimation des indicateurs suivie d'exemples d'application et de considérations sur la qualité des indicateurs proposés. L'historique des formulations d'indicateurs proposés ou déjà testés est disponible dans (Moura, 2008).

Dans un deuxième temps nous exposerons la méthode multicritère utilisée pour l'agrégation des indicateurs. L'application de la méthode sur des études de cas sera enfin présentée de manière à tester la pertinence de la démarche.

Rappelons qu'en ce qui concerne la phase de suivi des systèmes d'infiltration, l'évaluation des systèmes doit permettre de donner aux décideurs des outils leur permettant :

- d'évaluer un ouvrage, une situation, un aménagement à un moment donné faisant intervenir des systèmes d'infiltration ;
- de suivre dans le temps un ouvrage, une situation, un aménagement (comparaison à différentes phases de la vie).

2.2 Présentation des performances

2.2.1 Protéger contre les inondations

2.2.1.1 Considérations

La performance de protection contre les inondations pour le suivi des systèmes peut être utile à deux niveaux : au niveau du système global et au niveau d'un ouvrage particulier.

De plus, les inondations qui surviennent malgré la protection des ouvrages d'assainissement peuvent avoir des causes distinctes. La première cause possible est l'occurrence d'un événement exceptionnel, pour une pluie de période de retour supérieure à celle de projet. Ces inondations sont « normales » au sens où chaque ouvrage ou aménagement est conçu en intégrant un risque inévitable donné, et assumé par le maître d'ouvrage ou le gestionnaire. Elles ne doivent donc pas être vues comme un mauvais fonctionnement de l'ouvrage. Une deuxième cause d'inondation peut être liée à des changements dans

le bassin versant. L'urbanisation se développant, des zones imperméables sont créées qui entraînent une augmentation du ruissellement et par conséquent des volumes et des débits d'eau plus importants pouvant arriver aux systèmes d'infiltration. Ce type d'inondation démontre une inadéquation de l'ouvrage avec son nouveau contexte et doit donc être traité comme tel. La troisième cause d'inondation est un dysfonctionnement de l'ouvrage lui-même, causé par exemple par son colmatage qui est le phénomène le plus fréquent. Face à ces dysfonctionnements liés aussi bien à l'inadaptation du système à son contexte que l'évolution du système lui-même, le gestionnaire doit agir.

Ainsi nous avons considéré que la performance hydraulique d'un système (ouvrage ou aménagement) était d'autant meilleure que la fréquence de débordement observée était proche de celle qui a présidé à son dimensionnement et que les conséquences de ces débordements n'étaient pas trop importantes.

2.2.1.2 Définition retenue

La définition retenue pour les indicateurs relatifs à la « Protection contre les inondations » a donc été simplifiée et comprend aujourd'hui deux indicateurs distincts :

Indicateur de fréquence de débordement

$IS_{HYDI} = \frac{F_{deb}}{F_{dim}}$	(Adimensionnel, Préférence décroissante, $[0, +\infty[$)	(Équation 2.1)
---------------------------------------	---	----------------

Avec :

F_{deb} : Fréquence de débordement observée sur la période considérée, en an^{-1}

F_{dim} : Fréquence de dimensionnement de l'ouvrage, en an^{-1}

Cependant, il est important de vérifier, pour chaque débordement, qu'il a bien été causé par un événement non exceptionnel, c'est-à-dire de période de retour supérieure au temps de retour de dimensionnement. Dans le cas contraire, il ne doit pas être pris en compte lors du calcul de l'indicateur.

Par ailleurs la période considérée est à définir au cas par cas. Dans le cadre d'un suivi, la période peut-être celle qui s'est écoulée entre la date de mise en service et la date à laquelle on fait un bilan de performance si aucune intervention lourde n'a été faite sur le système. Ce peut être également la période qui s'est écoulée entre la dernière intervention importante sur le système et la date à laquelle on fait le point.

Suivi de la performance hydraulique

Sur des ouvrages importants de type bassins d'infiltration

$$IS_{HYD2} = \text{Max}_i (R_i) \quad (\text{en h, Pr\u00e9f\u00e9rence d\u00e9croissante, }]0, +\infty [) \quad (\text{\u00c9quation 2.2})$$

Avec :

R_i : la r\u00e9sistance hydraulique globale de l'ouvrage i au sens du mod\u00e8le de Bouwer, en heures

On peut dire qu'un syst\u00e8me qui pr\u00e9sente une r\u00e9sistance hydraulique sup\u00e9rieure \u00e0 24h est un syst\u00e8me en dysfonctionnement (Gautier, 1998 et Dechesne, 2002).

Sur des ouvrages \u00e0 la source comme des puits, tranch\u00e9es ou noues

$$IS_{HYD2} = \text{Max}_i (Ks_i) \quad (\text{en m/s, Pr\u00e9f\u00e9rence croissante, }]0, +\infty [) \quad (\text{\u00c9quation 2.3})$$

Avec :

Ks_i : la conductivit\u00e9 hydraulique de l'ouvrage i \u00e0 saturation mesur\u00e9e *in situ* (en m/s)

Si l'on s'appuie sur la litt\u00e9rature faisant la plupart du temps r\u00e9f\u00e9rence \u00e0 des limites applicables en conception (limite \u00e0 partir de laquelle il est raisonnable de ne pas infiltrer), on suppose g\u00e9n\u00e9ralement qu'un syst\u00e8me pr\u00e9sentant conductivit\u00e9 hydraulique \u00e0 saturation (mesur\u00e9e en diff\u00e9rents points) inf\u00e9rieure \u00e0 10^{-6} m/s dysfonctionne (Wong, 2006 ; CIRIA, 1996 ; Ellis, 2000 ; Azzout *et al.*, 1994).

Sur des am\u00e9nagements mixtes comportant des ouvrages de grandes tailles et des ouvrages \u00e0 la source

$$IS_{HYD2} = \text{Max}_i (Ind_i) \quad (\text{Adimensionnel, Pr\u00e9f\u00e9rence croissante, } \{0, 1\}) \quad (\text{\u00c9quation 2.4})$$

Avec :

Ind_i : Indicateur partiel indiquant si le colmatage est av\u00e9r\u00e9 ou non

Cet indicateur partiel prend la valeur 0 ou 1. Si le colmatage n'est pas av\u00e9r\u00e9 $Ind_i = 1$, sinon $Ind_i = 0$. Sur des ouvrages importants de type bassins d'infiltration le colmatage sera av\u00e9r\u00e9 si la r\u00e9sistance hydraulique globale au sens de Bouwer est sup\u00e9rieure \u00e0 24 h. Sur des ouvrages \u00e0 la source, le colmatage sera av\u00e9r\u00e9 si la conductivit\u00e9 hydraulique \u00e0 saturation est inf\u00e9rieure \u00e0 10^{-6} m/s.

2.2.1.3 Consid\u00e9rations sur l'\u00e9valuation et m\u00e9thodes d'estimation

L'indicateur de fréquence de débordement est calculé à partir des inondations observées *in situ* et de la fréquence de dimensionnement de l'ouvrage.

Suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier important

Quant au suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier important, la résistance hydraulique est calculée à partir du modèle de Bouwer (2002). Pour cela des mesures du débit entrant dans le bassin d'infiltration, de la hauteur d'eau dans le bassin et de la température de l'eau entrant doivent être effectuées, avec un pas de temps réduit. La topographie du bassin doit, elle aussi, être connue pour l'établissement de relations entre la hauteur d'eau dans le bassin et le volume stocké et entre la hauteur d'eau dans le bassin et la surface qui contribue à l'infiltration. Ces données topographiques sont disponibles au moment de la conception et sont globalement réutilisables.

La résistance hydraulique représente la durée nécessaire à une quantité unitaire d'eau pour passer à travers la couche colmatée sous une charge unitaire (Bouwer, 2002).

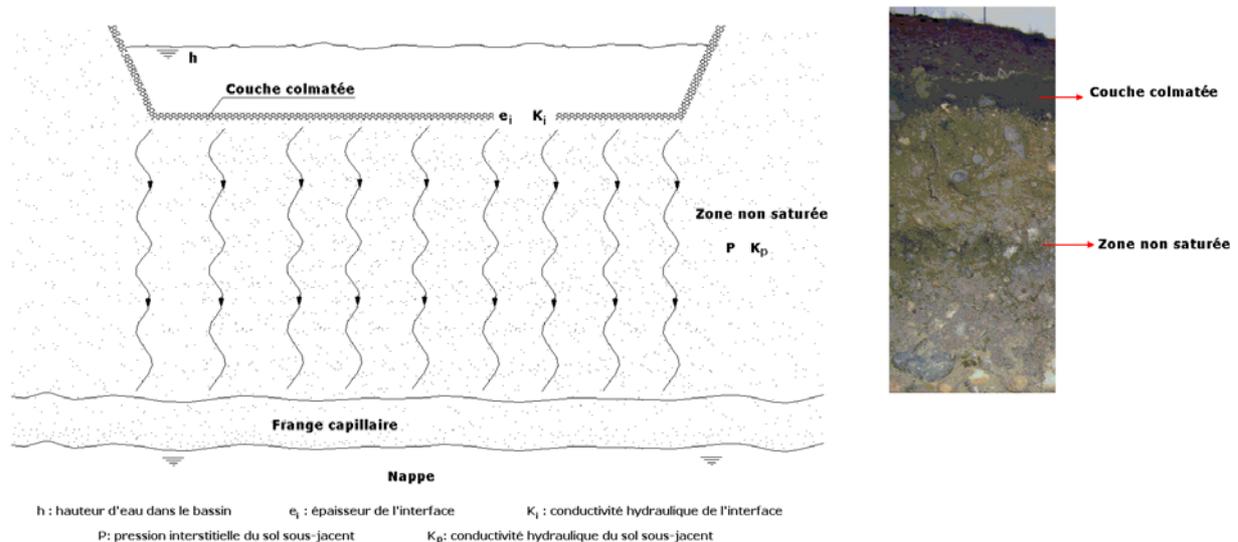


Figure 2.1 – Représentation et notation du système au sens du modèle de Bouwer (Bouwer, 2002)

Bouwer fait l'hypothèse que le sol sous-jacent est non saturé si la conductivité hydraulique K_c de l'interface est suffisamment faible pour que la vitesse d'infiltration soit inférieure à la conductivité hydraulique dans le sol. Ceci est valable à condition que la nappe soit profonde et que le fond du bassin soit au-dessus de la frange capillaire. Le flux dans le sol sous-jacent est alors uniquement dû à la gravité. L'infiltration est verticale et le gradient hydraulique est unitaire. La pression interstitielle P est constante entre l'interface et la frange capillaire.

La vitesse d'infiltration v peut alors être exprimée à partir de la loi de Darcy, sous la forme :

$$v = K_c \frac{h_0 + e - h_{cr}}{e} \quad (\text{Équation 2.5})$$

Avec :

v : la vitesse d'infiltration, en m/s

K_c : conductivité hydraulique de la couche colmatée, en m/s

h_0 : hauteur d'eau dans le bassin, en m

e : épaisseur de la couche colmatée, en m

h_{cr} : charge de pression dans la zone non saturée, en m

La charge de pression dans la zone non saturée peut être estimée par rapport au type de sol : les ordres de grandeurs pour h_{cr} proposés par Bouwer (1969) sont d'environ -20 cm pour des sols grossiers et des sables moyens, de -50 à -100 cm pour des sables fins et sols limoneux grossiers et d'environ -150 cm pour des limons et des argiles.

En faisant comme hypothèse que l'épaisseur de la couche colmatée est très faible par rapport à l'hauteur d'eau dans le bassin on obtient l'équation de vidange suivante :

$$v = K_c \frac{h_0 - h_{cr}}{e} \quad (\text{Équation 2.6})$$

La résistance hydraulique est donc, le regroupement de l'épaisseur de la couche colmatée sur sa conductivité hydraulique.

$$v = \frac{h_0 - h_{cr}}{R} \quad (\text{Équation 2.7})$$

La résistance hydraulique peut alors être calée par la méthode des moindres carrés en minimisant la fonction critère suivante :

$$C = \sum_{i=1}^n (Q_{inf_i} - Q_{bouwer_i})^2 = \sum_{i=1}^n \left[Q_{inf_i} - \left(\frac{h_i - h_{cr}}{R} \cdot S(h_i) \right) \right]^2 \quad (\text{Équation 2.8})$$

Avec :

n : nombre de points de mesures

R : résistance hydraulique à caler, en h

Q_{inf} : débit mesuré, en m³/s

$S(h_i)$: surface d'infiltration, en m²

h_i : hauteur d'eau dans le bassin

h_{cr} : charge hydraulique dans la zone non saturée

Le débit infiltré mesuré (Q_{inf}) à chaque instant est obtenu à partir des mesures des débits entrant dans le bassin d'infiltration et des mesures de hauteurs d'eau dans le bassin :

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_e(t) - Q_{inf}(t) \quad (\text{Équation 2.9})$$

Avec :

$V(t)$: volume stocké à l'instant t , en m^3

$Q_e(t)$: débit mesuré entrant dans le bassin, en m^3/s

$Q_{inf}(t)$: débit infiltré, en m^3/s

Le volume d'eau dans le bassin est calculé à partir des données topographiques, permettant la définition d'une équation de stockage entre l'hauteur d'eau dans le bassin et le volume. La surface du bassin qui contribue à l'infiltration est, elle aussi, obtenue à partir des données topographiques, pour chaque hauteur d'eau dans le bassin.

La résistance hydraulique est ensuite corrigée, en fonction de la température de l'eau, selon l'équation.

$$R[20^\circ\text{C}] = \frac{\nu_w[20^\circ\text{C}]}{\nu_w[x^\circ\text{C}]} R[x^\circ\text{C}] \quad (\text{Équation 2.10})$$

Avec :

$R[20^\circ\text{C}]$: résistance hydraulique normée à 20°C

$R[x^\circ\text{C}]$: résistance hydraulique à la température de l'eau lors de l'événement

$\nu[20^\circ\text{C}]$: viscosité cinématique à 20°C ($1.005 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

$\nu[x^\circ\text{C}]$: viscosité cinématique à la température moyenne de l'eau lors de l'événement

Suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier

Pour le suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier sa conductivité hydraulique à saturation doit être mesurée. Pour cela deux méthodes peuvent être appliquées : l'infiltromètre à anneau simple peu profond ou l'infiltromètre à anneau profond, ce dernier peut être appliqué seulement aux

systèmes d'infiltration qui possèdent une couche de gravier (Le Coustumer, 2008). On trouvera dans Le Coustumer (2008) le détail et le test de ces méthodes sur des dispositifs d'infiltration à la source.

2.2.1.4 Exemples

Indicateur de fréquence de débordement

Sur les tests effectués à partir d'ouvrages existants (bassins de Centre Routier, Droits de l'Homme et ZAC du Chêne), aucun ouvrage n'a débordé. Les indicateurs seront donc égaux à 0.

Suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier de grande taille

Les résistances hydrauliques des bassins de Centre Routier, Droits de l'Homme et ZAC du Chêne ont été calculées par Dechesne (2002) et sont reportés au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 – Résistances hydrauliques calculés par des bassins de l'est lyonnais, d'après Dechesne (2002)

Bassin	Résistance hydraulique (h)	Coefficient de variation	Indicateur
Centre Routier	0,893	2%	$IS_{HYD2}=0,893$
Droits de l'Homme	0,806	34%	$IS_{HYD2}=0,806$
ZAC du Chêne	1,100	15%	$IS_{HYD2}=1,1$

Pour les trois bassins présentés dans le Tableau 2.1 nous pouvons en conclure que leur fonctionnement est correct et semblable. Leurs résistances hydrauliques ont le même ordre de grandeur et restent très inférieures à 24 heures.

Suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier de drainage à la source

Le Coustumer (2008) a fait des suivis de colmatage sur des biofiltres en Australie. Il a effectué des mesures de la conductivité hydraulique à saturation par les deux méthodes énoncés au § 2.2.1.3. Nous reprenons ici ses résultats de test *in situ*.

Les résultats des tests d'infiltration pour chaque site, avec l'infiltromètre à anneau simple peu profond sont présentés dans le Tableau 2.2. Pour chaque biofiltre testé, le nombre de tests effectués dans le système, la conductivité hydraulique moyenne (K_{fs}), l'incertitude relative sur cette mesure ($u_r(K)$) et le coefficient de variation (Cv) sont présentés.

Tableau 2.2 - Résultats des tests d'infiltration peu profond (Le Coustumer, 2008)

Sites	biofiltre numéro	Quantité de mesures	K_{fs} (m/s)	$u_r(K)$ (%)	C_v (%)
Streisand Dr, Brisbane	1	2	$1,7 \times 10^{-5}$	29	
Saturn Cr, Brisbane	1	3	$9,4 \times 10^{-6}$	20	16
Donnelly Pl, Brisbane	1	3	$5,3 \times 10^{-6}$	22	58
Hoyland Dr, Brisbane	1	6	$5,7 \times 10^{-5}$	16	59
	1	4	$1,6 \times 10^{-5}$	30	34
Monash Car park, Clayton	2	3	$2,8 \times 10^{-5}$	22	58
	3	3	$1,3 \times 10^{-5}$	20	33
	1	2	$2,0 \times 10^{-5}$	31	
	2	1	$1,7 \times 10^{-4}$	34	
	3	1	$3,6 \times 10^{-5}$	34	
	4	1	$8,8 \times 10^{-5}$	34	
Cremorne St, Richmond	6	1	$2,7 \times 10^{-5}$	32	
	7	3	$3,3 \times 10^{-5}$	25	29
	8	2	$1,5 \times 10^{-5}$	26	
	9	3	$2,4 \times 10^{-5}$	25	55
	1	2	$1,4 \times 10^{-5}$	27	
	2	1	$9,7 \times 10^{-6}$	34	
Aleyne St, Chelsea	3	1	$1,4 \times 10^{-6}$	29	
	4	3	$5,3 \times 10^{-6}$	30	140
	1	2	$3,9 \times 10^{-5}$	25	
Point Park, Docklands	2	3	$3,8 \times 10^{-5}$	20	28
Hamilton St, W. Brunswick	1	3	$1,0 \times 10^{-5}$	14	52

	2	1	$3,8 \times 10^{-5}$	34	
	1	1	$3,6 \times 10^{-6}$	36	
Avoca Cr, Pascoe Vale	2	1	$7,2 \times 10^{-6}$	34	
	3	1	$1,2 \times 10^{-5}$	34	
	1	1	$6,7 \times 10^{-6}$	34	
Parker St, Pascoe Vale	2	3	$5,3 \times 10^{-6}$	21	46
	3	1	$1,1 \times 10^{-5}$	34	
Ceres, West Brunswick	1	4	$2,7 \times 10^{-5}$	19	63
Bourke St tree pit, Melbourne	1	3	$2,3 \times 10^{-5}$	23	78
Hallam Bypass, Floret Pl	1	2	$4,3 \times 10^{-5}$	24	
Hallam Bypass, Wanke Rd	1	3	$3,2 \times 10^{-5}$	22	55
Hallam Bypass, Wanke Rd basin	1	2	$5,6 \times 10^{-5}$	27	
Wolseley Pd, Vic Park	1	5	$1,2 \times 10^{-4}$	11	80
Leyland Gr, Vic Park	1	5	$1,1 \times 10^{-4}$	12	21

Nous pouvons observer que aucun biofiltre n'est colmaté, ils présentent des conductivités hydrauliques supérieures à 10^{-6} m/s.

Les résultats des tests d'infiltration pour chaque site, effectués par la méthode de l'infiltromètre à anneau profond sont présentés dans le Tableau 2.3. Pour chaque biofiltre testé, le nombre de tests effectués dans le système, la conductivité hydraulique moyenne (K_{fs}), l'incertitude relative sur cette mesure ($u_r(K)$) et le coefficient de variation (Cv) sont présentés.

Tableau 2.3 - Résultats des tests d'infiltration profond (Le Coustumer, 2008)

Sites	biofiltre numéro	Quantité de mesures	K_{fs} (m/s)	$u_r(K)$ (%)	C_v (%)
Streisand Dr, Brisbane	1	2	$8,9 \times 10^{-6}$	99	
Saturn Cr, Brisbane	1	3	$1,1 \times 10^{-5}$	10	67
Donnelly Pl, Brisbane	1	2	$1,8 \times 10^{-5}$	12	
Hoyland Dr, Brisbane	1	3	$1,9 \times 10^{-4}$	6	32
Monash Car park, Clayton	1	1	$1,9 \times 10^{-5}$	14	
	2	1	$2,4 \times 10^{-5}$	13	
	3	1	$1,5 \times 10^{-5}$	15	
Cremorne St, Richmond	1	1	$1,1 \times 10^{-4}$	12	
	2	1	$1,2 \times 10^{-4}$	10	
	3	1	$7,4 \times 10^{-5}$	9	
	4	1	$7,8 \times 10^{-5}$	12	
	6	1	$2,8 \times 10^{-5}$	17	
	7	3	$5,6 \times 10^{-5}$	9	32
	8	1	$5,6 \times 10^{-5}$	17	
	9	3	$3,9 \times 10^{-5}$	11	54
	Aleyne St, Chelsea	1	1	$1,4 \times 10^{-6}$	50
2		2	$1,7 \times 10^{-6}$	39	
3		1	$2,5 \times 10^{-6}$	79	
4		1	$2,2 \times 10^{-6}$	50	
Point Park, Docklands	1	1	$8,9 \times 10^{-5}$	7	
	2	2	$2,1 \times 10^{-5}$	47	
Hamilton St, W. Brunswick	1	1	$1,9 \times 10^{-6}$	76	

	2	1	$3,1 \times 10^{-6}$	63	
	1	1	$3,1 \times 10^{-6}$	47	
Avoca Cr, Pascoe Vale	2	1	$2,8 \times 10^{-6}$	51	
	3	1	$1,7 \times 10^{-6}$	59	
	1	1	$6,4 \times 10^{-6}$	30	
Parker St, Pascoe Vale	2	3	$1,6 \times 10^{-5}$	13	48
	3	1	$2,8 \times 10^{-7}$	138	
Ceres, West Brunswick	1	4	$1,7 \times 10^{-5}$		73
Wolseley Pd, Vic Park - 1 pod	1	5	$1,2 \times 10^{-4}$	5	80
Leyland Gr, Vic Park	1	5	$1,1 \times 10^{-4}$	4	21
Tanzanite St, 2 nd Pond Creek	1	9	$1,4 \times 10^{-6}$	21	67

Nous pouvons observer que 1 biofiltre est colmaté, il présente une conductivité hydraulique inférieure à 10^{-6} m/s.

2.2.1.5 Qualité de l'indicateur

Indicateur de fréquence de débordement

L'incertitude dans le calcul de l'indicateur de fréquence de débordement doit être calculée au cas par cas. Le calcul de cette incertitude est fait à partir de la loi de propagation des incertitudes et prend la forme suivante supposant les fréquences de débordement et de conception indépendantes statistiquement :

$$u(IS_{HYD1}) = \sqrt{\left(\frac{1}{F_{dim}}\right)^2 u(F_{deb})^2 + \left(-\frac{F_{deb}}{(F_{dim})^2}\right)^2 u(F_{dim})^2} \quad (\text{Équation 2.11})$$

Avec :

$u(IS_{HYD1})$: incertitude de l'indicateur de fréquence de débordement

F_{dim} : fréquence de dimensionnement de l'ouvrage, an^{-1}

$u(F_{deb})$: incertitude sur la fréquence de débordement observée

F_{deb} : fréquence de débordement observée, an^{-1}

$u(F_{dim})$: incertitude sur la fréquence de dimensionnement de l'ouvrage

La qualité globale de l'indicateur de fréquence de débordement est évaluée selon les critères proposés par Labouze & Labouze (1995). Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 – Evaluation de l'indicateur de fréquence de débordement -critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	++	+++	+++	+++	+++	+++

L'indicateur de fréquence de débordement ne présente pas de défaillance selon les critères observés.

Suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier de grande taille

L'estimation des incertitudes dans le calcul de l'indicateur de suivi de la performance hydraulique pour les ouvrages de grande taille ne peut pas utiliser la méthode classique de la loi de propagation des incertitudes. R est en effet le résultat de la recherche du minimum de la fonction critère présentée dans l'Equation 3.65. Afin d'évaluer l'incertitude sur un paramètre de calage d'autres méthodes, (comme la méthode de Monte Carlo, par exemple) doivent être utilisées et ont été développées sur ce cas précis par Le Coustumer (2008). Le Coustumer (2008) a estimé l'incertitude dans la résistance hydraulique d'un ouvrage à environ 30%.

Les résultats de l'estimation de la qualité globale de l'indicateur de suivi de la performance hydraulique sont présentés dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 – Evaluation de l'indicateur de la performance hydraulique pour des ouvrages de grandes tailles et pour des dispositifs à la source- critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Ouvrages	Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
grande taille	+++	+	+++	+++	+++	+++	+++
à la source	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++

Pour les ouvrages de grandes tailles, cet indicateur a une accessibilité moyenne car les observations des volumes entrants et des hauteurs d'eau dans les systèmes d'infiltration ne sont pas toujours disponibles et demandent des suivis importants.

Suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier de drainage à la source

Pour les ouvrages à la source les incertitudes sur la mesure de la conductivité hydraulique prennent en compte les incertitudes expérimentales.

En ce qui concernent les tests d'infiltration peu profond, les incertitudes estimées sur les différentes valeurs mesurées sont les suivantes : Volume mesuré : $u(V) = 10 \text{ mL}$, Durée : $u(t) = 2 \text{ s}$, Rayon de l'anneau : $u(a) = 2 \text{ mm}$, Profondeur d'insertion de l'anneau : $u(d) = 1 \text{ cm}$ et Hauteur d'eau dans le cylindre : $u(H) = 5 \text{ mm}$.

Pour les tests d'infiltration profond les incertitudes sur la mesure de la conductivité hydraulique prennent en compte les incertitudes expérimentales. Les incertitudes estimées sur les différentes valeurs mesurées sont les suivantes : Volume mesuré : $u(V) = 10 \text{ mL}$, Durée : $u(t) = 5 \text{ s}$, Rayon de l'anneau : $u(a) = 2 \text{ mm}$, Profondeur du media : $u(L) = 50 \text{ mm}$ et Hauteur d'eau dans le cylindre : $u(H) = 20 \text{ mm}$.

L'estimation des incertitudes dans le calcul de l'indicateur de suivi de la performance hydraulique pour les dispositifs à la source est classique et se situe aux alentours de $\pm 30\%$ ($\pm 33\%$ pour les tests d'infiltration profond et $\pm 26\%$ Pour les tests d'infiltration peu profond - Le Coustumer, 2008).

Notons que l'on pourrait tenter d'utiliser des mesures de conductivités hydrauliques sur de grands ouvrages de manière à rendre l'indicateur encore plus accessible. Les tests n'ont cependant pas été menés car les problèmes de répartition spatiale ne sont pas immédiats à traiter.

2.2.2 Ne pas dégrader la qualité de la nappe

2.2.2.1 Considérations

Cette performance doit refléter le fait que le système d'infiltration ne doit pas détériorer la qualité de la nappe.

2.2.2.2 Définition retenue

La définition retenue est issue des réflexions qui ont été menées dans le cadre du projet MGD infiltration notamment par les hydrobiologistes du groupe de travail.

En effet, les eaux de ruissellement pluvial sont généralement faiblement minéralisées (conductivité électrique $< 100 \mu\text{S/cm}$) et saturées en oxygène dissous. Malgré une forte variabilité régionale de la composition physico-chimique des nappes phréatiques, les eaux souterraines présentent généralement une minéralisation bien supérieure à celle des eaux de ruissellement pluvial.

De nombreuses nappes phréatiques sont également sous-saturées en oxygène dissous, à l'exception des nappes phréatiques profondes surmontées par une zone non saturée épaisse (> 10 m). Lors des épisodes pluvieux, l'écoulement des eaux de ruissellement pluvial doit donc générer dans la nappe à l'aplomb des bassins d'infiltration un nuage d'eau faiblement minéralisée et oxygénée.

Dans des conditions de mesure satisfaisantes (c'est à dire piézomètre de suivi recoupant effectivement le panache d'eau pluviale) et lors d'épisodes pluvieux :

- l'absence d'une baisse de conductivité dans la nappe ou l'augmentation de la conductivité de la nappe phréatique est un signe de dysfonctionnement dont il s'agira d'étudier les causes (par exemple déversement accidentel ou régulier d'eau usée, augmentation excessive de la minéralisation des eaux d'infiltration dans le sol). Nous nommerons cette situation : situation A.
- l'absence d'une hausse de la concentration en oxygène dissous (dans le cas d'une nappe sous-saturée en oxygène dissous) ou la baisse de la concentration en oxygène dissous dans une nappe saturée en oxygène dissous est également un signe de dysfonctionnement dont il s'agira d'étudier les causes (par exemple consommation excessive d'oxygène dissous provenant de l'oxydation de matières organiques véhiculées par les eaux de ruissellement ou retenues au sein de l'interface ouvrage / sol). Nous nommerons cette situation : situation B.

La mesure de la conductivité électrique et de l'oxygène dissous relève d'une approche globale qui permet à moindre coût d'évaluer le bon fonctionnement d'un système d'infiltration. Répétée au cours de la vie d'un ouvrage (ou mieux mesurée en continu) cette procédure doit également permettre de détecter une dérive du fonctionnement. Elle doit être perçue par l'utilisateur comme une mesure de type « témoin lumineux » dont les résultats dicteront la nécessité de déclencher des études plus précises afin d'expliquer des anomalies observées. Cette mesure ne se substitue pas aux nécessaires prélèvements d'eau de nappe, qui seuls permettront de révéler la présence éventuelle de polluants apportés par l'infiltration des eaux de ruissellement pluvial. Cependant, ces campagnes d'analyses ne seront déclenchés que lorsque le fonctionnement sera jugé suspect.

L'indicateur reçoit une notation binaire selon la situation où l'ouvrage se trouve :

Si l'on se trouve dans la situation A ou B alors IS_{NAPPE} indiquera « *un fonctionnement anormal à surveiller et à analyser plus finement* »

$$IS_{NAPPE} = 0$$

sinon IP_{NAPPE} indiquera « un fonctionnement attendu, à surveiller normalement »

$$IS_{NAPPE} = 1$$

2.2.2.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Des suivis d'oxygène dissous et de conductivité électrique doivent être faits. Ces suivis sont normalement faits par de sondes multiparamètres.

2.2.2.4 Exemples

L'indicateur de qualité de la nappe a été appliqué et testé à partir de chroniques réalisées par l'équipe « Hydrobiologie et Ecologie Souterraines » du Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux (UMR CNRS 5023) de l'Université Claude Bernard dans le cadre de l'OTHU. Nous allons présenter 4 exemples de fonctionnement distincts qui peuvent être observés dans les systèmes et montrer comme peut être évalué l'indicateur et ce qu'il permet de détecter.

Bassin ZAC du Chêne

L'évaluation de l'indicateur est basée sur l'analyse des chroniques présentées en Figure 2.2.

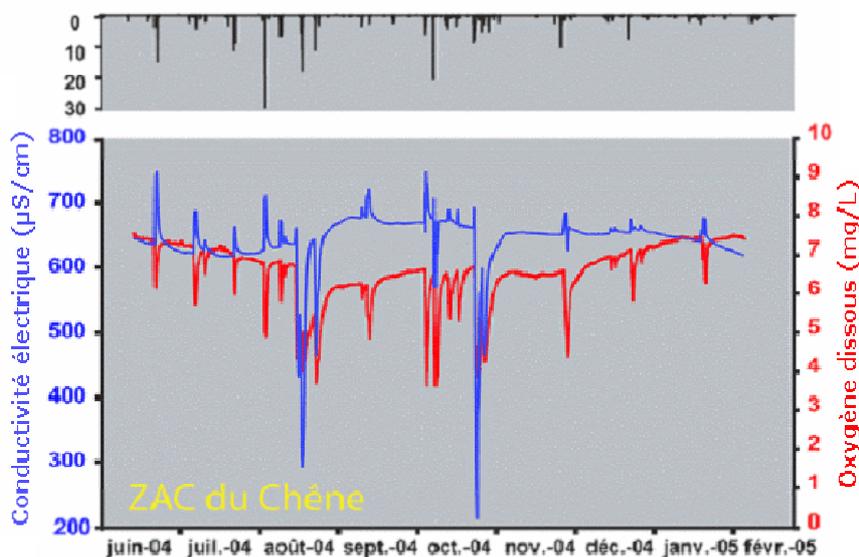


Figure 2.2 – Enregistrement en continu (pas de temps horaire) de la conductivité électrique (bleu) et de la concentration en oxygène dissous (rouge) des eaux de la nappe phréatique à l'aplomb hydraulique du bassin de ZAC du Chêne (Malard, 2005 *apud* Perrodin *et al.*, 2005)

Des dysfonctionnements répétés sont observés (Figure 2.2) :

- Le bassin de ZAC du Chêne présente une minéralisation excessive des eaux d'infiltration et une consommation excessive d'oxygène dissous lors de tous les épisodes pluvieux.

- La plupart des épisodes pluvieux génèrent une hausse de conductivité de la nappe (malgré une conductivité initiale de 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et tous entraînent une baisse de l'oxygène dissous (nappe à saturation en conditions normales). La nature des apports au bassin (mélange eau pluviale / eau usée) et l'état de l'interface ouvrage / sol (épaisse accumulation de sédiments urbains organiques) mériteraient d'être étudiés (Malard, 2005 *apud* Perrodin *et al.*, 2005).

L'examen des chroniques indique donc « *un fonctionnement anormal à surveiller et à analyser plus finement* ».

$$IS_{\text{NAPPE}} = 0$$

Bassin de l'IUT

L'évaluation de l'indicateur est basée sur l'analyse des chroniques présentées en Figure 2.3.

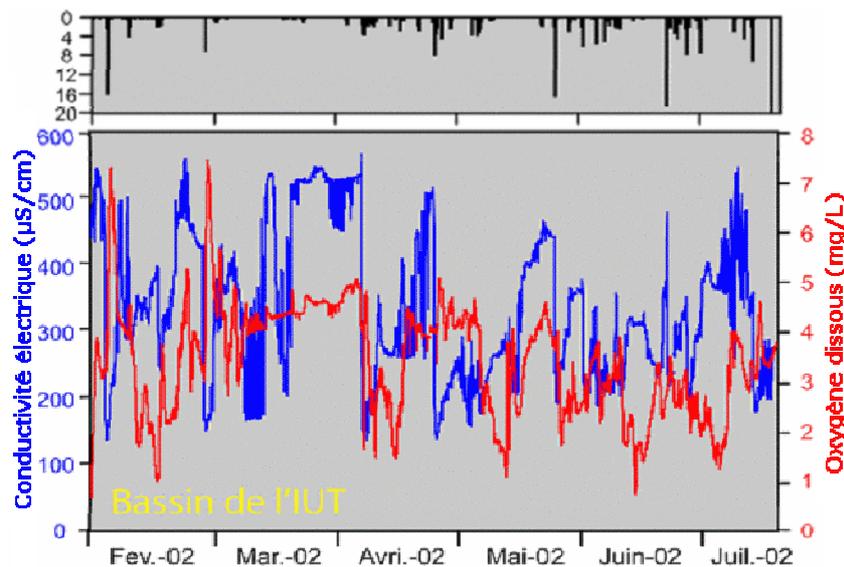


Figure 2.3 – Enregistrement en continu (pas de temps horaire) de la conductivité électrique (bleu) et de la concentration en oxygène dissous (rouge) des eaux de la nappe phréatique à l'aplomb hydraulique du bassin de l'IUT (Malard, 2005 *apud* Perrodin *et al.*, 2005)

D'après la Figure 2.3 nous pouvons observer des dysfonctionnements temporaires avec une consommation excessive d'oxygène dissous lors des épisodes pluvieux chauds.

Les épisodes pluvieux entraînent également une baisse prononcée de la conductivité électrique. Les épisodes pluvieux froids engendrent une oxygénation de la nappe phréatique (nappe sous-saturée en oxygène dissous). Par contre, les épisodes pluvieux chauds induisent une baisse de la concentration en oxygène dissous dans la nappe. Datry (2003) a démontré que cette baisse était imputable à une consommation excessive de l'oxygène des eaux pluviales au niveau de l'interface ouvrage / sol très organique (curage nécessaire).

L'examen des chroniques indique donc « *un fonctionnement anormal à surveiller et à analyser plus finement* ».

$$IS_{\text{NAPPE}} = 0$$

Bassin de Granges Blanches

L'évaluation de l'indicateur est basée sur l'analyse des chroniques présentées en Figure 2.4.

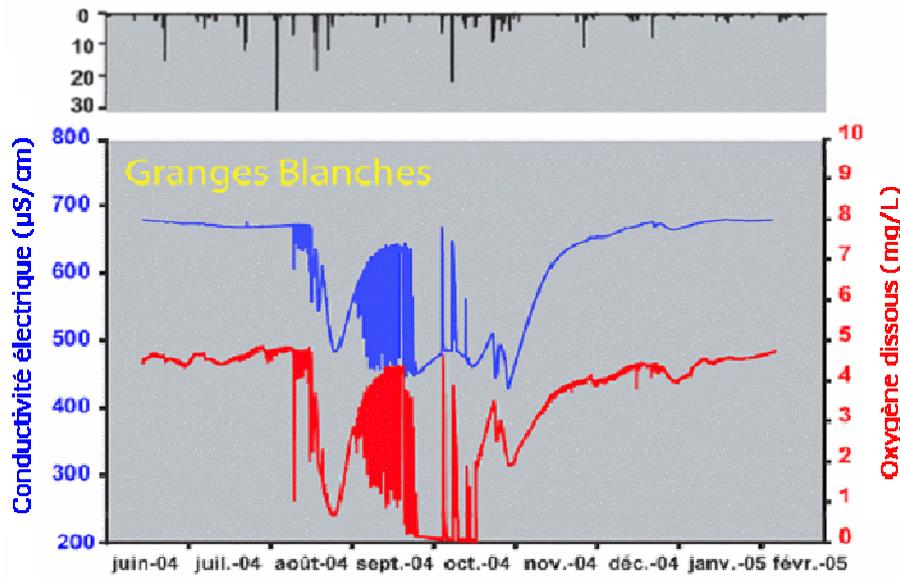


Figure 2.4 – Enregistrement en continu (pas de temps horaire) de la conductivité électrique (bleu) et de la concentration en oxygène dissous (rouge) des eaux de la nappe phréatique à l'aplomb hydraulique du bassin de Granges Blanches (Perrodin *et al.*, 2005)

La Figure 2.4 montre un dysfonctionnement prolongé pour le bassin de Granges Blanches. Il présente une consommation excessive d'oxygène en été (anoxie estivale).

Les épisodes pluvieux chauds entraînent une baisse estivale prolongée de l'oxygène dissous à laquelle se surajoutent des fluctuations journalières de l'oxygène et de la conductivité. Les causes multiples incluent probablement des apports d'eau usée, un bassin présentant une zone non saturée insuffisante (< 1 m), et des pompages (irrigation) dans la nappe à proximité du bassin (Perrodin *et al.*, 2005).

L'examen des chroniques indique donc « *un fonctionnement anormal à surveiller et à analyser plus finement* ».

$$IS_{\text{NAPPE}} = 0$$

Nous pouvons observer d'après la Figure 2.5 que les épisodes pluvieux induisent une baisse de la conductivité électrique et n'entraîne pas de diminution importante de la concentration en oxygène dissous (nappe proche de la saturation en oxygène dissous).

L'examen des chroniques indique donc « *un fonctionnement attendu, à surveiller normalement* ».

$$IS_{\text{NAPPE}} = 1$$

Bassin de Django Reinhardt

L'évaluation de l'indicateur est basée sur l'analyse des chroniques présentées en Figure 2.5.

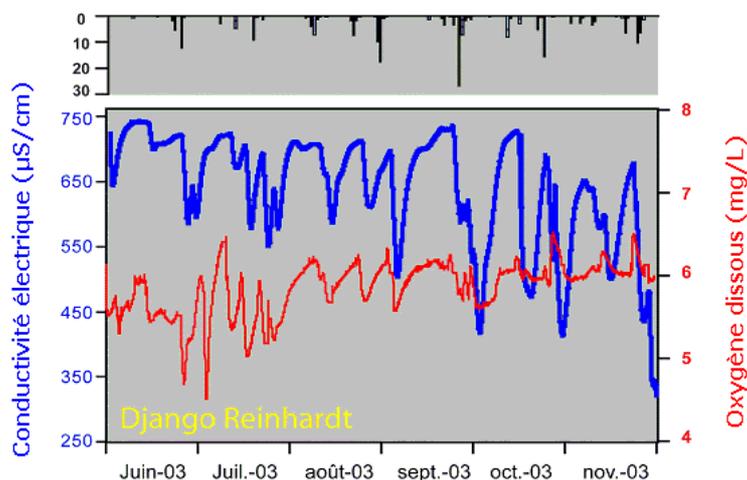


Figure 2.5 – Enregistrement en continu (pas de temps horaire) de la conductivité électrique (bleu) et de la concentration en oxygène dissous (rouge) des eaux de la nappe phréatique à l'aplomb hydraulique du bassin de Django Reinhardt (Perrodin *et al.*, 2005)

2.2.2.5 Qualité de l'indicateur

Aucune incertitude ne peut être associée à l'indicateur. Par contre les mesures en elles-mêmes sont entachées d'incertitudes, mais qui ne seront pas prises en compte dans l'agrégation des indicateurs, mais dans l'interprétation experte.

La qualité globale de l'indicateur de la performance « ne pas dégrader la qualité de la nappe » a été évaluée selon les critères proposés par Labouze & Labouze (1995). Les résultats sont donnés au Tableau 2.6.

Tableau 2.6 – Evaluation de l'indicateur de protection de la nappe - critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	++	++	+++	+++	++	+++

Des suivis des nappes avec sondes multiparamètres ne sont pas toujours effectués, engendrant un problème d'accessibilité de l'indicateur. Cependant pour de gros systèmes qui nécessitent le rendu d'informations sur le cadre de la surveillance au titre des dossiers d'autorisation, cette acquisition pertinente pourrait être généralisée.

2.2.3 Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas polluer le sol en profondeur)

2.2.3.1 Considérations

Cette performance est censée refléter le fait que le système d'infiltration est d'autant plus performant qu'il piège une bonne partie de la pollution, la retient le plus en surface possible et sur une étendue de sol la plus faible possible.

La performance est donc jugée d'autant meilleure que l'efficacité des systèmes de prétraitement (s'ils existent) est grande et que la pollution dans l'ouvrage d'infiltration est faible, superficielle et peu étendue pour des raisons de facilité d'entretien et de non contamination des sols en profondeur.

2.2.3.2 Définition retenue

Ainsi, si nous revenons aux considérations de départ, la performance est jugée d'autant meilleure que :

- l'efficacité des systèmes de prétraitement (s'ils existent) est grande et que
- la pollution dans l'ouvrage d'infiltration est faible, superficielle et peu étendue pour des raisons de facilité d'entretien et de non contamination des sols en profondeur.

Indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement

$IS_{PT} = \frac{Mp^{MES}}{Ma^{MES}} \quad (\text{Adimensionnel, Préférence croissante, } [0,1]) \quad (\text{Équation 2.12})$
--

Avec :

Mp^{MES} : masse de MES piégée par l'ouvrage de prétraitement sur une période donnée (durée de vie, durée de référence)

Ma^{MES} : masse de MES apportée à l'ouvrage de prétraitement sur la même période

Indicateur de contamination du sol

<p>IS_{SOL1} : profondeur à laquelle le sol atteint une pollution faible ou nulle caractérisée par $K_1 \in [1 - x, 1]$, (en cm, Préférence décroissante, $]0, +\infty [$)</p>

<p>IS_{SOL2} : pourcentage de points présentant une pollution importante</p>

(en %, Préférence décroissante, [0,100])

On considère que la pollution du sol est faible lorsque l'on a un fort pourcentage de polluants dont la concentration en différents points est supérieure à la valeur de référence.

$$K_1 = \frac{\# \text{cas} [C_{\text{mesi}} \leq C_{\text{tými}}]}{\#_{\text{totpol}}} \quad (\text{Équation 2.13})$$

Avec :

$\#_{\text{totpol}}$: nombre total de polluants considérés, en mg/kg

C_{mesi} : concentration du polluant i mesurée dans le sol, en mg/kg

$C_{\text{tými}}$: concentration du polluant i dans le sol avant la mise en service du système d'infiltration, en mg/kg

$\# \text{cas}$: nombre de polluants pour lesquels la condition $[C_{\text{mesi}} \leq C_{\text{tými}}]$ se présente

2.2.3.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement

L'indicateur d'efficacité de prétraitement sera calculé pour les systèmes dotés d'un prétraitement avec des données de concentrations ou de masses de MES et des données de débits qui rentrent et qui sortent de l'ouvrage de prétraitement, pendant une période donnée, avec un pas de temps réduit. L'estimation des masses en matières en suspension peut être effectuée à partir de mesures de turbidité d'eau en continu qui rentre et qui sort de l'ouvrage.

Une méthode d'estimation des masses de MES par voie optique à partir de mesures turbidimétriques a été développée par (Bertrand-Krajewski, 2007). Selon cette méthode les masses de MES peuvent être estimés en suivant les étapes :

- 1) Une loi d'étalonnage doit d'abord être construite entre les mesures de turbidité et des valeurs étalon mesurées en laboratoire. Il faut également évaluer les incertitudes type des coefficients d'ajustement et leurs covariances, afin de pouvoir par la suite évaluer les incertitudes des grandeurs corrigées.
- 2) Pour chaque grandeur étalonnée et à chaque pas de temps, la valeur estimée de turbidité est ensuite obtenue en appliquant la fonction inverse d'étalonnage du capteur concerné. La loi de propagation des incertitudes permet le calcul des incertitudes type associées.

3) Le calcul des masses de MES nécessite la connaissance des débits ainsi que l'estimation des concentrations en MES en continu. Les concentrations en MES sont estimées en continu à partir des mesures de turbidité corrigées. A partir de campagnes de mesure, et en appliquant la méthode de Williamson (Bertrand Krajewski, 2007 ; Williamson, 1968) des fonctions de corrélation MES-turbidité peuvent être déterminées. Les incertitudes types associées peuvent être calculées par des simulations de Monte Carlo.

4) La masse de MES est calculée, à chaque pas de temps, en multipliant la concentration en MES par le débit et en sommant selon les différents pas de temps. Les incertitudes type sont évaluées en utilisant la loi de propagation des incertitudes.

Indicateur de contamination du sol

Pour l'indicateur de contamination du sol, les mesures des polluants dans des échantillons de sol doivent être faites à différentes profondeurs. Ces mesures doivent être comparées à des mesures faites avant l'implantation de l'ouvrage.

A défaut de ces mesures, le sol témoin peut être pris comme un sol avec les mêmes caractéristiques que celui présent au dessous de l'ouvrage qui n'a pas subi l'effet de l'infiltration des eaux pluviales.

En ce qui concerne le nombre de points de prélèvements pour l'analyse des concentrations en polluants, Dechesne (2002) a effectué une analyse statistique afin de définir un nombre adéquat de points. Elle montre que 2 à 4 points de mesure sont nécessaires pour estimer les masses en polluants correctement, c'est-à-dire avec une incertitude relative moyenne de 10 à 33%. En outre, si le choix des points suit une stratégie raisonnée consistant à prendre un point très pollué (point d'entrée d'eau), le point le plus bas du système d'infiltration et un point quelconque, l'estimation de la pollution dans le système sera correcte.

2.2.3.4 Exemples

Indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement

Comme exemple nous allons montrer le calcul de l'indicateur pour le bassin de rétention/infiltration de Django Reinhardt, les détails de ce bassin peuvent être consultés à l'Annexe A. Des suivis en continu de la turbidité en entrée et en sortie du bassin de rétention ont été effectués de janvier/2004 à mars/2006. Pendant cette période le bassin de rétention a changé de configuration. Une compartimentation du bassin a été construite fin 2004. Nous allons donc avoir un calcul de l'indicateur pour ces deux périodes à savoir : avant et après construction du muret.

Les chroniques de turbidité sont transformées en masses, selon la procédure énoncé au § 2.2.3.3. Les masses calculées pour chaque période sont données au Tableau 2.7 et les efficacités de rétention des MES (indicateur d'efficacité de prétraitement) sont données au Tableau 2.8

Tableau 2.7 – Masses en matières en suspension entrant et sortant du bassin de rétention, Django Reinhardt

		Masse entrant (kg)	Masse sortant (kg)
Temps de pluie	Avant muret	26 872 ± 518	12 319 ± 830
	Après muret	30 314 ± 470	21 401 ± 700
Temps sec	Avant muret	1 513 ± 760	3 296 ± 819
	Après muret	735 ± 387	619 ± 419

Tableau 2.8 – Efficacité de piégeage de matières en suspension, Django Reinhardt

Indicateur	
IS _{PT} avant muret	0,45
IS _{PT} après muret	0,29

Notons que l'efficacité de piégeage des matières en suspension est supérieure avant le compartimentage du bassin de rétention, ce résultat doit être pris avec prudence, car les incertitudes dans les masses sont assez importantes et les chroniques présentent de nombreuses lacunes. Ainsi nous pouvons dire que les procédés se suivi doivent être encore améliorés.

Indicateur de contamination du sol

Pour effectuer le calcul de l'indicateur de contamination du sol des bassins de l'est lyonnais nous allons utiliser les concentrations en polluants dans un sol dit témoin qui a été échantillonné par Bedell *et al.* (2001) dans une zone non sollicitée par l'infiltration, à proximité du bassin d'infiltration de Django Reinhardt.

Les analyses ont été effectuées en triplicats, le Tableau 2.9 donne la moyenne et les coefficients de variation pour chaque métal lourd analysé.

Tableau 2.9 – Concentrations en polluants dans un sol témoin non pollué de l'est lyonnais

Métaux	Concentration Moyenne (mg/kg m.s.)	CV(%)	Concentration Médiane (mg/kg m.s.)	Concentration avec un intervalle de confiance à 75% (mg/kg m.s.)
Cd	0,47	12,37	0,50	0,50
Cr	44,33	36,53	36,00	56,25
Cu	90,33	154,05	12,00	191,25
Ni	14,67	17,16	15,00	16,50
Pb	43,67	147,43	7,00	90,25
Zn	104,00	88,40	56,00	171,50

Le calcul de K_1 peut donc être effectué. Pour cela nous prenons les concentrations en polluants mesurées à différentes profondeurs et comparons avec une valeur qui est, avec 75% de certitude la valeur maximale de la concentration du polluant i dans le sol témoin, c'est-à-dire la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 75%.

Le calcul de l'indicateur de contamination du sol a été effectué pour trois bassins de l'est lyonnais : Centre Routier, Droits de l'Homme et ZAC du Chêne. Les résultats des échantillonnages complets peuvent être consultés à l'Annexe A. Les résultats de l'indicateur sont présentés dans le Tableau 2.10.

Tableau 2.10 – Valeurs de K_1 et des indicateurs de contamination du sol

Bassin	K_1	IS_{SOL1}	IS_{SOL2}
Centre Routier	0,543	>110 cm	100%
Droits de l'Homme	0,587	>45 cm	100%
ZAC du Chêne	0,635	>60 cm	100%
ZAC de Pivolles	0,730	>90 cm	33%

L'indicateur IS_{SOL1} n'arrive pas à discriminer des situations différentes, mais nous ne pouvons pas incriminer ce problème à un manque de sensibilité, mais plutôt à un manque de données. En fait l'échantillonnage pour tous les bassins analysés n'a pas été effectué à une profondeur suffisante, le sol présentant toujours un niveau de pollution supérieur à celui du sol témoin. Quant à l'indicateur IS_{SOL2} il discrimine les situations : le bassin ZAC de Pivolles a un comportement très différents des autres bassins. Contrairement aux autres il infiltre les eaux sur une zone restreinte située en entrée de bassin.

2.2.3.5 Qualité de l'indicateur

Indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement

L'incertitude de l'indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement doit être calculé au cas par cas. Cette estimation doit être faite à chaque étape d'estimation de la masse de matières en suspension, (Cf. §2.2.3.3).

Les incertitudes sont donc obtenues pour chaque étape de calcul :

- L'incertitude sur turbidité mesurée par le capteur obtenue à partir de l'étalonnage ;
- Ces incertitudes sur turbidité et les incertitudes des mesures en laboratoire des matières en suspension sont utilisées dans la détermination des incertitudes de la relation $MES \times$ turbidité ;
- Pour que finalement l'incertitude sur les matières en suspension estimées soit calculée par la loi de propagation des incertitudes ;
- L'incertitude de la masse de matières en suspension peut ensuite être calculée en prenant compte de l'incertitude de la concentration en MES et de l'incertitude du débit mesuré.

Plus de détails sur l'estimation des MES par des mesures de turbidité et sur les calculs des incertitudes peuvent être consultés dans Bertrand-Krajewski *et al.*, 2007.

L'indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement a été évalué selon les critères de qualité proposés par Labouze & Labouze (1995). Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.11.

Tableau 2.11 – Evaluation de l'indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement - critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	++	+++	+++	++	+++	+++

Pour le calcul de cet indicateur les données sont rarement disponibles, principalement pour les systèmes autres que les bassins. Toutefois des mesures doivent être réalisées notamment pour le suivi de grands bassins qui font l'objet de procédure d'autorisation au titre de la loi sur l'eau.

Indicateurs de contamination du sol

Les indicateurs de contamination du sol présentent des incertitudes relativement faibles. En effet les incertitudes dans les concentrations en polluants dans les sols échantillonnés sont prises en compte en amont du calcul des indicateurs eux-mêmes, comme cela a été explicité dans le paragraphe 2.2.3.3. L'indicateur IS_{SOL2} , qui est celui de la profondeur à laquelle le sol ne présente plus de pollution, possède une incertitude liée seulement à la profondeur qui est estimée à 20 cm.

Une évaluation de la qualité des indicateurs de contamination du sol a été réalisée. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.12.

Tableau 2.12 – Evaluation des indicateurs de contamination du sol - critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Indicateur	Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
IS_{SOL1}	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++
IS_{SOL2}	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++

Des analyses physico-chimiques du sol ne sont pas souvent réalisées, toutefois ces analyses font partie intégrante d'une bonne surveillance des systèmes d'infiltration. Pour cela nous jugeons que ces indicateurs ont une accessibilité très satisfaisante. L'indicateur IS_{SOL1} présente un problème de sensibilité mais qui est dû à un échantillonnage en profondeur insuffisant ce problème ne doit plus apparaître, des analyses plus en profondeur sont recommandées au moins jusqu'à 1 mètre.

2.2.4 Etre maintenable facilement

2.2.4.1 Considérations

Cette performance a pour but d'estimer la facilité de la maintenance effectuée sur un système d'infiltration.

Les systèmes d'infiltration, comme toutes les infrastructures urbaines doivent être entretenues de façon à conserver leur bon fonctionnement. Cependant, il ne s'agit pas, pour cette performance de juger le bon fonctionnement qui est décliné dans les autres indicateurs mais bien d'identifier la facilité d'entretien et de maintenance des systèmes.

2.2.4.2 Définition retenue

Pour la performance « Etre maintenable facilement par l'organisation » deux grandeurs complémentaires sont proposées. La première est un simple descripteur qui évalue si les tâches de maintenance, ont bien été effectuées conformément aux prévisions ou aux règles de bonnes pratiques énoncées à un moment donné et si cela a posé des problèmes et lesquels. Il sert au gestionnaire de check-list et d'outils pour capitaliser la connaissance mais et ne doit pas être intégré aux autres indicateurs de performance. En effet ce n'est pas parce que toutes les tâches de maintenance ont bien été réalisées que le dispositif est facile à maintenir et qu'il fonctionne correctement. Par contre il pourra être mis en correspondance avec les autres indicateurs de performances pour identifier si l'entretien a pu jouer un rôle dans l'évolution du système.

Ce premier indicateur qui marque un état peut être exprimé de la manière suivante :

$IE_{\text{MAIN}} = \#_{\text{totali}} - \#_{\text{NONi}} \quad (\text{Adimensionnel, Pr\u00e9f\u00e9rence croissante, [0, \#_{\text{totali}}]) \quad (\text{\u00c9quation 2.14})$
--

Avec :

$\#_{\text{totali}}$: le nombre total de tâches de maintenance à effectuer pour l'ouvrage i

$\#_{\text{NONi}}$: le nombre total de tâches de maintenance non effectuées pour l'ouvrage i

La seconde grandeur est un indicateur de performance, basé sur les observations des dysfonctionnements *in situ*. Le principe consiste à considérer, en l'état actuel des informations, que si l'entretien a été fait et bien fait, alors l'entretien est facile.

$IS_{\text{MAIN}} = \#_{\text{dysi}} \quad (\text{Adimensionnel, Pr\u00e9f\u00e9rence d\u00e9croissante, [0, \#_{\text{dysi}}]) \quad (\text{\u00c9quation 2.15})$
--

Avec :

$\#_{\text{dysi}}$: le nombre total de dysfonctionnements observés sur une ouvrage de type i

Les dysfonctionnements à examiner sur chaque type d'ouvrage sont donnés au § 2.2.4.3.

2.2.4.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Pour chaque type de système, des tâches de maintenance différentes doivent être réalisées, avec une certaine périodicité. Des fiches de suivi de maintenance ont été construites avec les membres du groupe de travail et notamment les opérationnels. Elles listent les tâches à effectuer, leur périodicité et permettent d'identifier si ces tâches ont été effectuées et éventuellement pour quels motifs elles ne l'ont pas été. De manière récursive, l'analyse de suivi via ces fiches en forme de check-list doivent permettre d'ajuster ou de faire évoluer les tâches à effectuer et leur fréquence.

Le Tableau 2.13, présentent les fiches d'entretien pour la technique des bassins secs, à titre d'exemple. On trouvera à l'annexe B, celle relative aux autres techniques.

Tableau 2.13 – Fiche d’entretien pour les bassins

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Curage – enlèvement des sédiments du bassin de rétention	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage ou entretien des différents organes Régulateurs de débit Pompes Autres	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des ouvrages de prétraitement :	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire

Déssableurs		<input type="checkbox"/> Non applicable	nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?)		<input type="checkbox"/> compliqué	<input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire
Séparateurs à hydrocarbures					<input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Dangereux
Autres			<input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)			<input type="checkbox"/> Autre motif :
Entretien des espaces verts (si pertinent)	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau 2.13 – Fiche d’entretien pour les bassins (cont.)

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Grattage de la surface du bassin d’infiltration (si pertinent)	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d’accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d’œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Désherbage du fond et des berges (si pertinent)	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d’accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d’œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Ramassage des flottants, fauchage annuel des végétaux (pour les	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué	<input type="checkbox"/> Difficulté d’accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire

bassins en eau)		<input type="checkbox"/> Non applicable	nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Vidange pour curage et renouvellement de la masse d'eau (pour les bassins en eau)	Tous les 10 ans	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Autres tâches			<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Les dysfonctionnements qui peuvent être observés dans les systèmes d'infiltration sont listés dans le Tableau 2.14, séparément pour chaque type de technique.

Tableau 2.14 – Liste des dysfonctionnements qui pourront être observés

Bassins	
Aspect négligé (du bassin lui-même et des autres dispositifs)	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence d'érosion	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Revêtement en mauvais état	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence importante d'insectes	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence de flaques d'eau stagnante	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Autre :	

Chaussées	
Aspect négligé (de la chaussée ou des autres dispositifs)	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présente une déflexion significative	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence de cavités dans la chaussée	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence de fissures dans la chaussée	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence de flaques d'eau stagnante	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Autre :	

Fossés et Noues	
Aspect négligé (des fossés ou noues ou des autres dispositifs)	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence d'érosion	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Végétation en mauvais état (tonte non effectuée, sécheresse)	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence importante d'insectes	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence de flaques d'eau stagnante	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Autre	

Puits	
Aspect négligé (du puits ou des autres dispositifs)	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Revêtement de surface en mauvais état (tonte non effectuée, manque de partie du	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>

revêtement minérale, ...)	
Présence de flaques d'eau stagnante	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Autre	

Tranchées	
Aspect négligé (des fossés ou noues ou des autres dispositifs)	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence d'érosion	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Revêtement de surface en mauvais état (tonte non effectuée, manque de partie du revêtement minérale, ...)	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence importante d'insectes	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence de flaques d'eau stagnante	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Autre :	

2.2.4.4 Qualité de l'indicateur

Les incertitudes sur l'indicateur de dysfonctionnement est liée à l'aspect subjectif de son évaluation, chaque intervenant peut juger différemment les différents critères. Nous considérons qu'entre deux différents intervenants une différence de 1 point dans l'indicateur est raisonnable.

Des tests ont été effectués avec l'indicateur de performance. Quatre personnes ont rempli la liste de dysfonctionnements d'un site donné. Les résultats sont donnés dans le Tableau 2.15.

Tableau 2.15 – Evaluation de l'indicateur de performance de maintenance par quatre différentes personnes

Bassins	P1	P2	P3	P4
Aspect négligé (du bassin lui-même et des autres dispositifs)	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>			
Présence d'érosion	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>			
Revêtement en mauvais état	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>			
Présence importante d'insectes	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>
Présence de flaques d'eau stagnante	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
IS _{MAIN}	3	1	3	1

Nous pouvons observer que l'interprétation personnelle est assez variable d'une personne à une autre. Pour le cas de la présence de flaque est flagrant. Certains considèrent qu'une flaque d'eau est normale sur un ouvrage qui peut se mettre en eau, alors que d'autres considèrent que cela marque un dysfonctionnement. Pour pallier ce problème on peut imaginer que ces aspects soient débattus et précisés au sein du service de maintenance.

L'indicateur maintenance a été évalué selon les critères de qualité proposés par Labouze & Labouze (1995). Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.11.

Tableau 2.16 – Evaluation de l'indicateur de maintenance - critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+	++	++	+	+	+++	+++

Cet indicateur nécessitera à terme une rédefinition.

2.2.5 Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels

2.2.5.1 Considérations

Cette performance vise à juger l'aptitude d'un ouvrage ou d'un aménagement à être sûr aussi bien pour les usagers (quand les dispositifs sont plurifonctionnels et ouverts au public), pour les riverains, qui peuvent être impactés par l'ouvrage que pour les personnels en charge de l'entretien.

La santé et sécurité des personnes liées aux ouvrages d'infiltration sont très souvent négligées, cependant la question des risques d'accidents et des risques sanitaires liés à ces systèmes doit être posée. Les risques d'accidents sont principalement liés à la structure des dispositifs ou aménagements. Les risques sanitaires sont relatifs à la pollution des systèmes (celle qui s'est déposée dans les systèmes et qui peut être entraînée par l'air ou celle qui est liée au contact avec le sol contaminé). Il faut en effet considérer que l'environnement est un des déterminants de la santé publique. L'air et le sol sont des compartiments de l'environnement, mais aussi des vecteurs d'exposition des populations pour de nombreuses sources, naturelles ou anthropiques.

La performance du système est d'autant meilleure que le système ne présente pas de danger sur le plan sanitaire (pouvant venir de la pollution de l'air ou du sol que ce soit pour le personnel ou les usagers) et peu de risque lié à sa structure.

2.2.5.2 Définition retenue

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers

Il est basé sur la concentration moyenne en polluant mesurée sur les 30 premiers centimètres du sol. Cette performance est toujours définie à partir de deux composants, K_3 et K_4 . Le premier est lié au pourcentage de polluants dont la concentration est inférieure aux valeurs seuils ici dénommées $S_{0,2}$. L'autre représente le pourcentage de polluants dont la concentration est supérieure aux valeurs seuils, ici dénommées S_5 . Les seuils $S_{0,2}$ et S_5 ont été calculés à partir de la réglementation pour la gestion des sites et sols pollués (MEDD, 2007b).

$$K_3 = \% \text{ cas } [C_{\text{mesSi}} \leq S_{0,2i}] \quad (\text{Équation 2.16})$$

$$K_4 = \% \text{ cas } [C_{\text{mesSi}} \geq S_{5i}] \quad (\text{Équation 2.17})$$

$$\text{Si } K_3 < 100\% \Rightarrow IS_{SAN1} = K_3 / 100 \quad \text{mais,} \quad \text{Si } K_4 > 0\% \Rightarrow IS_{SAN1} = 0$$

(Adimensionnel, Préférence croissante, [0,1])

Avec :

C_{mesSi} : concentration mesurée du polluant i dans les 30 premiers centimètres du sol du système, dans le cas où plusieurs points ont été mesurés, le plus pollué est considéré, en mg/kg m.s.

$S_{0,2}$: concentration seuil pour le polluant i , représentant un état du milieu compatible avec l'usage, en mg/kg m.s.

S_5 : concentration seuil pour le polluant i , représentant un état du milieu non compatible avec l'usage, en mg/kg m.s.

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air pour les usagers et riverains

Pour l'aspect sanitaire lié à l'air, nous proposons l'indicateur suivant :

$$IS_{SAN2} = \% \text{ cas } \left[\frac{C_{mesAi}}{C_{limAi}} > \alpha \right] \quad (\text{en } \%, \text{ Préférence décroissante, } [0,100]) \quad (\text{Équation 2.18})$$

Avec :

C_{mesAi} : Concentration mesurée du polluant i dans l'air, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

C_{limAi} : Concentration limite du polluant i dans l'air donné par l'OMS (OMS, 2006), en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

α : valeur seuil qui est la proportion entre les heures d'exposition réelle des personnes aux polluants par rapport aux 8 heures normalement utilisées pour la définition des limites

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air et aux particules pour les personnels

Pour le personnel on considère l'exposition à l'air et au sol conjointement. L'indicateur considère alors les valeurs limites d'exposition de l'INRS (INRS, 2005).

$$\text{S'il existe un rapport } \left[\frac{C_{mesTi}}{C_{limTi}} > 1 \right] \text{ alors } IS_{SAN3} = 100$$

$$IS_{SAN3} = \% \text{ cas } \left[\frac{C_{mesTi}}{C_{limTi}} > \alpha \right] \quad (\text{en } \%, \text{ Préférence décroissante, } [0,100]) \quad (\text{Équation 2.19})$$

Avec :

C_{mesTi} : concentration mesurée du polluant i , dans l'air et les particules, en mg/m^3

C_{limTi} : concentration limite du polluant i , dans les ambiances de travail donnée par l'INRS (INRS, 2005), en mg/m^3

$1/\alpha$: valeur seuil qui est la proportion entre les heures d'exposition réelle des personnes aux polluants par rapport aux 8 heures normalement utilisées pour la définition des limites (en effet ce rapport peut être utilisé par principe de linéarité), α étant inférieure ou égale à 1 (on suppose qu'il y a peu de chance pour qu'un individu travaille plus de 8 heures par jour, tous les jours dans ce type de système)

2.2.5.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Pour l'évaluation de l'indicateur **concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers** les valeurs seuils, ou valeurs des concentrations maximales, vont être comparées aux concentrations en polluants mesurées dans les premiers centimètres du sol de la surface d'infiltration. Quand plusieurs mesures ont été effectuées à la surface d'un système d'infiltration, chaque mesure est considérée dans les calculs de K_3 et K_4 .

La proposition des concentrations maximales a été réalisée en s'appuyant la *Démarche d'Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM)* proposé par le MEDD (2007a).

La *Démarche d'Interprétation de l'Etat des Milieux* est un des outils de gestion élaborés par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable en concertation avec les acteurs concernés, le deuxième étant le *Plan de gestion*.

Dans la démarche IEM il s'agit de s'assurer que l'état des milieux est compatible avec des usages déjà fixés.

Pour pouvoir évaluer l'état du milieu il est nécessaire de faire un diagnostic du site. Les diagnostics peuvent intervenir à différents niveaux de la démarche de gestion. La nature et le contenu de ces études dépendent spécifiquement des objectifs attendus (MEDD, 2007a). Cependant en règle générale le diagnostic des milieux prend en compte l'historique des sites, avec leurs possibles sources de contamination, l'identification de la nature et la quantification de la pollution, les voies de migration possible, l'identification des usages du site et par conséquent les milieux d'exposition.

Les voies et les milieux d'exposition pertinents sont multiples. Il est plus précisément recommandé d'examiner s'il y a consommation de l'eau de la nappe et s'il y a des captages et des puits dans la zone potentiellement contaminée, s'il y a ingestion potentielle de terre par les enfants, ingestion possible de

légumes exposés aux polluants par l'air ou l'eau de la nappe, inhalation de poussières ou de substances toxiques et enfin s'il y a contact cutané.

Dans notre cas, nous ne considérerons pas la consommation de l'eau de la nappe car l'infiltration des eaux de pluie comme système de drainage n'est pas autorisé dans les périmètres définis pour les zones de captage. De même nous ne considérerons pas des expositions telles que l'ingestion de légumes car on ne cultive aucun légume dans ces zones d'infiltration intentionnelle des eaux de pluie. Nous nous concentrerons sur les expositions par ingestion de terre (dans les zones plurifonctionnels servant de parcs naturels par exemple, il n'est pas inenvisageable que de jeunes enfants portent la terre à la bouche), par inhalation potentielle de poussière. Le contact cutané est un risque bien réel mais aucune limite de toxicité n'est proposée dans la méthode si bien que l'on ne peut pas l'évaluer. Il faudra absolument examiner ultérieurement car on sait que certains polluants sont nocifs par contact (HAP, par exemple).

L'obtention des concentrations maximales en polluants potentiellement liée à l'ingestion des sols et l'inhalation vont être considérés par le biais de deux grandeurs différentes correspondant au calcul de la dose journalière d'exposition aux polluants :

$$DJE_{\text{seuil}} = QD \times VTR_{AS}(\text{ingestion}) \quad (\text{Équation 2.20})$$

$$DJE_{\text{sans seuil}} = \frac{ERI}{VTR_{SS}(\text{ingestion})} \quad (\text{Équation 2.21})$$

Avec :

DJE_{seuil} : pour la voie ingestion, dose journalière d'exposition théorique, en mg/kg/j, pour les substances à effet de seuil

$DJE_{\text{sans seuil}}$: pour la voie ingestion, dose journalière d'exposition théorique, en mg/kg/j, pour les substances sans effet de seuil

QD : Quotient de danger, calculé pour les substances à effet de seuil

VTR_{AS} : valeur toxicologique de référence pour la substance testée, en mg/kg/j, pour les substances à seuil

VTR_{SS} : valeur toxicologique de référence pour la substance testée, en (mg/kg/j)⁻¹, pour les substances sans effet de seuil

ERI : excès de risque individuel théorique, calculé pour les substances sans effet de seuil

Les concentrations maximales en polluants représentent la dose journalière d'exposition la plus défavorable prise pour les substances avec les deux effets.

La dose journalière d'exposition théorique pour l'ingestion de sol est donnée par l'équation suivante :

$$DJE = \frac{C_S \times 10^{-6} \times Q_s \times T \times E_f}{P \times T_m \times 365} \quad (\text{Équation 2.22})$$

Avec :

DJE : dose journalière d'exposition théorique, en mg/kg/j

C_S : concentration de la substance testée dans le sol, en mg/kg

Q_s : quantité journalière de sol ingéré, en mg/j

T : durée d'exposition théorique, en années

E_f : nombre de jours d'exposition théorique annuelle, en jours

P : poids corporel, en kg

T_m : période de temps sur laquelle est moyennée l'exposition, en années

Les valeurs des concentrations maximales acceptables, pour chaque substance, sont donc obtenues avec de hypothèses d'exposition et des limites du quotient de danger et/ou de l'excès de risque théorique données par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et explicitées dans les paragraphes suivants.

Pour l'indicateur de risque sanitaire par ingestion de sol, des hypothèses ont été faites pour deux situations qui nous pouvons avoir dans le cas des systèmes d'infiltration : des ouvrages ouverts, c'est-à-dire accessibles au public et des ouvrages fermés.

Les hypothèses prises en compte pour l'exposition dans le cas des ouvrages ouverts sont un peu maximalistes et sont les suivantes :

Enfant qui joue dans l'ouvrage 5 jours par semaine, avec une durée d'exposition de 6 ans et une quantité de sol ingéré de 500 mg/jour. Poids corporel de 15 kg. En effet la quantité ingérée de sol par jour est importante, étant basée sur une estimation de Hawley (1985 ; dans RIVM, 2001) qui a proposé une ingestion de 480 mg de sol par jour chez l'adulte en activité à l'air libre. Nous avons préféré un risque de surestimation de l'exposition pour plus de sécurité.

Les hypothèses prises en compte pour l'exposition dans le cas des ouvrages fermés sont les suivantes :

Enfant qui habite aux abords de l'ouvrage, soit une exposition de 7 jours par semaine, avec une durée d'exposition de 6 ans et une quantité de sol ingéré de 110 mg/jour. Poids corporel de 15 kg. En effet la quantité ingérée de sol par jour est importante, étant basé sur la moyenne des valeurs estimées pour différents études (Binder *et al.*, 1986 ; Clausing *et al.*, 1987 ; Calabrese *et al.*, 1989 ; Davis *et al.*, 1990 ; van Wijnen *et al.*, 1990 ; Stanek et Calabrese, 1995 ; Calabrese *et al.*, 1997 ; dans RIVM, 2001).

Des expositions pour les adultes qui y travaillent ont été aussi calculées, toutefois les concentrations acceptables dans les sols pour les enfants ont été inférieures, et donc plus restrictives.

Les limites du quotient de danger (QD) et de l'Excès de Risque Individuel (ERI) définis présentent trois intervalles de gestion de risques, selon le Tableau 2.17.

Tableau 2.17 – Intervalles de gestion des risques (MEDD, 2007b)

Intervalle de gestion des risques		Interprétation des résultats
Substances à effet de seuil	Substances sans effet de seuil	
QD < 0,2	ERI < 10 ⁻⁶	l'état du milieu est compatible avec les usages
0,2 < QD < 5	10 ⁻⁶ < ERI < 10 ⁻⁴	zone de incertitude nécessitant une réflexion plus approfondie de la situation
QD > 5	ERI > 10 ⁻⁴	l'état du milieu n'est pas compatible avec les usages

Les Valeurs toxicologiques de référence (VTR) ont été prises des fiches de l'INERIS (INERIS, 2003a-b ; 2005a-h ; 2006a-d), pour chaque substance qui à notre connaissance est susceptible de se présenter en concentration importante dans les sols des systèmes d'infiltration.

Pour l'exposition par voie orale, nous avons choisi les valeurs de VTR les plus défavorables parmi celles résultant de différentes études.

Les limites obtenues sont présentées au Tableau 2.18, selon le type d'ouvrage (ouvert ou fermé).

Tableau 2.18 – Valeurs seuils pour des ouvrages ouvertes et fermés au public

Substance	Systèmes fermés		Systèmes ouverts	
	S _{0,2} (QD=0,2 ou ERI=10 ⁻⁶) (mg/kg)	S ₅ (QD=5 ou ERI=10 ⁻⁴) (mg/kg)	S _{0,2} (QD=0,2 ou ERI=10 ⁻⁶) (mg/kg)	S ₅ (QD=5 ou ERI=10 ⁻⁴) (mg/kg)
Cd	27	682	8,4	210
Cr	82	2 045	25,2	629
Cu	3 818	95 455	1 175	29 400
Ni	136	3 409	42	1 050
Pb	95	2 386	29	734
Zn et composés	8 182	204 545	2 520	62 930
Acénaphthène	1636	40 909	500	12 590
Anthracène	8 182	204 545	2 517	62 930
Benzo[g,h,i]pérylène	818	20 455	252	6 290
Fluoranthène	11	273	3,4	84
Fluorène	1 091	27 273	336	8 390
Naphtalène	545	13 636	168	4 195
Pyrène	818	20 455	252	6 290

Phénanthrène	1 091	27 273	336	8 390
PCB	0,55	13,6	0,17	4,2

Les seuils calculés sont très inférieurs aux seuils normalement utilisés concernant les sols pollués (par exemple pour le Zn les valeurs cibles et d'intervention de la norme hollandaise (NMHSPE, 2000) sont 140 et 720 mg/kg) toutefois ils ne sont pas erronés. Ils ont été calculés par rapport à l'effet des polluants sur la santé humaine, tandis que la majorité des seuils existants sont calculés pour tous les modes d'exposition (eau de nappe, culture des aliments dans le sol, ...) pour différents éléments pouvant être perturbés (plantes, organismes, humains...). Quand nous comparons les valeurs obtenus avec la procédure du MEDD (2007b) à des valeurs seuils pour la santé humaine rencontrés dans la bibliographie nos valeurs sont de même ordre de grandeur (Cf. Tableau 2.19).

Tableau 2.19 – Valeurs seuils de pollution du sol (NEPC, 1999)

Substance	Seuils NEPC
Cd	20
Cu	1 000
Nig	600
Pb	300
Zn	7 000
PCB	10
HAP (totaux)	20

Pour le calcul de **l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air pour les usagers et riverains** des données de qualité de l'air avoisinant les systèmes doivent être acquises, hélas nous n'avons aucune mesure dans ces conditions. Nous laissons la proposition de l'indicateur et espérons que dans un futur proche ce genre de mesure soit réalisé et que la pertinence de l'indicateur soit vérifiée. Le risque pour la santé humaine dû à la présence de particules poussiéreuses et pollués provenant des systèmes d'infiltration dans l'air est à vérifier. Dans les bassins d'infiltration, l'envol de particules est probablement mineur. Les observations que nous avons mené visuellement sur un certains nombres de bassins ouverts montre que les particules de couche de surface forment une pellicule agglomérée qui a tendance à craqueler mais reste cohésive. La raison est probablement liée au biofilm qui se développe dans ces compartiments. Par contre les particules qui ont décanté dans les compartiments amont de rétention présentent des granulométries fines (avec D_{50} allant de 50 à 150 μ m, Torres, 2008) et l'on voit régulièrement par journée de grand vent des envols de particules.

Cette pollution de l'air aux abords de ces compartiments et au sein de ces compartiments doit être mesurée et comparée à la pollution de l'air urbain nous soumise à ces systèmes.

Les valeurs mesurées dans l'air doivent être comparés avec les concentrations limites proposées par l'OMS, qui sont listés dans le Tableau 2.20.

Tableau 2.20 – Valeurs seuils pour l'exposition à l'air, OMS (2000, 2006), INERIS (2003b)

Substance	Valeurs limites
Cd	5 ng/m ³
Hg	1 µg/m ³
Pb	0,5 µg/m ³
Benzo[a]pyrène	11,5 µg/m ³
PM _{2,5}	10 µg/m ³
PM ₁₀	20 µg/m ³

La liste des substances qui possèdent seuils définis par l'OMS pourra être élargie dans les années à venir. Il est important de citer que le Benzo[a]pyrène est considéré comme indicateur pour tous les HAP. Le PM_{2,5} représente les particules présentes dans l'air de diamètre inférieur à 2,5 microns (qui sont considérées comme les particules fines qui présentent les plus grands risques pour la santé) et les PM₁₀ les particules de diamètre inférieur à 10 microns (qui concernent les particules qui s'accumulent dans le système respiratoire).

Pour le calcul de **l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air et aux particules pour les personnels** des mesures de l'exposition doivent être réalisées dans l'ouvrage pendant le travail de maintenance. Les concentrations mesurées doivent être comparées aux valeurs limites de moyenne d'exposition (VME) proposées par l'INRS (INRS, 2007).

Ces valeurs sont destinées à protéger les travailleurs des effets à terme, sur la durée d'un poste de travail de 8 heures. Le Tableau 2.21 donne ces valeurs pour les substances pour lesquelles il existe de valeurs limites susceptibles de provenir des systèmes d'infiltration.

Tableau 2.21 – Valeurs limites de moyenne d'exposition (INRS, 2007)

Substance	VME
Cd	0,05 mg/m ³
Cr	0,05 mg/m ³
Cu	1 mg/m ³
Hg	0,05 mg/m ³
Ni	1 mg/m ³
Pb	0,1 mg/m ³
Zn	10 mg/m ³
Hydrocarbures C6-C12	1.000 mg/m ³

Nous avons appliqué le calcul de l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers. Il a été calculé pour trois bassins de l'est lyonnais fermés au public. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.22 et ceux des analyses physico-chimiques du sol des bassins à l'Annexe A.

Tableau 2.22 – Exemples de calcul de l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers

Bassins	K ₃	K ₄	Indicateur
Centre Routier	71,43	0,00	IS _{SANI} =0,71
Droits de l'Homme	87,50	0,00	IS _{SANI} =0,88
ZAC du Chêne	75,00	0,00	IS _{SANI} =0,75

Nous pouvons voir qu'aucun des bassins ne présente de risques pour la santé des usagers ($K_4=0$).

2.2.5.4 Qualité de l'indicateur

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers

L'incertitude de l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers n'est pas très importante car l'incertitude dans l'échantillonnage du sol doit être prise en compte en amont du calcul de l'indicateur.

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air pour les usagers et riverains

Pour cet indicateur les incertitudes d'analyses doivent être prises en compte en amont, comme pour l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers.

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air et aux particules pour les personnels

Pour cet indicateur les incertitudes d'analyses doivent être prises en compte en amont, comme pour l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers.

Une évaluation de la qualité des indicateurs de la performance « garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels » et présentée dans le Tableau 2.23.

Tableau 2.23 – Evaluation des indicateurs de la performance « garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels » - critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Indicateurs	Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
IS _{SAN1}	+++	++	+++	+++	++	+++	+++
IS _{SAN2}	+++	-	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	+++
IS _{SAN3}	+++	-	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	+++

L'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers présente un problème : les données de qualité de sols des systèmes d'infiltration ne sont pas toujours disponibles mais ils sont facilement mesurables. L'exposition cutanée n'est pas prise en compte faute de seuils fiables à l'heure actuelle. Les deux autres indicateurs, l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air pour les usagers et riverains et l'indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air et aux particules pour les personnels, ne sont pas accessibles, nous ne disposons pas de données pour les calculer.

2.2.6 Produire des déchets facilement gérables

2.2.6.1 Considérations

Les déchets retirés lors du curage des systèmes d'infiltration sont constitués de sols chargés de fines particules avec une pollution importante et en quantité non négligeable. Ces déchets sont donc difficiles et coûteux à traiter. Hélas les connaissances actuelles sur ces déchets ne nous permettent pas d'aller très loin dans la définition des indicateurs. On sait seulement que des techniques de traitement existent et donnent des résultats satisfaisants (Cf. § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) mais leur utilisation est loin d'être opérationnelle et si elle l'est partiellement, elle est loin d'être maîtrisée.

A minima, cette performance va donc être d'autant meilleure que les sédiments curés sont traités et valorisés un tant soit peu.

2.2.6.2 Seule définition retenue et testée

L'indicateur pour la performance « Produire des déchets facilement gérables » utilise la fraction de sédiments curés valorisés pour chaque ouvrage ou aménagement.

$$IS_{DEC} = \frac{Ms_{valor}}{Ms_{cure}} \quad (\text{Adimensionnel, Préférence croissante, } [0,1]) \quad (\text{Équation 2.23})$$

Avec :

Ms_{valor} : masse de sédiments de l'ouvrage ou de l'aménagement qui peuvent être valorisés sur une période donnée

Ms_{cure} : masse de sédiments curés dans l'ouvrage ou dans l'aménagement

2.2.6.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

L'indicateur proposé va permettre de comparer le pourcentage de sédiments valorisés pour chaque ouvrage au cours du temps. Pour une bonne maîtrise des systèmes d'infiltration de suivis des quantités de sédiments curés doivent être prévus.

Pour montrer des exemples de l'indicateur de valorisation des déchets nous avons utilisé des données de la thèse de Petavy (2007).

Petavy (2007) a étudié la valorisation des sédiments issus de 5 bassins différents : Chéviré, Flavigny, AhAh1, AhAh2 et Lyon. Le Tableau 2.24 présente les données pour le calcul des indicateurs et le Tableau 2.25 les résultats des indicateurs. La description des sites étudiés se trouve dans l'Annexe A.

Tableau 2.24 – Données pour le calcul des indicateurs de valorisation des déchets et pour chaque fraction granulométrique des sédiments : les filières de valorisation possible et le % massique de sédiments, entre parenthèse (Petavy, 2007)

Bassins	Fractions granulométrique des sédiments			
	filières de valorisation possible			
	% massique de sédiments			
	>30mm	2mm-30mm	60µm-2mm	<60µm
Chéviré	non valorisable (4)	Remblais de surface (8)	Remblais routier, de tranchée, de surface ou Couches de forme (50)	non valorisable (38)
Flavigny	non valorisable (4)	Remblais routier, de tranchée, de surface ou Couches de forme (20)	Remblais routier, de tranchée, de surface ou Couches de forme (50)	non valorisable (26)
AhAh1	non valorisable (7)	non valorisable (7)	Remblais de surface (27)	non valorisable (59)
AhAh2	non valorisable (1)	Remblais de surface (13)	Remblais routier, de tranchée, de surface ou Couches de forme (74)	non valorisable (11)
Lyon	non valorisable (5)	non valorisable (49)	Remblais de surface (15)	non valorisable (31)

Tableau 2.25 – Exemples de l'indicateur de valorisation des déchets

Bassins	Indicateur
Chéviré	IS _{DEC} =58
Flavigny	IS _{DEC} =70
AhAh1	IS _{DEC} =27
AhAh2	IS _{DEC} =87
Lyon	IS _{DEC} =15

Nous observons que les pourcentages de sédiments valorisés sont très variables entre les différents ouvrages.

Pour la valorisation des sédiments issus des systèmes d'infiltration leur utilisation en remblais et couches de forme est envisageable, selon leur teneur en matière organique. Dans tous les cas les matériaux ne doivent pas présenter de danger pour l'environnement, ils ne doivent pas être pollués ni potentiellement polluants pour pouvoir être valorisés.

2.2.6.4 Qualité de l'indicateur

L'incertitude maximale estimée dans le calcul de l'indicateur de valorisation des déchets produits est de 1%, cette incertitude concerne seulement l'incertitude dans la mesure des masses de sédiments. Elle a été estimée à partir de la loi de propagation des incertitudes, en considérant une incertitude de 10% dans la masse des sédiments. Pour le calcul de cet indicateur seulement à la masse effectivement valorisée doit être comptée. Les incertitudes de l'échantillonnage et des analyses réalisés sur les déchets pour tranchée entre valorisable et non valorisable ne sont pas prises en compte.

L'indicateur de valorisation des déchets produits a été évalué selon les critères de qualité proposés par Labouze & Labouze (1995). Les résultats peuvent être observés dans le Tableau 2.26.

Tableau 2.26 – Evaluation de l'indicateur de valorisation des déchets produits - critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	+	++	+++	+++	+++	+++

L'indicateur proposé, malgré ces faiblesses représente une donnée importante pour une bonne gestion des ouvrages d'infiltration et nécessite la quantification des sédiments produits et curés des systèmes d'infiltration ce qui est accessible, mais qui demande seulement une volonté pour leur mise en place. En effet, aucun gestionnaire ne capitalise les quantités de sédiments curés et valorisés par ouvrage et cela s'averera nécessaire pour avancer dans cette problématique.

2.2.7 Avoir un coût peu élevé

2.2.7.1 Considérations

Cette performance consiste à évaluer des coûts d'entretien des systèmes d'infiltration.

Les coûts d'entretien annuel varient selon le type d'ouvrage et la façon dont l'ouvrage est aménagé. Un suivi de ces coûts pour chaque ouvrage est impératif pour une bonne maîtrise des systèmes.

Pour le suivi, la performance « économique » est d'autant meilleure que les coûts de maintenance et de réparation sont peu élevés au cours du temps.

2.2.7.2 Définition retenue

Nous proposons donc, l'utilisation de deux grandeurs : une première qui concerne l'observation des variations des pentes des droites de régression des coûts de maintenance, afin de vérifier s'il y a des changements importants dans ces coûts d'une année sur l'autre, cette grandeur doit être interprétée comme un descripteur et n'entre pas dans la décision.

$IE_{\text{COUT}} = a_i - a_{i-1} \quad (\text{Adimensionnel, Préférence décroissante, } [-\infty, +\infty]) \quad (\text{Équation 2.24})$
--

Avec :

a_i °: pente de la droite de régression des coûts de maintenance pour l'année i

a_{i-1} °: pente de la droite de régression des coûts de maintenance pour l'année $i-1$

La deuxième grandeur concerne un indicateur de performance, qui vise à quantifier l'écart entre le coût de maintenance actuel et les coûts moyens de maintenance des années précédentes.

$IS_{\text{COUT}} = C_{\text{MAc}} - \overline{C_{\text{MPr}}} \quad (\text{Adimensionnel, Préférence décroissante, } [-\infty, +\infty]) \quad (\text{Équation 2.25})$

Avec :

C_{MAc} °: coût de maintenance pour l'année i

C_{MPr} °: coûts de maintenance pour les années précédentes

2.2.7.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

Cet indicateur va plus spécifiquement servir à identifier des changements dans les coûts d'entretien des ouvrages d'une année sur l'autre. Si ces changements sont importants une investigation sur les causes de ce changement doit être faite. Les coûts de maintenance doivent être actualisés pour être comparés.

L'actualisation des coûts peut être faite, par exemple, par l'indice du coût de la construction, publié par l'INSEE.

Au delà de l'évaluation de IS_{COUT} , l'aide du descripteur IE_{COUT} peu être utile et plus encore une représentation de l'évolution des coûts où trois situations peuvent se présenter. Elles sont illustrées par les figures suivantes.

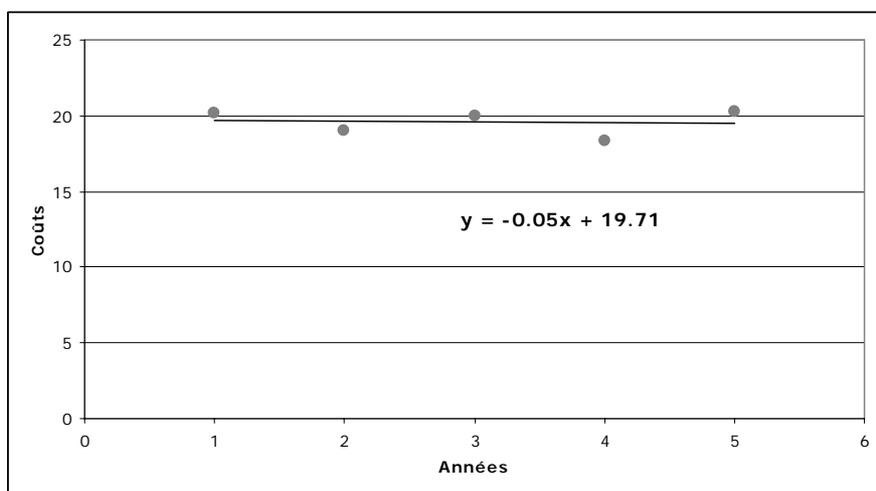


Figure 2.6 – Exemple de pente de la droite nulle

Si la pente de la droite est nulle, comme montre la Figure 2.6, cela caractérise qu'il n'y a pas eu de changement dans le coût de maintenance de l'ouvrage dans le temps, c'est une situation rassurante.

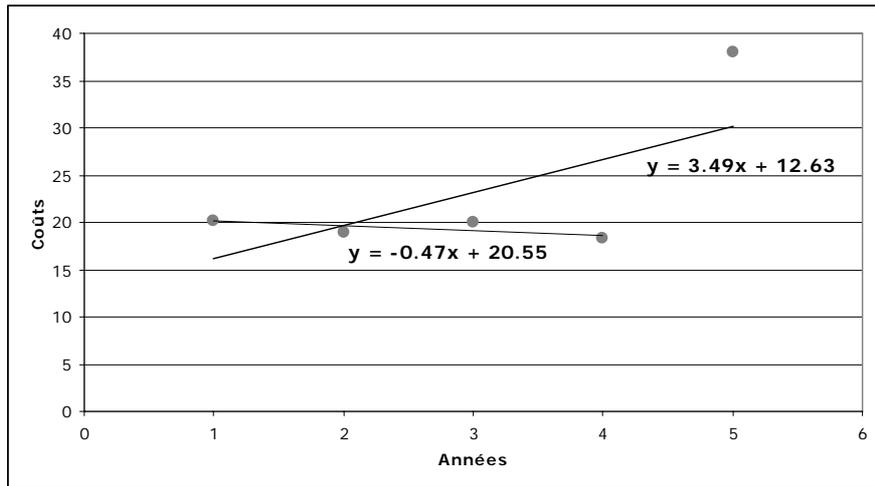


Figure 2.7 – Exemple de pente de la droite plus importante que celle de l’année précédente

Si la pente de la droite est plus importante que celle de l’année précédente, comme le montre la Figure 2.7, cela veut dire que dans la dernière année le coût de maintenance a augmenté anormalement et qu’il faut en investiguer les motifs. Cela peut être normal car il peut s’agir, pour une année donnée, de la réfection exceptionnelle d’une partie d’un ouvrage. Ça peut indiquer aussi que dans les années précédentes la maintenance n’a pas été conforme aux recommandations.

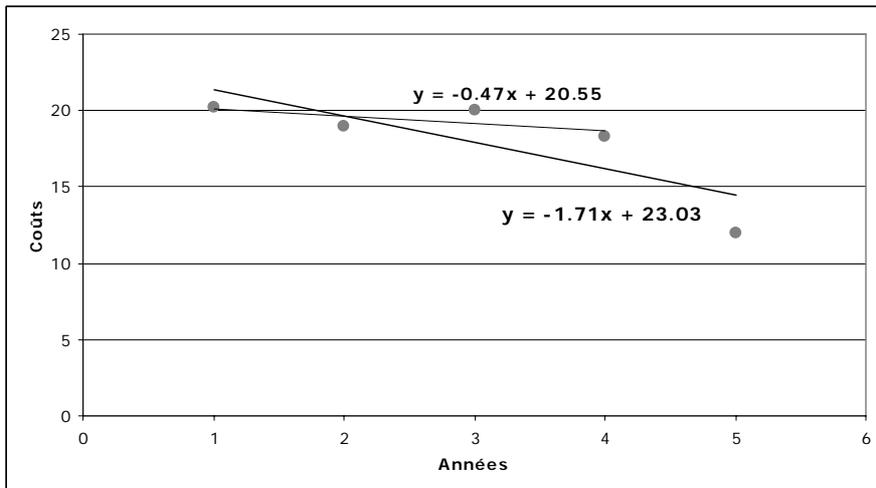


Figure 2.8 – Exemple de pente de la droite moins importante que celle de l’année précédente

Si la pente de la droite est négative, comme montre la Figure 2.8, il faut vérifier si il n’y a pas eu manque de maintenance, qui doit être corrigé immédiatement, ou si cela est dû à un rétablissement de la maintenance normale après un dysfonctionnement de l’ouvrage dans les années précédentes.

2.2.7.4 Qualité de l'indicateur

L'incertitude de l'indicateur de coût (IS_{COUT}) est l'incertitude dans l'actualisation des coûts. Elle va dépendre de la fiabilité des estimations des indices de corrections.

L'indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement a été évalué selon les critères de qualité proposés par Labouze & Labouze (1995). Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.27.

Tableau 2.27 – Evaluation de l'indicateur de coûts - critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	++	+++	+++	++	+++	+++

L'indicateur ne présente pas de problème majeur de qualité selon les critères de Labouze & Labouze (1995).

2.2.8 Acceptabilité sociale d'un scénario

2.2.8.1 Considérations

Cette performance consiste à mesurer si un aménagement ou un ouvrage est bien accepté par les usagers et les riverains.

Pour notre part nous considérons, qu'en ce qui concerne le suivi des systèmes d'infiltration, un système qui n'a pas fait objet de plaintes des riverains ou des usagers est un système bien accepté par la population.

2.2.8.2 Définition retenue

En ce qui concerne l'acceptabilité sociale d'un ouvrage, la proposition est d'utiliser comme indicateur l'existence de plaintes des riverains en relation avec l'ouvrage en question depuis son implantation.

Ainsi la définition donnée est binaire :

$IS_{AS} = 0$ s'il y a des plaintes des riverains pour l'ouvrage ou l'aménagement considéré depuis son implantation ou sa dernière réfection

$IS_{AS} = 1$ sinon (Adimensionnel, Préférence croissante, $\{0, 1\}$)

2.2.8.3 Considérations sur l'évaluation et méthodes d'estimation

L'évaluation de cet indicateur est tout à fait simple, toutefois une investigation à propos de plaintes doit être faite pour vérifier si l'origine du problème est l'ouvrage ou l'aménagement lui-même et non un élément extérieur.

2.2.8.4 Qualité de l'indicateur

L'indicateur d'acceptabilité sociale a été évalué selon les critères de qualité. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.28.

Tableau 2.28 – Evaluation de l'indicateur d'acceptabilité sociale - critère tout à fait satisfait (+++) ; critère satisfait (++) ; critère moyennement satisfait (+) ; critère non satisfait (-)

Pertinence	Accessibilité	Fidélité	Objectivité	Précision	Sensibilité	Univocité
+++	+++	+++	++	+++	+++	+++

L'indicateur ne présente pas de problèmes majeurs de qualité selon les critères de Labouze & Labouze (1995).

2.3 Récapitulatif des indicateurs de performances en phase de suivi

Tableau 2.29 – Données nécessaires pour l'évaluation des indicateurs – phase de suivi

Performance	Indicateurs	Données pour l'évaluation
Protéger contre les inondations	Indicateur de fréquence de débordement (IS_{HYD1})	Fréquence de dimensionnement de l'ouvrage
		Fréquence de débordement observée
	Indicateur de performance hydraulique (IS_{HYD2})	Débit entrant dans l'ouvrage d'infiltration en fonction du temps
		Hauteur d'eau dans le bassin en fonction du temps
		Température de l'eau entrant dans le bassin en fonction du temps
		Modèle numérique de terrain de l'ouvrage d'infiltration
Ne pas dégrader la qualité de la nappe	Indicateur de qualité de la nappe (IS_{NAPPE})	Conductivité électrique en continu
		Oxygène dissous en continu
Retenir la pollution dans l'ouvrage	Indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement (IS_{PT})	Suivi en continu des concentration en MES en entrée dans le bassin de rétention
		Suivi en continu des concentration en MES en sortie du le bassin de rétention
	Indicateur de contamination du sol (IS_{SOL1} , IS_{SOL2})	Mesure de concentrations dans le sol, en différentes profondeurs et en différents points
		Mesure de concentrations dans le sol avant de l'implantation de l'ouvrage
Etre maintenable facilement	Indicateur de maintenance (IS_{MAIN})	Expertise et tenue d'un cahier de bord
Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels	Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers (IS_{SAN1})	Concentrations mesurées des polluants dans le sol de surface
		Seuils $S_{0,2}$ et S_5 (calculés dans le présent travail)
	Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air pour les usagers et riverains (IS_{SAN2})	Seuils de concentration des polluants dans l'air, donnés par l'OMS
		Mesure de concentrations des polluants dans

		l'air
	Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air et aux particules pour les personnels (IS _{SAN3})	Seuils de concentration des polluants dans les ambiances de travail, donnés par l'INRS Mesure de concentrations dans les ambiances de travail
Produire des déchets facilement gérables	Indicateur de valorisation des déchets (IS _{DEC})	Masse de déchets curés Masse de déchets valorisés
Avoir un coût peu élevé	Indicateur de coûts (IS _{COUT})	Chronique des coûts d'entretien annuels
Acceptabilité sociale d'un scénario	Indicateur d'acceptabilité sociale (IS _{AS})	Plaintes des riverains

2.4 Considérations sur la qualité du jeu d'indicateurs

Comme nous l'avons déjà évoqué le jeu d'indicateurs doit être :

- Cohérent ;
- Exhaustif ;
- Non redondant.

Ces qualités sont toujours difficiles à vérifier. Globalement nous avons procédé de la même manière que pour la problématique de conception.

Les liaisons possibles entre indicateurs sont rares. On pourrait cependant se poser la question pour l'indicateur de maintenance et le coût, qui est un coût de maintenance. Cependant ils ne sont pas redondants car ne traduisent pas la même idée et n'exploitent pas les mêmes informations de base.

L'indicateur de contamination du sol et l'indicateur relatif à la santé exploitent s mêmes données (concentrations dans le sol). Cependant la encore, ils ne reflètent pas le même aspect et les seuils permettant de les évaluer sont différents et n'induisent aucune corrélation entre eux.

2.5 Choix et application d'une méthode de sélection

2.5.1 Méthode multicritère choisie

La méthode multicritère qui a été choisie pour l'agrégation des différents indicateurs dans la problématique de suivi des ouvrages est la méthode ELECTRE TRI. Ce choix vient :

- du fait que l'objectif est d'attribuer la performance de l'ouvrage à une catégorie prédéfinie (problématique β) ;
- du fait que nous avons des indicateurs de natures différents et évalués selon des modes et à des échelles divers ;
- du fait que les incertitudes de certains indicateurs sont importantes et doivent pourtant être prises en compte ;

En outre, nous préférons des méthodes d'agrégation partielle, pour ne pas avoir de compensation entre les critères.

2.5.2 Etude de cas - Bassin de rétention infiltration Django Reinhardt

2.5.2.1 Caractéristiques générales du bassin

Le bassin de Django Reinhardt est situé dans la zone industrielle de la commune de Chassieu, dans la plaine de l'Est Lyonnais. La surface drainée du bassin versant est de 285 ha et sa pente moyenne, d'environ 4‰, dans le sens Est-Ouest. A l'exutoire du réseau pluvial, on trouve deux bassins : un bassin de rétention suivi d'un bassin d'infiltration.

Sur ce bassin nous disposons de mesures en continu : i) au niveau des entrées (débit, turbidité, conductivité, température et pH) ; ii) au niveau du sol (concentration en polluant sur la surface et en profondeur) et 3) au niveau de la nappe (température, pH, O₂ dissous et potentiel rédox).

Une description plus détaillée de cet ouvrage est disponible dans l'Annexe A.

2.5.2.2 Indicateurs évalués

Les indicateurs proposés ont été calculés pour le bassin Django Reinhardt et sont donnés au Tableau 2.30. L'Annexe D présente les données utilisées pour le calcul.

Tableau 2.30 – Résultats des calculs des indicateurs, bassin de Django Reinhardt

Indicateurs	Résultats
IS _{HYD1}	0
IS _{HYD2}	9
IS _{NAPPE}	1
IS _{PT}	0,29
IS _{SOL1}	1
IS _{SOL2}	1
IS _{MAIN}	3
IS _{SAN1}	0,67
IS _{SAN2}	Non calculé par manque de données
IS _{SAN3}	Non calculé par manque de données
IS _{DEC}	0
IS _{COUT}	Non calculé par manque de données
IS _{AS}	1

2.5.2.3 Définition des paramètres de la méthode

Définitions des seuils

La méthode ELECTRE TRI demande de définir des seuils pour délimiter les zones d'indifférence, de préférence faible et de préférence stricte de chaque indicateur. Les seuils choisis pour chaque indicateur sont présentés dans le Tableau 1.41, le seuil de coupe utilisé prend la valeur par défaut de la méthode, de 0,76.

Tableau 2.31 – Seuils choisis pour chaque indicateur

Indicateur	Seuil d'indifférence	Commentaires sur le choix du seuil d'indifférence	Seuil de préférence stricte	Commentaires sur les choix du seuil de préférence stricte	Seuil de veto
IS _{HYD1}	$u(IS_{HYD1})$	incertitude dans le calcul de l'indicateur	$2 u(IS_{HYD1})$	2 fois l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	-
IS _{HYD2}	$u(IS_{HYD2})$	incertitude dans le calcul de l'indicateur	$2 u(IS_{HYD2})$	2 fois l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	-
IS _{NAPPE}	0	indicateur binaire	0	indicateur binaire	-
IS _{PT}	$u(IS_{PT})$	incertitude dans le calcul de l'indicateur	$u(IS_{PT})$	incertitude dans le calcul de l'indicateur	-
IS _{SOL1}	0	incertitude prise en compte en amont	0	incertitude prise en compte en amont	-
IS _{SOL2}	0,20	incertitude de l'indicateur	0,50	incertitude de l'indicateur	-
IS _{MAIN}	1	incertitude dans l'estimation de l'indicateur	2	2 fois l'incertitude dans l'estimation de l'indicateur	-
IS _{SAN1}	0	incertitude prise en compte en amont	0	incertitude prise en compte en amont	-
IS _{SAN2}	0	incertitude prise en compte en amont	0	incertitude prise en compte en amont	-
IS _{SAN3}	0	incertitude prise en compte en amont	0	incertitude prise en compte en amont	-
IS _{DEC}	1%	incertitude dans l'estimation de l'indicateur	2%	2 fois l'incertitude dans l'estimation de l'indicateur	-
IS _{COUT}	$u(IS_{COUT})$	incertitude dans le calcul de l'indicateur	$2u(IS_{COUT})$	2 fois l'incertitude dans le calcul de l'indicateur	-
IS _{AS}	0	indicateur binaire	0	indicateur binaire	-

Définitions des pondérations

Les poids des indicateurs utilisés dans les études de cas ont été proposés suivant trois points de vue : un point de vue « techniciste », un point de vue « environnementaliste » et un point de vue du « développement durable ».

Les poids obtenus pour chacun des points de vue sont comparés dans le graphique de la Figure 2.9.

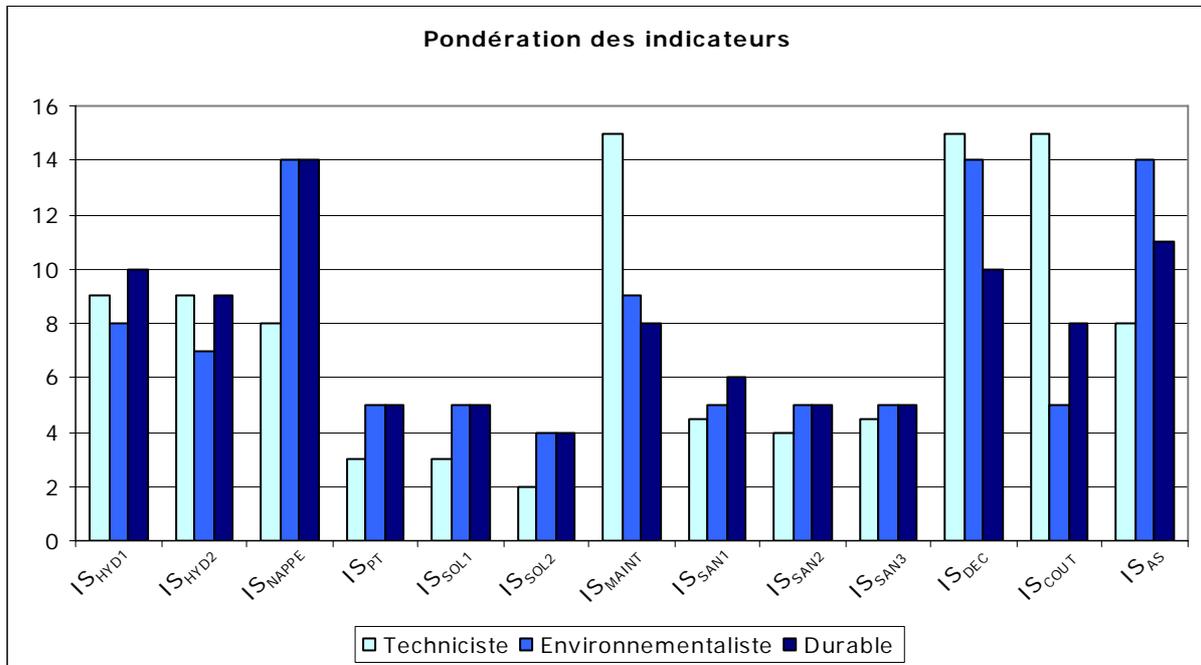


Figure 2.9 – Comparaison des poids relatif à chaque un des trois points de vue

Le Tableau 1.42 présente les valeurs des poids des trois points de vue, pour chaque performance et pour leurs indicateurs respectifs.

Tableau 2.32 – Poids des performances et indicateurs selon les points de vue

Performance	Indicateurs		Point de vue techniciste		Point de vue environnementaliste		Point de vue durable	
Protéger contre les inondations	Indicateur de fréquence de débordement	IS _{HYD1}	9	18	8	15	10	19
	Indicateur de performance hydraulique	IS _{HYD2}	9		7		9	
Ne pas dégrader la qualité de la nappe	Indicateur de qualité de la nappe	IS _{NAPPE}	8	8	14	14	14	14
Retenir la pollution dans l'ouvrage	Indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement	IS _{PT}	3		5		5	
	Indicateur de contamination du sol	IS _{SOL1}	8	3	14	5	14	5
		IS _{SOL2}		2		4		4
Etre maintenable facilement	Indicateur de maintenance	IS _{MAIN}	15	15	9	9	8	8
Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels	Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers	IS _{SAN1}	4,5		5		6	
	Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air pour les usagers et riverains	IS _{SAN2}	13	4	15	5	16	5
	Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air et aux particules pour les personnels	IS _{SAN3}	4,5		5		5	
Produire des déchets facilement gérables	Indicateur de valorisation des déchets	IS _{DEC}	15	15	14	14	10	10
Avoir un coût peu élevé	Indicateur de coûts	IS _{COUT}	15	15	5	5	8	8
Acceptabilité sociale d'un scénario	Indicateur d'acceptabilité sociale	IS _{AS}	8	8	14	14	11	11

Définition des actions de référence

La définition des actions de référence peut, selon Maystre *et al.* (1994) être faite de deux manières. La première consiste à choisir des actions de référence parfaitement comparables entre elles, chacune surclasse ou est surclassée par l'autre. La deuxième est de créer des profils partiellement ou complètement incomparables afin de classer les actions par groupes.

Dans notre cas nous avons proposé une seule action de référence qui divise la performance des systèmes en deux classes : fonctionnement correct ou fonctionnement incorrect. Le Tableau 2.33 présente les valeurs « idéales » et « non idéales » pour chaque indicateur et les valeurs de l'action de référence.

Tableau 2.33 – Données nécessaires pour l'évaluation des indicateurs – phase de suivi

Indicateurs		Action « idéale »	Action « non idéale »	Action de référence
Indicateur de fréquence de débordement	IS _{HYD1}	0	1	1
Indicateur de performance hydraulique	IS _{HYD2}	0	∞	24
Indicateur de qualité de la nappe	IS _{NAPPE}	1	0	1
Indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement	IS _{PT}	1	0	0,5
Indicateur de contamination du sol	IS _{SOL1}	0	∞	1
	IS _{SOL2}	1	0	0,33
Indicateur de maintenance	IS _{MAIN}	4 ou 5	0	1
Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers	IS _{SAN1}	1	0	0
Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air pour les usagers et riverains	IS _{SAN2}	1	0	0
Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air et aux particules pour les personnels	IS _{SAN3}	1	0	0
Indicateur de valorisation des déchets	IS _{DEC}	1	0	1
Indicateur de coûts	IS _{COUT}	0	∞	0
Indicateur d'acceptabilité sociale	IS _{AS}	1	0	1

Le choix de l'action de référence est basé sur des limites normatives ou a été fait au vu de l'expérience de terrain.

2.5.2.4 Application de la méthode de choix ELECTRE TRI, résultats et discussion

Démarche

Pour chaque point de vue, les paramètres considérés sont la valeur des poids la valeur des seuils d'indifférence et de préférence stricte, et enfin la valeur de l'action de référence et du seuil de coupe de la méthode.

Résultats

Les résultats sont identiques quelle que soit la pondération testée. Il apparaît une incomparabilité entre les performances du bassin de Django Reinhardt et l'action de référence.

La performance du bassin est surclassée par l'action de référence dans la procédure d'affectation pessimiste et surclasse l'action de référence dans la procédure d'affectation optimiste.

De ces résultats nous pouvons en conclure que le bassin Django Reinhardt présente actuellement des performances assez proches des limites minimales d'un bon fonctionnement, il faut donc, de la part du gestionnaire, regarder de plus près les origines de ce jugement. Nous pouvons dire qu'après notre connaissance du fonctionnement du bassin de Django Reinhardt ce jugement est correct, car actuellement certaines performances de ce bassin ne sont effectivement pas suffisantes, à savoir : la maintenance et la valorisation des déchets générés.

2.5.2.5 Analyses de sensibilité et robustesse

Afin de confirmer nos conclusions, des analyses de sensibilité et de robustesse ont été effectuées.

Rappelons que l'**analyse de robustesse** consiste à tester les plages de valeurs pour lesquelles la décision reste stable, pour chaque paramètre.

Pour l'analyse de robustesse nous avons testé quatre types de variation :

- variations des poids, selon la même stratégie que pour la problématique de conception ;
- variations des seuils d'indifférence et de préférence stricte ;
- variations de l'action de référence ;
- variations du seuil de coupe.

Ces variations ont été effectuées paramètre par paramètre, jusqu'à observation de changement dans la solution.

La Figure 2.10 présente les résultats de l'analyse de robustesse du poids.

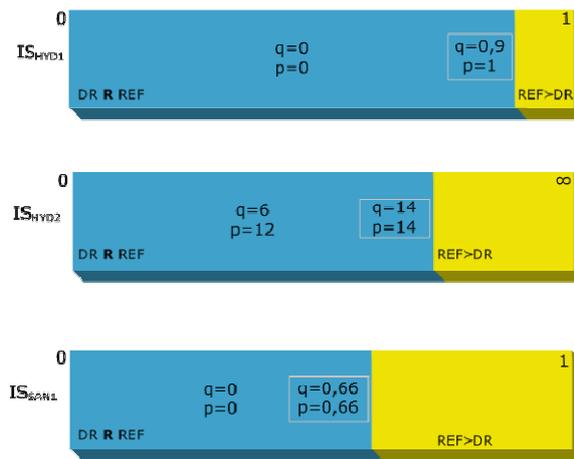


Figure 2.11 – Résultat de l’analyse de robustesse à la variation des seuils des critères - le domaine de la solution de base apparaît en bleu : les valeurs des seuils d’indifférence (q) et de préférence stricte (p) dans le domaine de solution de base sont celles utilisées initialement dans l’analyse ; les valeurs dans les cadres gris représentent les couples de seuils au delà de lesquels la solution de base n’est pas conservée

Les résultats obtenus en faisant varier l’action de référence sont différents de la solution de base pour l’indicateur IS_{HYD2} . Ces variations provoquent parfois des changements de solution. Cependant, là encore les plages de variation où il y a robustesse sont grandes. La méthode est donc robuste à la définition de l’action de référence.

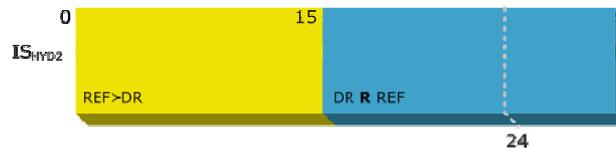


Figure 2.12 – Résultats de l’analyse de robustesse par rapport à des variations dans l’action de référence pour l’indicateur IS_{HYD2} - le domaine de la solution de base apparaît en bleu – les valeurs marquées dans chaque domaine de solution sont les valeurs de l’action de référence au delà de lesquels il y a changement de solution – REF (action de référence) – DR (Django Reinhardt) – R : incomparabilité - \succ : surclassement

Les variations du seuil de coupe ont été effectuées par rapport aux résultats des quatre pondérations : les pondérations des trois points de vue et la pondération moyenne. Les résultats de l’analyse montrent des solutions différentes de la solution de base, quelle que soit la pondération (Figure 2.13), mais la solution de base reste stable sur de plages significatives. La méthode est donc, une fois encore, considérée comme robuste. C’est cependant le paramètre qui est proportionnellement le moins robuste (notamment pour la pondération moyenne).

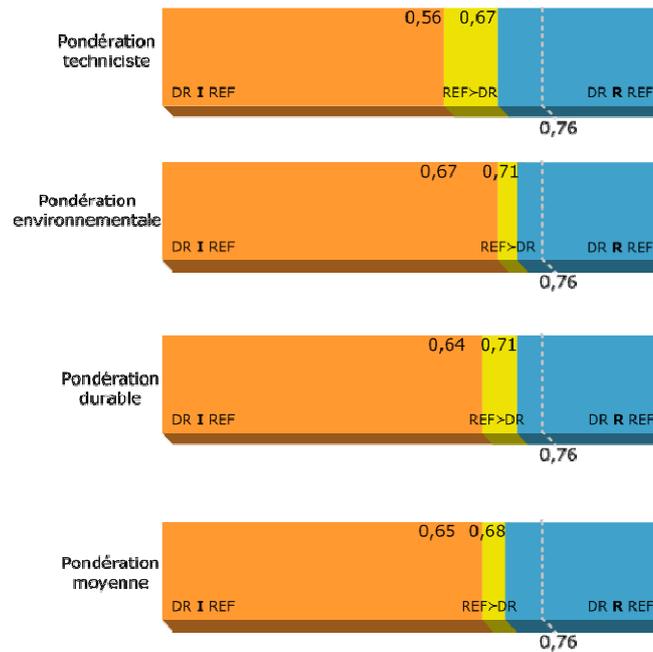


Figure 2.13 - Résultats de l'analyse de robustesse par rapport à des variations du seuil de coupe – le domaine de la solution de base apparaît en bleu – les valeurs marquées dans chaque domaine de solution sont les valeurs du seuil de coupe (λ) au delà de lesquels il y a changement de solution – REF (action de référence) – DR (Django Reinhardt) – R : incomparabilité - > : surclassement – I : indifférence

Une **analyse de sensibilité** a été effectuée après l'analyse de robustesse. L'analyse de sensibilité consiste à analyser l'influence de chacun des paramètres sur le résultat de l'application de la procédure d'agrégation des indicateurs et permet d'analyser de l'instabilité par rapport aux différents paramètres en question. Elle consiste à répéter l'analyse multicritère en faisant varier, isolément ou collectivement, les valeurs attribuées à l'origine aux différents paramètres de la méthode.

Pour l'analyse de sensibilité qui a été effectuée pour un nombre importante de valeurs de poids et de seuils, les résultats ont montré une absence de sensibilité de la méthode à ces paramètres, la solution de base étant toujours rencontrée. Par contre les valeurs exacts des seuils, des actions de référence et des poids ne sont pas disponibles.

Il semble donc qu'il y a une incomparabilité entre les performances du bassin de Django Reinhardt et l'action de référence. La performance du bassin est surclassée par l'action de référence dans procédure d'affectation pessimiste, mais la surclasse dans procédure d'affectation optimiste.

2.5.3 Etude de cas - Bassin de rétention infiltration de ZAC de Pivolles

2.5.3.1 Caractéristiques générales du bassin

Le bassin d'infiltration rétention de ZAC de Pivolles, localisé à Décines, dans le est lyonnais, draine une zone industrielle de 50 ha.

Une description plus détaillée de cet ouvrage est disponible en Annexe A.

2.5.3.2 L'évaluation des indicateurs

Les indicateurs proposés ont été calculés pour le bassin ZAC de Pivolles. Le Tableau 2.34 donne les résultats. L'Annexe D présente les données utilisées pour le calcul.

Tableau 2.34 – Résultats des calculs des indicateurs, bassin de ZAC de Pivolles

Indicateurs	Résultats
IS _{HYD1}	0
IS _{HYD2}	0,0004
IS _{NAPPE}	1
IS _{PT}	Non calculé par manque de données
IS _{SOL1}	0 ,9
IS _{SOL2}	0,333
IS _{MAIN}	0
IS _{SAN1}	0,88
IS _{SAN2}	Non calculé par manque de données
IS _{SAN3}	Non calculé par manque de données
IS _{DEC}	0
IS _{COUT}	Non calculé par manque de données
IS _{AS}	1

2.5.3.3 Définition des paramètres de la méthode

Les paramètres de la méthode sont les mêmes qui ceux utilisés pour l'étude de cas de Django Reinhardt (Cf.§ 2.5.2.3).

2.5.3.4 Application de la méthode de choix ELECTRE TRI, résultats et discussion

Démarche

La méthode ELECTRE TRI a été appliquée à l'étude de cas – bassin ZAC de Pivolles, en utilisant les pondérations des indicateurs pour les trois points de vue différents, comme pour l'étude de cas précédent. Ensuite des analyses de sensibilité et robustesse ont été réalisées.

Résultats

Les résultats de l'application de la méthodologie au bassin ZAC de Pivolles a mis en évidence une performance adéquate du bassin. Pour les trois pondérations utilisées, la performance du bassin surclasse l'action de référence.

2.5.3.5 Analyses de sensibilité et robustesse

Pour l'**analyse de robustesse** nous avons testé de mêmes que précédemment, la variation :

- des poids ;
- des seuils d'indifférence et de préférence stricte ;
- de l'action de référence ;
- du seuil de coupe.

Les jeux de paramètres ont été testés un par un, jusqu'à observation d'un changement de solution.

Pour les variations de poids testés, seules les valeurs de poids de l'indicateur IS_{DEC} ont conduit à des résultats différents de la solution de base. La Figure 2.14 montre les résultats de l'analyse de robustesse des poids pour l'indicateur IS_{DEC} . La plage de variation dans laquelle IS_{DEC} conduit à la solution de base est cependant large. La méthode est donc robuste.

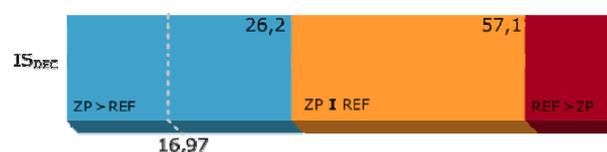


Figure 2.14 - Résultats de l'analyse de robustesse de la méthode par rapport à la variation des poids de

l'indicateur IS_{DEC} – le domaine de la solution de base apparaît en bleu, les valeurs marquées par un trait pointillé gris correspondent à la pondération moyenne de l'indicateur – les valeurs marquées dans chaque domaine de solution sont les valeurs des poids au delà desquels il a changement de solution – REF (action de référence) – ZP (ZAC de Pivolles) – > : surclassement – I : indifférence

Différentes variations dans les seuils d'indifférence et de préférence stricte ont été testées pour tous les indicateurs. Toutefois aucune variation dans le résultat n'a été observée. Nous pouvons en conclure que le choix des seuils pour l'étude de cas de ZAP de Pivolles est robuste.

Pour les indicateurs IS_{SOL2} , et IS_{SAN1} la méthode s'est montrée sensible à des variations de l'action de référence. Ces variations ont provoqué des indifférences entre les performances du bassin et celles de l'action de référence, comme le montre la Figure 2.15, mais globalement la solution de base est robuste.



Figure 2.15 - Résultats de l'analyse de robustesse de la méthode par rapport à la variation des valeurs de l'action de référence – le domaine de la solution de base apparaît en bleu, les valeurs marquées par un trait pointillé gris correspondent aux valeurs initiaux de l'action de référence – les valeurs marquées dans chaque domaine de solution sont les valeurs de l'action de référence au delà de lesquels il a changement de solution - REF (action de référence) – ZP (ZAC de Pivolles) – > : surclassement – I : indifférence

Des changements dans le seuil de coupe ont été testés par rapport aux résultats des quatre pondérations : les pondérations des trois points de vue (techniciste, environnementale et durable) et la pondération moyenne. Pour les quatre pondérations la méthode s'est montrée assez robuste (Figure 2.16).

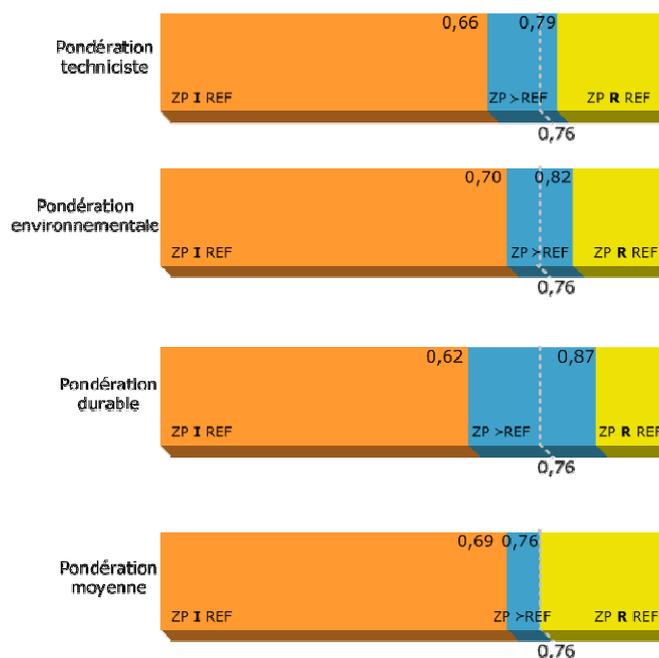


Figure 2.16 - Résultats de l'analyse de robustesse de la méthode par rapport à la variation des seuils de coupe – le domaine de la solution de base apparaît en bleu – les valeurs marquées dans chaque domaine de solution sont les valeurs du seuil de coupe au delà de lesquels il a changement de solution - REF (action de référence) – ZP (ZAC de Pivolles) – R : incomparabilité - > : surclassement – I : indifférence

Une **analyse de sensibilité** a été effectuée après l'analyse de robustesse. Les paramètres à tester dans l'analyse de sensibilité ont été choisis à partir des résultats des analyses de robustesse. Ces paramètres sont : les poids des indicateurs et les limites de l'action de référence.

Les analyses de sensibilité et robustesse montrent que la méthode est robuste et peu sensible. Seuls des changements très importants dans les paramètres provoquent des changements dans la solution de base.

2.6 Conclusions

Le chapitre 4 a présenté une méthodologie proposée pour l'évaluation des ouvrages d'infiltration pour le suivi des ouvrages existants. Les performances considérées dans l'évaluation ont été identifiées par un groupe d'experts de différents domaines. Pour chaque performance des indicateurs ont été proposés, testés par rapport à leurs qualités et reformulés jusqu'à l'obtention d'un indicateur de qualité acceptable, pour chaque aspect de ces performances.

La méthodologie proposée a été appliquée à deux études de cas, qui comparaient les performances des systèmes testés avec des performances de référence, en utilisant la méthode ELECTRE TRI. Des analyses de sensibilité et de robustesse ont été effectuées et ont montré que la méthodologie était robuste et peu sensible.

Chapitre 3 Conclusions

3.1 Bilan et principales conclusions du travail

Ce travail a porté sur l'évaluation des performances des systèmes d'infiltration dans le cadre d'un développement durable, tant sur une problématique de conception des systèmes que sur une problématique de suivi des systèmes en fonctionnement.

En ce concerne la problématique de conception, il s'agissait de donner aux décideurs des éléments leur permettant de choisir les stratégies d'infiltration à implanter à l'échelle d'un ouvrage ou d'un aménagement. Pour ce qui est de la problématique de suivi, l'objectif de ce travail était de mieux comprendre et d'estimer avec une plus grande fiabilité le comportement des systèmes de rétention/infiltration au cours du temps.

Les méthodologies proposées utilisent des indicateurs pour évaluer chaque aspect des ouvrages d'infiltration. Des indicateurs ont été proposés à partir de performances définies par un groupe de travail composé de professionnels et de scientifiques de différents domaines. Cela a consisté une part importante et difficile du travail. Tous les indicateurs ont été passés au crible de critères de qualité : ceux de Labouze et Labouze (1999). Trois groupes de performances ont été distingués : les performances évalués par des indicateurs de qualité satisfaisante, les performances évaluées de manière simplifiée, et ce, essentiellement en raison de l'état des connaissances et les performances mal évaluées en raison du manque de données pour lesquelles nous proposons des indicateurs qui serviront à capitaliser des connaissances pour une future amélioration.

Cinq performances sont caractérisées par des *indicateurs satisfaisants* : « Protéger contre les inondations », « Retenir la pollution dans l'ouvrage », « Contribuer à la recharge des nappes » et « Préserver les ressources naturelles »¹.

Les *indicateurs pour lesquels il y a un manque de connaissance assise* sont : « Ne pas dégrader la qualité de la nappe », « Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels » et « Acceptabilité sociale d'un scénario ».

Pour ce qui est de l'indicateur de qualité de la nappe, le problème vient de plusieurs points. L'impact des eaux d'infiltration intentionnelle des eaux de pluie n'est pas encore complètement élucidé et peu de bilans physico-chimiques de qualité existent. Il y a donc nécessité de continuer la recherche sur ce point. Concernant la procédure proposée, elle est issue de recherches locales et sa transposabilité à d'autres régions et contextes n'est pas non plus totalement certaine ni explorée. Enfin la qualité des suivis par des équipes techniques peu formées pourrait remettre en cause l'opérationnalité de ces indicateurs pour une utilisation généralisée.

¹Bien qu'à sa définition, l'indicateur n'a pas paru de très bonne qualité, il s'est avéré très discriminant et de qualité suffisante à l'application c'est la raison pour laquelle il apparaît *in fine* dans ce groupe.

Dans le cas de l'indicateur de santé et sécurité, le manque d'informations vient de deux sources. D'une part, la qualité de l'air aux abords de systèmes de rétention/infiltration n'a jamais fait l'objet de mesure si bien que l'on ignore s'ils peuvent constituer des dangers particuliers pour la santé des riverains, des personnels ou des usagers. Pour cela il serait nécessaire de réaliser quelques campagnes de mesures pour se faire une idée de cette pollution et la comparer aux pollutions auxquelles sont soumises les habitants d'une ville. La deuxième source est liée à l'absence de valeur limite fiable pour mesurer l'exposition par voie cutanée. Cette exposition est pourtant bien réelle pour ces systèmes et on sait qu'elle peut impacter la santé humaine (HAP reconnus cancérigènes par contact par exemple).

Pour l'indicateur d'acceptabilité sociale, le manque d'études est flagrant et nous oblige à l'évaluer par le biais d'autres usages des ouvrages, seule piste actuelle exploitable. Il nous semble, là encore, que des études à caractère sociologique seraient particulièrement utiles. En effet il n'est pas rare que des solutions techniques soient écartées par les techniciens au moment de la conception en raison de ce qu'ils estiment être socialement inadmissible pour les usagers (présence d'eau permanente par exemple). Or il s'avère que le comportement ou l'avis de ces usagers ne soient exactement ceux perçus par les techniciens.

Pour les autres performances, « Etre maintenable facilement », « Produire de déchets facilement gérables » et « Avoir un coût peu élevé », trois indicateurs ont été proposés ainsi que des modes de capitalisation des connaissances. Contrairement aux précédents, les informations existent mais ne sont pas capitalisées ou exploitées de manière satisfaisante.

L'indicateur de maintenance devrait permettre d'identifier les problèmes posés lors de la maintenance des ouvrages. Cette connaissance va ensuite permettre d'améliorer l'indicateur de maintenance pour la problématique de conception et donner des pistes quant à une reformulation de l'indicateur pour la problématique de suivi.

Pour l'indicateur de déchets solides, des données quantitatives et de qualitatives sur les déchets générés par ouvrage, pourraient ensuite être corrélés à des facteurs de contexte et permettre l'amélioration de l'indicateur de déchets solides dans la problématique de conception.

Pour l'aspect économique, une base de données sur les coûts de maintenance par ouvrage devrait permettre d'améliorer l'évaluation de l'indicateur de coût de maintenance et servir à mieux les évaluer au niveau de l'adoption de projets nouveaux.

Les indicateurs ont ensuite été intégrés dans des méthodes d'aide à la décision. Pour répondre aux problématiques de choix en phase conception ou d'analyse globale en phase de suivi, nous avons opté pour des méthodologies multicritères qui permettent de traiter des indicateurs de natures différentes et

qui permettent également de pouvoir facilement intégrer la possible et souhaitable évolution dans la définition des indicateurs.

Le choix de ces stratégies concernant la problématique de conception, a été réalisé à l'aide de la méthode d'analyse multicritère ELECTRE III. Elle repose sur le principe de Condorcet qui précise qu' "*une action surclasse une autre si elle est au moins aussi bonne que l'autre relativement à une majorité de critères, sans être nettement plus mauvaise que cette autre relativement aux autres critères.*" et est construite à partir de relations de surclassement basées sur de la logique floue. Elle travaille selon des pseudo-critères permettant sur chaque critère de définir des zones d'indifférence (zone d'incertitudes ou zones de « non avis ») et des zones de préférence faible et stricte.

Pour la problématique de suivi, les ouvrages sont affectés suivant deux classes caractérisées par : *un fonctionnement normal* ou *présentant des dysfonctionnements*. La méthode multicritère choisie, ELECTRE TRI, est constituée sur les mêmes principes de base qu'ELECTRE III.

Les deux méthodologies proposées, respectivement pour la problématique de suivi et de conception, se sont montrées peu sensibles aux variations des paramètres de la méthode : les seuils d'indifférence et de préférence stricte, dans les deux cas et le seuil de coupe et l'action de référence pour la méthode ELECTRE TRI. Pour ce qui est de la sensibilité aux poids, les résultats des deux méthodes diffèrent selon les poids appliqués, mais les solutions trouvées pour les valeurs de poids testées appartiennent toujours à la famille de la solution de base. Une analyse de robustesse a montré que les deux méthodes sont robustes. Seules de variations très importantes dans les valeurs paramètres des méthodes conduisent à des solutions significativement différentes de la solution de base. Elles sont tout à fait satisfaisantes sur le plan de leur robustesse et de leur sensibilité et donne donc des résultats stables.

L'analyse de modèles d'aide à la décision ne s'arrête cependant pas à ces études de robustesse et de sensibilité. Comme n'importe quel modèle de phénomène, il est nécessaire de s'interroger sur sa validité et donc son mode de validation. Peu de travaux ont été menés sur ces aspects et il est toujours difficile de prouver « la validité » d'un modèle d'aide à la décision. Pictet (1996) propose cependant d'examiner, ce qu'il nomme la *validation interne* et la *validation externe*.

La *validation interne* porte sur la procédure de structuration du modèle lui même (pertinence du niveau de problème traité, des critères, des règles choisies et de la démarche d'aide à la décision). C'est aussi ce que l'on appelle souvent la validation procédurale. Nous pensons que la constitution du groupe de travail pluri-disciplinaire a permis cette légitimation au moins à une échelle locale (région Rhône Alpes).

La *validation externe* est censée légitimer le « résultat » méthodologique en mesurant l'apport de la méthodologie et la pertinence des choix qui en découlent sur les décisions effectivement prises par les décideurs. Cette légitimation est dans ce travail très imparfaite. Nous avons montré au travers d'exemples l'apport de nos méthodologies qui ont mis en lumière d'une part la pertinence de ce type

de démarche et la qualité des résultats en comparaison avec les avis d'experts du domaine (bonne discrimination par exemple de situations). La méthode a permis d'autre part de pointer les manques de connaissances, d'informations ou de mise en forme d'informations adéquates et a donc permis d'identifier pour les services gestionnaires les efforts de capitalisation nécessaires et pour les chercheurs les efforts de recherche à mener. Cependant cette méthodologie n'a pas été utilisée par des services gestionnaires « en pleine autonomie », si bien que les méthodes ne sont pas complètement validées sur un plan opérationnel.

3.2 Perspectives

Les points à améliorer mis en évidence par ce travail concernent donc l'acquisition de données par les gestionnaires des systèmes d'infiltration et la nécessité d'avancer les travaux de recherche dans différents domaines. L'amélioration des indicateurs proposés est déterminée par l'avancement de ces deux points.

Les données de qualité de l'air doivent être acquises afin d'évaluer les indicateurs de santé et sécurité pour la problématique de suivi des ouvrages permettant d'évaluer le risque (si risque il y a) pour les usagers, riverains et les personnels en charge de l'entretien de ces systèmes.

On peut aussi penser à une amélioration de l'indicateur de ressources naturelles grâce à l'utilisation de bases de données des énergies et matériaux consommés plus complètes.

En ce qui concerne les données à acquérir par les gestionnaires, les points sur lesquels il faut insister sont :

- les données de maintenance, avec une meilleure connaissance des problèmes posés par les ouvrages lors de leur entretien ;
- l'acquisition de données sur les déchets curés au sein de ces systèmes et surtout la quantité de déchets et leur qualité physico-chimique ;
- l'acquisition de données de coût de maintenance par type de système.

Les lacunes identifiées dans la recherche scientifique concernent les domaines :

- de connaissance des charges polluantes par rapport au type d'occupation des bassins versants (amélioration des indicateurs de pression anthropique et de déchets solides). Cela ne pourra se faire qu'en continuant les acquisitions in situ sur de nombreux sites compte tenu de l'extrême variabilité des quantités observées. Notons cependant qu'il y a encore un vrai déficit sur l'acquisition le plus en continu possible de paramètres autres que MES, DCO et qu'il faudra peut-être réfléchir à des modes d'acquisition d'informations sur

les concentrations ou masses d'autres substances (hydrocarbures, métaux et autres substances prioritaires) via de nouveaux capteurs (intégratifs par exemple, ou capteur en continu) ou soit via des corrélations avec des paramètres mesurables facilement en continu. Des observatoires tels que l'OTHU et des réseaux d'observatoires tels HURRBIS devrait faciliter la mise au point et le test de telles méthodologies.

- de l'acceptabilité sociale des systèmes d'infiltration ;
- de l'amélioration des connaissances sur les réponses de la nappe à l'infiltration des eaux pluviales. Des travaux en cours dans le cadre du projet ECOPLUIES existent mais doivent être poursuivis ;
- de la santé humaine, avec la question de l'exposition aux polluants par voie cutanée et par inhalation.

Sur un plan plus général, nous avons pu observer un manque important de modèles prédictifs sur l'ensemble de ces points, préjudiciables pour la problématique de conception. Cet aspect devra donc être amélioré.

Enfin, il serait primordial que les méthodologies développées puissent être appliquées dans différents organismes de manière à les faire vivre et évoluer. Au-delà des services qu'elles peuvent rendre sur un plan opérationnel, de telles méthodes, parce qu'elles nécessitent le croisement et la confrontation des points de vue, permettent de faire émerger des questions importantes et d'en relativiser d'autres et constituent ainsi de précieux outils d'analyse.

Références bibliographiques

- ABDELMALKI L., MUNDLER P. Economie de l'Environnement. Paris : Hachette, 1997, 160 p. (collection Les fondamentaux).
- AFNOR. Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. NF P11-300, Paris : AFNOR 1992, 21 p.
- AFNOR. Qualité des sols – essai d'inhibition de germination de semences par une substance. NF X31-201, 1982.
- AKAN O. Sizing stormwater infiltration structures. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, vol. 128, n° 5, pp. 534-537.
- AIFAKIH E., BARRAUD S., MARTINELLI I. A study of stormwater infiltration system feasibility and design, Water Science and Technology, 1999, vol. 39, n° 2, pp. 225–231.
- APOSTOLAKI S., JEFFERIES C., SOUTER N. Assessing the public perception of SUDS at two locations in Eastern Scotland. **In**: First National Conference on SUDS, 2001, Coventry University.
- APOSTOLAKI S., JEFFERIES C., WILD T. The social impacts of stormwater management techniques. Water Practice & Technology, 2006, vol 1, n°1, doi: 10.2166/WPT.2006009.
- APPLEYARD S. J. Impact of stormwater infiltration basins on groundwater quality: Perth metropolitan region, Western Australia. Environmental Geology, 1993, vol. 21, n° 4, pp. 227-236.
- AZZOUT Y., BARRAUD S., CRES F. N., ALFAKIH E. Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien. Paris: Lavoisier, 1994, 372 p.
- AZZOUT Y. Aide a la décision appliquée au choix des techniques alternatives en assainissement pluvial. Thèse de Doctorat en Méthodes de conception en aménagement, bâtiment et techniques urbaines. Lyon : INSA de Lyon, 1996, 245 p.
- BACHOC A., CHEBBO G., MOUCHEL J.-M. La pollution des rejets pluviaux urbains : son importance, ses caractéristiques, quelques éléments sur ces origines et son interception. **In** : Rejets Urbains de temps de pluie : pollution et nuisance. 3eme journées Sciences & Techniques de l'environnement. Paris, 1992, pp. 9-21.
- BAFFET C. Acceptabilité sociale des techniques alternatives en assainissement pluvial : le problème de l'acceptabilité technique. PIRD EDU, Lyon : INSA de Lyon, EDU, 2005, 71 p.
- BALADES J-D., GARRIGOU J-P. Assainissement pluvial : bilan critique des solutions compensatoires. AR 1.50.40.0. Bordeaux : CETE du sud ouest, 1992, 57 p.
- BALKEMA A.J., PREISIG H.A., OTTERPOHL R., LAMBERT F.J.D. Indicators for sustainability assessment of waste water treatment systems. Urban Water, 2002, vol. 4, n° 2, pp. 153-161.
- BALLANT J-L. Le changement climatique : Inventaire des actions à mener pour lutter contre le réchauffement du climat. 8ème édition [**en ligne**]. 2007. Disponible sur : <<http://www.planete1sugg.net/doc/planete1sugg-ed08maj.pdf>> (consulté le 28.01.2008).
- BAPTISTA M. B., BARRAUD S. Évaluation économique de l'utilisation de techniques alternatives en assainissement pluvial. Rapport Final. Lyon : INSA de Lyon, URG, 2001, 72 p.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. Sustainable development and urban stormwater management in the context of tropical developing countries. **In**: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 25, 1996, México, v. IV, p. 523- 529.

BAPTISTA M., NASCIMENTO N., BARRAUD S. Técnicas compensatorias em drenagem urbana. Porto Alegre: ABRH, Brasil, 2005, 226 p.

BARBOSA A.E. Highway runoff pollution and design of infiltration ponds for pollutant retention in semi-arid climates. Thèse en Ingénierie Environnemental. Aalborg, Danemark : Université de Aalborg, 2000, 52 p.

BARDIN J.-P. Contribution à une meilleure connaissance du fonctionnement qualitatif des bassins de retenue soumis à un débit traversier permanent et à la prise en compte des incertitudes. Thèse de doctorat en Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, 1999, 443 p.

BARRAUD S., GAUTIER A., BARDIN J.-P., RIOU V. The impact of intentional stormwater infiltration on soil and groundwater. *Water Science and Technology*, 1999, vol.39, n°2, pp. 185-192.

BARRAUD S., BARDIN J.-P., ALFAKIH E. Construction d'indicateurs de performances techniques, économiques et environnementales des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. Rapport action concertée initiative ville. Lyon : MENRT, 2001, 64 p.

BARRAUD S., FOUILLET B. Caractérisation des eaux pluviales et risques sanitaires. **In** :GRAIE, GRAND LYON, ASTREE. Séminaire Eau et Santé, 10 octobre 2006, Lyon. Lyon: GRAIE, 2006, 16 p.

BARRAUD S., MIRAMOND M., ALFAKIH E. Critical analysis of the quality of a set of performance indicators used to qualify sustainability of urban infiltration storm water drainage systems. **In**: ANTUNES A. 4th International Conference on Decision Making in Urban and Civil Engineering [CD-ROM], October 28-30 2004, Porto, Portugal. Porto, Portugal: University of Coimbra and Decision Making in Urban and Civil Engineering society. 2004a, 10 p.

BARRAUD S., MIRAMOND M., LE GAUFFRE P. A-Posteriori analysis of the relevance of a multicriteria decision-aid method for best management practice choice in urban storm drainage. *Urban Water Journal*, 2004b, vol. 1, n° 3, pp. 209-216.

BARRAUD S., LE COUSTUMER S., PERRODIN Y., DELOLME C., WINIARSKI T., BEDELL J.-P., GIBERT J., MALARD F., MERMILLOD BLONDIN F., GOURDON R., DESJARDIN V., BRELOT E., BACOT L. Guide Technique : Recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. Lyon : INSA de Lyon, 2006b, 62 p.

BARRAUD S., GIBERT J., TOUSSAINT J-Y. Pour la définition d'une méthode d'évaluation environnementale, technique et socio-économique de stratégies d'assainissement pluvial par infiltration en milieu urbain. Rapport final « Bonus Qualité Recherche Inter-établissements 2004». Lyon : Ronéo, 2006a, 70 p.

BEDELL J.-P., WINIARSKI T., DELOLME C. et GHIDINI M. Profils chimiques et éléments de caractérisation du colmaté de Django Reinhart. Rapport préliminaire. Lyon : OTHU et Grand Lyon, 2001, 16 p.

BELLAGIO. Bellagio Principles: Guidelines for the Practical Assessment of Progress Towards Sustainable Development. **[en ligne]**. Winnipeg, Manitoba, Canada : International Institute for Sustainable Development, 1996. Disponible sur : <<http://iisd1.iisd.ca/measure/bellagio1.htm>> (consulté le 15/06/2005).

BERDIER C., TOUSSAINT J-Y. Sept hypothèses sur l'acceptabilité des ouvrages alternatifs d'assainissement des eaux pluviales par infiltration. **In** : NOVATECH 2007. 6ème Conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, 25- 28 juin 2007, Lyon. Lyon : GRAIE, 2007, 8p.

BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L. Polluants des rejets urbains de temps de pluie : natures, concentrations, flux, caractéristiques physico-chimiques, solides en suspension. Notes de cours. DEA Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, URG, 1999, 53 p.

BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., BARRAUD S., LIPEME KOUYI G., TORRES A., LEPOT M. Event and annual TSS and COD loads in combined sewer overflows estimated by continuous in situ turbidity measurements. **In**: Proceedings of the 11th International Conference on Diffuse Pollution, 26-31 August 2007, Belo Horizonte, Brazil. Belo Horizonte: 2007, 8 p.

BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L. Programme rw123etalo : 1st, 2nd and 3rd order polynomial Williamson regression with uncertainties in both variables. Villeurbanne France: INSA de Lyon, LGCIE, user note, 2007, 11 p.

BINDER S.M.D., SOKAL D.M.D., MAUGHAN D.M.A. Estimating soil ingestion : the use of tracer elements in estimating the amount of soil ingestion by young children. Archives of Environmental Health, 1986, vol. 41, n° 6, pp. 341-345.

BOUWER E.J., McCARTHY P.L., BOUWER H., RICE R.C. Organic contaminant behavior during rapid infiltration of secondary wastewater at the Phoenix 23rd avenue project. Water research, 1984, vol. 18, n°4, pp. 463-472.

BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, 2002, vol. 10, n° 1, pp. 121-142.

BOUWER H. Theory of seepage from open channels. Advances in hydrosciences, 1969, vol.1, n° 5, pp. 121-172.

BRANS J.-P., MARESCHAL B, VINCKIE P. PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. **In** : BRANS J.-P., editor, Operational Research, IFORS 84, North Holland, Amsterdam : Elsevier Science Pub 1984, pp. 477-490.

BROWN & CALDWELL CONSULTING ENGINEERS. Fresno nationwide urban runoff project: final report for the Fresno Metropolitan Flood District. Sacramento, Californie: BROWN & CALDWELL CONSULTING ENGINEERS, 1984, 165 p.

BROWNE D., DELETIC A., MUDD G., FLETCHER T.D. A two-dimensional model of hydraulic performance of stormwater infiltration systems. Water Resources Research, article soumis, à paraître. 2008

BURGEAP. Cartographie multicritère pour la gestion patrimoniale de la nappe de l'Est Lyonnais. Note interne AD – 01/1996, 4 p.

CALABRESE E.J., BARNES R., STANEK III E.J., PASTIDES H. How much soil do young children ingest : an epidemiologic study. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1989, vol. 10, n° 2, pp. 123-137.

CALABRESE E.J., STANEK E.J., JAMES R.C., ROBERTS S.M. Soil ingestion : a concern for acute toxicity in children. Environmental Health Perspectives, 1997, vol. 105, n° 12, pp. 1354-1358.

CARAMORI V. Estudo experimental de tricheiras de infiltração como elemento de controle da geração de escoamento superficial. Tese de Doutorado em Engenharia de recursos hídricos e saneamento ambiental. Porto Alegre: URG/IPH, 2002, 127 p.+ annexes.

CASHMAN A., SAVIC D., SAUL A., ASHLEY R., WALTERS G., BLANKSBY J., DJORDJEVIC S., UNWIN D., KAPELAN Z. Whole life costing of sewers (cost-s): developing a sustainable approach to sewer network management. **In**: GRAIE 5ème conférence internationale, 7-8 juin 2004, Lyon, France. Villeurbanne : GRAIE, 2004, 1711 p.

CASTRO L. M. A. Proposição de indicadores para a avaliação de sistemas de drenagem urbana. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, Brésil: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002, 118 p.

-
- CASTRO L.M.A. & BAPTISTA M.B. Indicators proposition for urban drainage systems evaluation in developing countries. **In** : GRAIE 5ème conférence internationale, 7-8 juin 2004, Lyon, France. Villeurbanne : GRAIE, 2004, 1711 p.
- CERTU, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. La ville et son assainissement : principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau [**CD ROM**]. Paris : CERTU, 2003.
- CERTU. Techniques alternatives aux réseaux de assainissement pluvial: éléments clés pour la mise en œuvre. Lyon : Edition du CERTU, 1998, 155 p. (Collection Environnement).
- CHAPMAN P.M. Integrating toxicology and benthic ecology: Putting the "eco" back into ecotoxicology. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, vol. 44, n°1, pp. 7-15.
- CHEBBO G. Solides des rejets pluviaux urbains caractérisation et traitabilité. Thèse de Doctorat. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992, 413 p + annexes.
- CHEBBO G., MOUCHEL J.-M., SAGET A., GOUSAILLES M. La pollution des rejets urbains par temps de pluie : flux, nature et impacts. *Techniques Sciences et Méthodes*, 1995, vol. 11, pp. 796-806.
- CHOCAT B. Définition d'une méthode d'évaluation environnementale, technique et socio-économique de stratégies d'assainissement pluvial par infiltration en milieu urbain. Thématiques prioritaires de la Région Rhône Alpes 2003-2005. Rapport Année 2. Lyon : Région Rhône Alpes, 2004, 49 p.
- CHOCAT B., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., BARRAUD S. Eaux pluviales urbaines et rejets urbains par temps de pluie. Paris (France) : Les Techniques de l'Ingénieur, article W 6 800, août 2007, 17 p. + annexes. 2007.
- CHOCAT B. (Coord.) Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris : Lavoisier, 1997, 1 124 p.
- CHURMAN C.W., ACKOFF R.L. An approximate measure of value. *Journal of Operational Research Society of America*, 1954, vol.2, n° 2, pp. 255-258.
- CIRIA. Report 156 Infiltration drainage: manual of good practice. London : Construction Industry Research and Information Association, 1996, 107 p.
- CITEAU L. Transfert sols-eaux-plantes de micropolluants : état des connaissances et application aux eaux de ruissellement urbaines. Rapport Final. Versailles : INRA Versailles pour le compte de l'Agence de l'Eau Seine Normandie, 2006, 132 p.
- CLAUSING P., BRUNEKREEF B., VAN WIJNEN J. H. A method for estimating soil ingestion by children. *International archives of occupational and environmental health*, 1987, vol. 59, n° 1, pp. 73-82.
- CLOZEL B., RUBAN V., DURAND C., CONIL P. Origin and mobility of heavy metals in contaminated sediments from retention and infiltration ponds. *Applied Geochemistry*, 2006, vol.21 n° 10, pp. 1781-1798.
- COLANDINI V. Effets des structures réservoirs a revêtement poreux sur les eaux pluviales : qualité des eaux et devenir des métaux lourds. Thèse de Doctorat. Bouguenais : Université de Pau et des pays de l'Adour, 1997, 254 p.
- COUSQUER Y., DUMONT J., HANUS F., LAVOUX T., PRIME J.-L. Les indicateurs de performance appliqués aux services publics de l'eau et de l'assainissement - Constats et propositions. 2004 – 0062-1 - 11 avril 2005. 2004, 120 p.
- CRABTREE B., MOY F., WHITEHEAD M. Pollutants in highway runoff. **In**: 10th International Conference on Urban Drainage, 21-26 August 2005. Copenhagen, Denmark, 2005, 8p.
- CURY M.V.Q. Matemática Financeira Rio de Janeiro. [**en ligne**]. Brésil, 2004. Disponible sur : <http://www.marvinconsultoria.com.br/MFApost.PDF> (consulté le 05/05/2004).

-
- DANIEL D. E. In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, vol. 115, n° 9, pp. 1205-1226.
- DATRY T. Urbanisation et qualité des nappes phréatiques- réponses des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau pluviale. Thèse de doctorat. Lyon : Université Lyon 1, 2003, 220 p.
- DATRY T., MALARD F., GIBERT J. Response of invertebrate assemblages to increased groundwater recharge rates in a phreatic aquifer. *Journal of The North Benthological Society*, 2005, vol. 24, n° 3, pp.461-477.
- DAVIS S., WALLER P., BUSCHOM R., BALLOU J., WHITE P. Quantative estimates of soil ingestion in normal children between the ages 2 and 7: population based stimates using Al, Si and Ti as soil tracer elements. *Archive of Environmental Health*, 1990, vol. 45, pp. 112-122.
- DCR. Virginia Department of Conservation and Recreation. Virginia Stormwater Management Handbook. 1st edition. Volume 1, 1999, 619 p.
- DECHESNE M. Connaissance et Modélisation du fonctionnement des bassins d'infiltration d'eaux de ruissellement urbain pour l'évaluation des performances techniques et environnementales sur le long terme. Thèse de Doctorat. Lyon : INSA de Lyon, 2002, 276 p. Disponible en ligne sur : <<http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=dechesne>>.
- DECHESNE M. BARRAUD S., BARDIN J-P., VARNIER J-C. Indicators for assessment of stormwater infiltration basins. **In** : GRAIE 5ème conférence internationale, 7-8 juin 2004, Lyon, France. Villeurbanne : GRAIE, 2004, 1711 p.
- DE SAINT JEAN B., FOL G. Indicateurs de performance des systèmes de rétention / infiltration des eaux de ruissellement urbain. Rapport de Projet d'Initiation à la Recherche & Développement. Lyon : INSA de Lyon, EDU, 2005, 98 p.
- DECRET n° 93-745 du 29 mars 1993 relatif au fonds de modernisation de la gestion des déchets.
- DELATTRE C., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L. Caractérisation et traitabilité des sous-produits solides de l'assainissement. Rapport intermédiaire. Bordeaux (France) : CTIA Lyonnaise des Eaux, rapport GARIH, 1996, 63 p. + annexes.
- DERUELLE F. Caractérisation, traitement et valorisation des sédiments issus de l'assainissement pluvial. Rapport. Lille : Université des Sciences et des Technologie de Lille, 2004.
- DESJARDIN V. Les déchets des ouvrages d'infiltration des eaux de ruissellement. Communication personnelle. 05/03/2007.
- DIRECTION GENERALE DE L'ENRGIE ET DES MATIERES PREMIERES. Les équivalences énergétiques et la nouvelle méthodologie d'établissement des bilans énergétiques de la France [**en ligne**]. Paris : 2002. Disponible sur : <<http://www.industrie.gouv.fr/>> (consulté le 28/01/2008).
- DIRECTION GENERALE DE L'ENRGIE ET DES MATIERES PREMIERES. Energies et matières premières : la situation énergétique de la France [**en ligne**]. Paris : 2007. Disponible sur : <<http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/depliant.pdf>> (consulté le 07/08/2007).
- DURAND C. Caractérisation physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial : Origine et devenir des métaux traces et des polluants organiques. Thèse de Doctorat. Poitiers : Université de Poitiers, 2003, 248 p.
- DURIN B. Transfert et transport colloïdal de polluants métalliques. Thèse de doctorat. Nantes : Université de Nantes, 2006.
- ELLIS J. B, DEUTSCH J.-C., MOUCHEL J.-M., SCHOLES L. AND REVITT D. M. Multi-Criteria Decision Approaches to Support Sustainable Drainage Options for the Treatment of Highway and Urban Runoff in the UK and France. *Science of the Total Environment*, 2004b, vol. 334-335, pp. 251-260.

-
- ELLIS J. B., CHOCAT B., FUJITA S., RAUCH W., MARSALEK J. Urban drainage: A multilingual Glossary. London: IWA publishing, 2004a, 512 p.
- ELLIS J. B., MARSALEK J., CHOCAT B. Urban water quality. **In**: ANDERSON G. Encyclopedia of hydrological science. London: John Wiley & sons, 2005, pp. 1479-1491.
- ELLIS J. B. Infiltration Systems: A Sustainable Source-Control Option for Urban Stormwater Quality Management. Water and Environment Journal, 2000, vol.14, n°1, pp. 27–34.
- ELLIS-J-B; WONG-MING H. Risk assessment approaches for ecosystem responses to transient pollution events in urban receiving waters. Environmental contamination, toxicology and health, 2000; vol. 41, n°1-2, pp. 85-91.
- EWAN ASSOCIATES LTD – MOTT MACDONALD LTD. Development of enhanced serviceability indicators for sewerage assets. 01-G003/02/Ofwat/od/dg/002/63452. OFWAT – Environment Agency, 2001, 126 p.
- FAULKNER B. The control of surface water runoff from new development – UK national ‘policy’ in need of review? Urban Water, 1999, vol. 1, n° 3, pp. 207-215.
- FIELD R., STRUCK S.D., TAFURI A.N., PORTS M.A., CLAR M., CLARK S., RUSHTON B. BMP technology in urban watersheds: current and future directions. Reston, Etats Unis: ASCE/EWRI, 2006, 324p.
- FISCHER D., CHARLES E., G., BAEHR A. L. Effects of stormwater infiltration on quality of groundwater beneath retention and detention basins. Journal of Environmental Engineering, 2003, vol. 129, n°5, pp. 464-471.
- FOUILLOUX R-C., AIRES N. Mise en oeuvre et maintenance des séparateurs de liquides légers et débourbeurs ». Avant projet soumis à l’enquête : XP P 16-442. Enquête Commission AFNOR. Paris, La Défense : Afnor, 2002.
- FOULQUIER A., MALARD F., BARRAUD S., GIBERT J. Thermal influence of urban groundwater recharge from stormwater basins Hydrological Processes, à paraître. 2007
- FRENI G., OLIVERI E., VIVIANI G. Infiltration facilities design : comparison between simplified approaches and detailed physically based modelling. **In**: 5th international conference on innovative technologies in urban storm drainage, Novatech 2004, Lyon, France, June 6-10, 2004, pp. 1105-1112.
- GANAYE A., WINIARSKI T., GOUTALAND D. Impact d'un bassin d'infiltration d'eaux pluviales sur sa zone non saturée : relation entre la rétention des métaux et l'hétérogénéité de la formation fluvioglaciale. **In** : NOVATECH 2007. 6ème Conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, 25- 28 juin 2007, Lyon. Lyon : GRAIE, 2007, 8p.
- GAUTIER A., BARRAUD S., BARDIN J.P. An approach to the characterisation and modelling of clogging in stormwater infiltration facilities. **In**: 8th International Conference on Urban Drainage, Sydney, Australia, August 30 - September 3 1999. Sydney: 1999, Vol. 2, pp 1007-1015.
- GAUTIER A. Contribution à la connaissance du fonctionnement d’ouvrages d’infiltration d’eau de ruissellement pluvial urbain. Thèse de doctorat. Lyon : INSA de Lyon, 1999, 258 p.
- GEERSE J.M.U., LOBBRECHT A.H. Assessing the performance of urban drainage systems: “general approach” applied to the city of Rotterdam. Urban water, 2002, vol.4, n° 2, pp. 199-209.
- GILARD O. Les bases techniques de la méthode Inondabilité. Cemagref Editions, 1998, 207p.
ISBN : 2-85362-497-8
- GNOUMA R. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron. Doctorat en Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, 2006, 412p.

-
- GOBEL P., STUBBE H., WEINERT M., ZIMMERMANN J., FACH S., DIERKES C., KORIES H., MESSER J., MERTSCH V., GEIGER W. F., COLDEWEY W. G. Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 299, n°3-4, pp.267-283.
- GONZALES A., MOILLERON R., CHEBBO G., THEVENOT D. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban runoff samples from the “Le Marais” experimental catchment in Paris centre. *Polycyclic Aromatic Compound Journal*, 2000, vol. 20, n°1-19.
- GRAND LYON. Guide à l’attention des concepteurs pour la gestion des eaux pluviales sur le territoire du Grand Lyon. Version2. Lyon : Grand Lyon, 2007, pagination multiple.
- GRUNTHAL G., THIEKEN A. H., SCHAWARZ J., RADTKE K. S., SMOLKA A., MERZ B. Comparative Risk Assessments for the City of Cologne: Storms, Floods, Earthquakes. *Natural Hazards*, 2006, vol. 38 n°1-2, pp. 21-44.
- GUERIN-SCHNEIDER L. Introduire la mesure de performance dans la régulation des services d'eau et d'assainissement en France - Instrumentation et organisation. *Gestion – Science de l’eau*. Paris : l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 2001, 448 p.
- HART M. Guide to Sustainable Community Indicators. USA : Sustainable measures Editors, 1999.
- HAUGER M. B., MOUCHEL J.-M., MIKKELSEN P.S. Indicators of hazard, vulnerability and risk in urban drainage. *Water Science & Technology*, 2006, vol. 54, n° 6-7, pp 441–450.
- HAWLEY J.K. Assessment of Health Risk from Exposure to Contaminated Soil. *Risk Analysis*, 1985, vol. 5, n° 4, pp. 289-302.
- HEATHCOTE I. W. Integrated watershed management: principles and practice. New York: John Wiley & Sons, 1998, 414p.
- HELAINÉ D. Les boues de curage des réseaux d'assainissement : caractéristiques et techniques de traitement / valorisation. *Techniques Sciences et méthodes*, 2000, vol.4.
- HJERPE M., KRANTZ H. Handling stormwater in open structures a case study of critical factors for sustainability. **In** : IWA. Berlin 2000. Department of Water and Environmental Studies, Linköping University of Sweden, 2001.
- HR WALLINFORD. Whole life costing for sustainable drainage. **[en ligne]** London: Ciria, 2005. Disponible sur < <http://www.ciria.org/suds/> > (consulté le 12/04/2006).
- HUBERT P. Pour un meilleur usage du risque attribuable en santé environnementale. *Environnement, Risques & Santé*, 2003, vol. 2, n° 5, pp. 266-278.
- HUTTER U., REMMLER F. Stormwater infiltration at a site with critical subsoil conditions : investigation of soil, seepage water and groundwater. **In** : 7th international conference on urban storm drainage, 9-13 septembre 1996, Hannover, Germany. Hannover : IAHR:IAWQ, 1996, pp. 713-718.
- IBRAHIM M. Aide multicritère à la décision pour le développement d’un service durable de l’assainissement pluvial par infiltration. Master en Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, 2005, 107 p.
- ICE, GREEN. Etude de programmation énergétique régionale pour la région de Bretagne. Volume 1 : bilan énergétique. ADEME, 2003, 95p.
- IFEN. Aménagement du territoire et environnement : politiques et indicateurs, Publication : Institut Français de l’Environnement, 2000, 132 p.
- INSTITUT DE GESTION DELEGUEE. Indicateurs de performance eau potable et assainissement : Pour une liste commune – Charte des services publics locaux. Paris : Institut de Gestion Déléguée, 2004, 51 p.

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – plomb et ses dérivés. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2003a. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) : Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes : Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélanges Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérigènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR). Rapport Final **[en ligne]**. Paris : INERIS, 2003. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 06/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – cadmium et ses dérivés. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2005a. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – cuivre et ses dérivés. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2005b. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – chrome et ses dérivés. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2005c. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – zinc et ses dérivés. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2005d. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Polychlorobiphényles. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2005e. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Benzo[k]fluoranthène. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2005f. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Indeno[1,2,3, c, d]pyrène. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2005g. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques –Fluoranthène. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2005h. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – mercure et ses dérivés. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2006a. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Benzo[a]pyrène. **[en ligne]**. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2006b. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Benzo[g,h,i]perylène. [**en ligne**]. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2006c. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – nickel et ses dérivés. [**en ligne**]. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2006d. Disponible sur : <<http://www.ineris.fr>> (consulté le 10/10/2007).

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE POUR LA PREVISION DES ACCIDENTS DU TRAVAIL ET DES MALADIES PROFESSIONNELLES. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. Note Documentaire [**en ligne**]. Institut National de Recherche et Sécurité, 2005. Disponible sur : <www.inrs.fr> (consulté le 15/12/2007).

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE POUR LA PREVISION DES ACCIDENTS DU TRAVAIL ET DES MALADIES PROFESSIONNELLES. Les hydrocarbures Aromatiques ED 4226. [**en ligne**]. Institut National de Recherche et Sécurité, 2004. Disponible sur : <www.inrs.fr> (consulté le 18/12/2007).

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE POUR LA PREVISION DES ACCIDENTS DU TRAVAIL ET DES MALADIES PROFESSIONNELLES. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France ED 984. Paris : INRS, 2007, 24 p.

INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE/AFSSE. Estimation de l'impact sanitaire d'une pollution environnementale et évaluation quantitative des risques sanitaires. Rapport provisoire. Paris: InS/Afsse, 2005, 157p.

ISHIZAKI K., IMBE M., NI G., TAKESHIMA M. Background of rainwater infiltration technology. **In**: 7th International Conference on Urban Storm Drainage, Hannover, Germany, 1996.

ISO. Qualité du sol - Effets des polluants vis-à-vis des vers de terre (*Eisenia fetida*) - Partie 1: Détermination de la toxicité aiguë en utilisant des substrats de sol artificiel. ISO 112 68-1, Geneve : ISO, 1993, 7p.

ISO. Environmental management - environmental performance evaluation – guidelines. ISO CD 14031 1996, Genève : ISO, 1996, 33 p.

ISO. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. ISO 14040, Geneve : ISO 2006, 23p.

ISO. Qualité du sol - Essai d'évitement pour contrôler la qualité des sols et les effets des produits chimiques sur le comportement (*Eisenia fetida* et *Eisenia andrei*). ISO/FDIS 17512-1, Geneve : ISO 2008.

JACQUET-LAGRÈZE E., SISKOS J. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making: the UTA method. European Journal of Operational Research, 1982, vol. 10, n° 2, pp. 151-164.

JANSEN R., KOSTER M., STRIJTVEEN B., MILIEUVRIENDELIJK. verpakken in de toekomst: een scenario voor 2001. Amsterdam: 1990, 121 p.

KASTNER A. Etude critique d'un jeu d'indicateurs pour l'évaluation des techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales. DEA Génie Civil. Lyon : INSA Lyon, URGC, 2003, 116 p.

KOLSKY P. & BUTTLER D. Performance indicators for urban storm drainage in developing countries. Urban Water, 2002 vol.4, n° 2, pp.137- 144.

KRAHN J. Seepage Modelling with SEEP/W. Calgary: Geo-Slope International Ltd., 2004, 398 p.

KROES J. G., Van DAM J. C. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Alterra, Wageningen: 2003, 691 p.

LABORATOIRE REGIONAL DE L'OUEST PARISIEN. Efficacité d'ouvrages de dépollution des eaux pluviales. Paris : LROP, Trappes, 1998, 66p.

LABOUZE E. & R. La comptabilité de l'environnement. Revue Française de Comptabilité, 1995, n°272, 92 p.

LARMET H. Mobilisation et transfert de Zn, Cd, Cu et des colloïdes bactériens dans les bassins d'infiltration des eaux pluviales : influence des conditions hydrodynamiques. Thèse de Doctorat en sciences. Lyon : LSE-ENTPE, 2007, 366p.

LE COUSTOMER S. Ouvrages d'infiltration des eaux pluviales : performance hydraulique et environnementale. Thèse de Doctorat en Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon. A paraître, 2008.

LEE P., TOURAY J. C., BAILLIF P., ILDEFONSE J. P. Heavy metal contamination of settling particles in a retention pond along the A-71 motorway in Sologne, France. Science of the Total Environment, 1997, vol. 200, n° 1, pp. 1-15.

LEEFLANG M.J., MONSTER N.J. The design of infiltration and percolation facilities: literature review. Delft: technische Universiteit Delft, 1995, 110p.

LE GAUFFRE P., JOANNIS C., BREYSSE D., GIBELLO C., DESMULLIEZ J.J. Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains - Guide méthodologique, Paris : Lavoisier, Editions Tec & Doc, 2004, 428 p.

LOI n°75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux modifié par la Loi n°92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement NOR: ENVX9200049L. Journal Officiel du 16 juillet 1975.

LOI n° 92-3. Loi sur l'eau du 3 janvier 1992.

LUNDIN M. Environmental sustainability of urban water systems through indicators and LCA. 15th European junior scientist workshop "Decision support for urban water management", may 11-14, 2000. Stavoren, The Netherlands, pp.109-118.

MAIDMENT R. Handbook of Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1993, 1 400 p.

MALARD F. Les impacts de l'infiltration des eaux de ruissellement sur la nappe. Communication personnelle. 31/05/2007.

MALMQUIST P.A., HARD S. Groudwater quality changes caused by stormwater infiltration. **In** : 2nd International Conference in Urban Storm Drainage. Urbana, Etats-Unis. 1981, vol.2, pp.89-97.

MARSHALL A. Principles of economics : an introductory volume. [en ligne] 1ère édition. London : Mc Millan & Company Limited, 1890 .Disponible sur <<http://www.marxists.org/reference/subject/economics/marshall/index.htm>> (consulté le 10/12/2007)

MARTINELLI I. Infiltration des eaux de ruissellement pluvial et transfert de polluants associés dans un sol urbain – Vers une approche globale et pluridisciplinaire. Thèse de doctorat. Lyon : INSA de Lyon, 1999, 195 p.

MASON Y., AMMANN A. A., ULRICH A., SIGG L. Behavior of heavy metals, nutrients, and major components during roof runoff infiltration. Environment Science and Technology, 1999, vol. 33, n°10, pp. 1588-1597.

MATOS R., CARDOSO A., ASHLEY R., DUARTE P., MOLINARI A., SCHULZ. A. Performance indicators for wastewater services. Hardback. IWA Publishing, 2003, 192 p.

MAYSTRE L.M., BOLLINGER D. Aide à la négociation multicritère. Lausanne, Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1999, 192 p. (Collection « Gérer l'environnement »)

MAYSTRE L.Y., PICTET J., SIMOS J. Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. Lausanne, Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994, 323p.

MC ALLISTER D.M. Evaluation in Environmental Planning: Assessing Environmental, Social, Economic and Political Trade-Offs. Cambridge: The MIT Press, 1980, 318 p.

MELQUIOT P. 1 001 mots et abréviations de l'environnement et du développement durable. Lyon : Recyconsult, 2003, 192p.

MINISTERE DE L'AMANAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT. Classeur relatif à la « Gestion des sites (potentiellement) pollués ». Version 2 [en ligne]. Paris : Edition BRGM, 2000. Disponible sur : <<http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr.GuidesMethodologiques/guidesevaluations evaluationsimplifiee /telechargementesr>> (consulté le 15/06/2006).

MIKKELSEN P. S., HAFLIGER M., OCHS M., JACOBSEN P., TJELL J. C. , BOLLER M. Pollution of soil and groundwater from infiltration of highly contaminated stormwater: A case study. Water Science and Technology, 1997, vol. 36, n°8-9, pp. 325-330.

MIKKELSEN P.S., WEYER G., BERRY C., WALDEN Y., COLANDINI V., POULSEN S., GROTEHUSMANN D., ROHLFING R. Pollution from urban stormwater infiltration. Water Science and Technology, 1994, vol. 29, n° 1-2, pp. 293-302.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE Décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées (NOR: DEVO0640035D) [en ligne]. Journal officiel du 10 décembre 1997. Disponible sur : <<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000739355&dateTexte=&fastPos=1&fastReqId=1999560602&oldAction=rechTexte>> (consulté le 15/08/2006).

MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. Diagnostics du site. [en ligne]. Paris : MEDD, 2007a, 272 p. Disponible sur : <<http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr>> (consulté le 10/12/2007).

MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. La Démarche de l'Interprétation de l'Etat des milieux. [en ligne]. Paris : MEDD, 2007b, 41 p. Disponible sur : <<http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr>> (consulté le 10/12/2007).

MINISTERE DE LA SOLIDARITE DE LA SANTE ET DE LA PROTECTION SOCIALE Décret n 89-3 du 3 Janvier 1989 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minerales naturelles (NOR: SPSP8801764D). [en ligne]. Journal officiel du 4 Janvier 1989. Disponible sur : <http://www.legifrance.gouv.fr/jopdf/common/jo_pdf.jsp?numJO=0&dateJO=19890104&numTexte=&pageDebut=00125&pageFin=>> (consulté le 22/12/2005).

MINISTRY OF ENVIRONMENT AND ENERGY. Stormwater management practices planning and design manual. Toronto (Canada): Environmental Sciences & Standards Division - Program Development Branch - Ontario Ministry of Environment and Energy, 1994, 260 p.

MINISTERIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço energético nacional: ano base 2004. Relatorio Final. Rio de Janeiro: EPE, 2005, 188 p.

MIQUEL G. La qualité de l'eau et assainissement en France. Rapport de l'OPECST n° 2152 (2002-2003), fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques. [en ligne]. Paris : Assemblée Nationale, 2003. Disponible sur : <<http://www.senat.fr/rap/l02-215-1/l02-215-11.pdf>> (consulté le 24/11/2006).

MOURA P. Avaliação Global de Sistemas de Drenagem Urbana. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte : Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, 2004, 146p.

MOURA P.M. (2008). Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 363 p.

MOURA P.M., BAPTISTA M.B., BARRAUD S. Indicator weighting for decision aid applied to urban stormwater systems. **In** : ANTUNES A. ed. 4th International Conference on Decision Making in Urban & Civil Engineering, October 28-30, 2004, Porto, Portugal. Coimbra : University of Coimbra & Decision Making in Urban and Civil Engineering society, 2004, 10 p.

-
- MOTTIER V., BOLLER M. Les eaux de ruissellement des toits. Qualité et des dynamiques des charges polluantes. Rapport d'étude de l'EAWAG. EAWAG : Suisse, 1992, 45 p.
- NATIONAL ENVIRONMENT PROTECTION COUNCIL. Schedule B(1): Guideline on the Investigation Levels for Soil and Groundwater. Camberra: NEPC, 1999, 16 p.
- NIGHTINGALE H.I. Lead, Zinc, and Copper in Soils of Urban Storm-Runoff Retention Basins. American Water Works Association Journal, 1975, vol. 67, p. 443-446.
- NIGHTINGALE H. I. Water quality beneath urban runoff water management basins. Water resources Bulletin, 1987, vol. 23, n°2, pp. 197-205.
- NMHSPE. Circular on target values and intervention values for soil remediation. **[en ligne]**. Amsterdam : The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 2000. Disponible sur <<http://www.vrom.nl/>> (consulté le 14/06/2005).
- NORTH CENTRAL TEXAS COUNCIL OF GOVERNMENTS. Annual regional stormwater monitoring report for North Central Texas. **[en ligne]** Dallas: NCTCG, 1999, 23 p. Disponible sur: <<http://www.txnpsbook.org>>.
- NORTH CENTRAL TEXAS COUNCIL OF GOVERNMENTS. Annual regional stormwater monitoring report for North Central Texas, **[en ligne]** Dallas: NCTCG, 2000, 22 p. Disponible sur: <<http://www.txnpsbook.org>>.
- NORTH CENTRAL TEXAS COUNCIL OF GOVERNMENTS. Annual regional stormwater monitoring report for North Central Texas, **[en ligne]** Dallas: NCTCG, 2001, 23 p. Disponible sur: <<http://www.txnpsbook.org>>.
- OCDE. Corps central d'indicateurs de l'OCDE pour les examens des performances environnementales. Rapport de synthèse du groupe sur l'Etat de l'Environnement, Monographie sur l'environnement n°83. Paris : OCDE, 1993, 35 p.
- OCDE. Indicateurs de l'environnement. Paris : OCDE, 1994. 159 p.
- OMS. Air quality guidelines for Europe. European series. 2nd edition. Copenhagen, Denmark : WHO Regional Publications, n° 91, 2000, 255 p.
- OMS. Valeurs guides pour la qualité de l'air. Version actualisée à l'échelle mondiale de 2005. Matières particulaires, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre. Copenhagen, Denmark : WHO Regional Office for Europe, 2006, ix + 484 p.
- PAGOADA CRUZ V.I. Acceptabilité sociale des techniques alternatives en assainissement pluvial. DEA Villes et sociétés. Lyon : INSA de Lyon, 2004, 204p.
- PAGOTTO C. Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier. Thèse de Doctorat. Poitiers : Université de Poitiers, 1999, 252 p.
- PASTILLE. Indicators into action: A practitioner's guide for improving their use at the local level. **[en ligne]**. Pastille, 2002. Disponible sur <<http://www.lse.ac.uk/collections/PASTILLE>> (consulté le 28/07/2005).
- PENNING-ROUSELL E., FLOYD P, RAMSBOTTOM D, SURENDRAN S. Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework. Natural Hazards, 2005, vol. 36, n° 1-2, pp. 43-64.
- PERRIN B. Effective use and misuse of performance measurement. American Journal Of Program Evaluation, 1998, vol. 19, n° 3, pp. 367-379.
- PERRODIN Y., DELOLME C., WINIARSKI T., BEDELL J.-P., BARRAUD S., BARDIN J.-P., DECHESNE M., GIBERT J., MALARD F., GOURDON R., BRELOT E., BACOT L. Projet MGD Infiltration : Maîtrise et gestion durable des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain, Revue Française de Génie Civil, 2003, vol. 7, n° 1, pp. 81-88.

-
- PERRODIN Y., BARRAUD S., GIBERT J., GOURDON R., DELOLME C., WINIARSKI T., BEDELL J.-P., DESJARDINS V., BARDIN J.P., BACOT L. Programme MGD infiltration : Maîtrise et gestion durable des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. Rapport intermédiaire pour le Réseau Génie Civil & Urbain. Lyon : 2004, 102 p.
- PERRODIN Y., DELOLME C., WINIARSKI T., BEDELL J.-P., BARRAUD S., BARDIN J.-P., LE COUSTUMER S., GIBERT J., MALARD F., MERMILLOD BLONDIN F., GOURDON R., DESJARDIN V., BRELOT E., BACOT L. MGD Infiltration : Maîtrise et gestion durable des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. Programme Réseau Génie Civil & Urbain. Rapport final. Lyon : 2005, 145 p + Annexes.
- PERSONNE M. Contribution à la méthodologie d'intégration de l'environnement dans les PME-PMI : Évaluation des performances environnementales. Thèse Sciences et Techniques du Déchet. Saint Etienne : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et École Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, 1998, 295 p.
- PERSOONE G., GOYVAERTS M., JANSSEN C., DE COEN W., VANGHELUWE M. Cost-effective acute hazard monitoring of polluted waters and waste dumps with the aid of Toxkits. Final Report. Commission of the European Communities, ACE 89/BE 2/D3. 142, 1993. 50 p.
- PERSSON J., SOMES N.L.G, WONG T.H.F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds, Water Science and technology, 1999, vol. 40, n°3, pp. 291-300.
- PETAVY F. Traitement et la valorisation des sédiments de l'assainissement pluvial. Thèse de Doctorat en Génie Civil. Nantes : LCPC, 2007, 283p.
- PETERSEN C.R., FAARBAEK T., JENSEN G.H., WEYER G., FUJITA S., ISHIKAWA K., GELDOLF G., STENMARK C., PRATT C.J. Urban stormwater infiltration design practice and technology : state of the art assesment. Niagara : Sixth international conference on urban storm drainage, 1993. p 969-974.
- PHILIPPE J.P., RANCHET J. Pollution des eaux de ruissellement pluvial en zone urbaine : synthèse de mesures sur dix bassins versants en région parisienne. Rapport de recherche n° 142. Nantes LPC, 1987, 76p.
- PICTET J. Dépasser l'évaluation environnementale. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1996, 187 p. (Collection Meta)
- PILOT ACTIONS FOR COMBINED TRANSPORT. Contribution du transport combine à la réduction des émissions de CO2. Rapport de Synthèse. Bruxelles : UIRR S.C., 2003, 16p.
- PITT R., CLARK S., PARMER K. Potential groundwater contamination from intentional and non intentional stormwater infiltration. Report USEPA /600/R-94/051. 1994, 187 p.
- PITT R., CLARK S., FIELD R. Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices. Urban Water, 1999, vol. 1, n°3, pp. 217-236.
- PLAN BLEU. Les indicateurs d'économie de l'eau : ressources et utilisations, document de réflexion, mai 1996.
- POLLACCO J.A.P., UGDALE J.M., SAUGIER B., ANGULO-JARAMILLO R., BRAUD I. A Linking Test to reduce the number of hydraulic parameters necessary to simulate groundwater recharge in unsaturated soils, Advances in Water Resources, 2008, vol. 31, n° 2, pp. 355-369.
- POMEROL J-C., BARBA-ROMERO S. Choix multicritère dans l'entreprise. Paris (France) : Hermès, 1993, 390 p.
- PRATT C.J., POWELL J.J.M. A new UK approach for the design of sub-surface infiltration systems. 6th Internations Conference on Urban Storm Drainage. Niagara Falls, 1993, pp.987-992.
- PRINCE GEORGE'S COUNTY, Maryland. Low Impact Development Design Strategies: An integrated Approach. **[en ligne]**. Maryland : PGC, 1999, pagination multiple.

-
- PROTON A., CHATAGNON F. Indicateurs de performance des ouvrages de rétention/infiltration – pertinence et applicabilité. Projet de recherche et développement, département Génie Civil et Urbanisme. Lyon : INSA Lyon, 2003, 50p.
- REFSGAARD J.C., STORM B. Chapter 3 : Construction, calibration and validation of hydrological models. **In** : Distributed Hydrological Modelling. Amsterdam, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996, pp. 41-42.
- REYNOLDS W. D., ELRICK D. E. Poned infiltration from a single ring: Analysis of steady flow. Soil Science Society American Journal, 1990, vol. 54, pp. 1233-1241.
- RILEY J. Indicator quality: for assessment of impact multidisciplinary systems. Agriculture, ecosystems and environment, 2001, vol. 87, n° 2, pp. 121-128.
- RIVARD G., RAIMBAULT G., BARRAUD S., FRENI G., ELLIS B., MITSUYOSHI Z., ASHLEY R., QUIGLEY M., STRECKER E. Stormwater. Source Control as a strategy for sustainable Development : State of practice and perceived trends. **In** : 10th International Conference on Urban Drainage, August 21-26, 2005, Copenhagen, Denmark, Aalborg : ed. By ERISSON E., GENC-FUHRMAN H., VOLLERTSEN J., LEDIN A., HVITVED-JACOBSEN T., MIKKELSEN P.S. (DTU: Technical University of Denmark, SEE: Aalborg University), 2005. 8p [CD-ROM].
- RIVM. Evaluation and revision of the CSOIL parameter set. Proposed parameter set for human exposure modelling and deriving Intervention Values for the first series of compounds. Rapport 711701021. OTTE P.F., LIJZEN J.P.A., OTTE J.G., SWARTJES F.A., VERSLUIJS C.W., 2001, 125 p.
- ROBERT M. Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Paris : Masson, 1996, 244p.
- ROSSI L. Qualité des eaux de ruissellement urbaines. Thèse de Doctorat. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998, 313 p + annexes.
- ROSSI L., DE ALENCASTRO L., KUPPER T., TARRADELLAS J. Urban stormwater contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs) and its importance for urban water systems in Switzerland. Science of Total Environment, 2004, vol. 332, n° 3, pp. 179-189.
- ROUSSEAU P. Théorie financière et décision d'investissement. Paris : Economica, 1990, 224 p. (Collection exercices et cas).
- ROY B. Classement et Choix en Présence de Points de Vue Multiples: La Méthode ELECTRE. Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, 1968, vol. 8, pp. 57-75.
- ROY B. ELECTRE III: Un Algorithme de Classements Fondé sur une Représentation Floue des Préférences en Présence de Critères Multiples. Cahiers du Centre d'Etudes de Recherche Opérationnelle, 1978, vol. 20, n° 1, pp. 3-24.
- ROY B. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Paris : Economica, 1985, 423 p.
- ROY B., BOUYSSOU D. Aide multicritère à la décision: méthodes et cas. Paris : Economica, 1993, 695p.
- RUBAN V. Hydrologie des bassins versants péri-urbains équipés de réseaux séparatifs, Rapport. Nantes : LCPC, 2004, 62p.
- RUBAN V. Caractérisation et gestion des sédiments de l'assainissement pluvial. Paris : Edition LCPC, 2005, 151 p. (Collection Génie Urbain)
- SAATY T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, 1977, vol. 15, n°3, pp. 234- 281.
- SAGET A. Base de données sur la qualité de rejets urbains de temps de pluie : distribution de la pollution rejetée, dimensions des ouvrages d'interception. Thèse de Doctorat. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et CERGRENE, 1994, 333 p.

SANDERS B.F., AREGA F., SUTULA M. Modeling the dry-weather tidal cycling of fecal indicator bacteria in surface waters of an intertidal wetland. *Water Research*, 2005, vol. 39, n° 14, pp. 3394-3408.

SCHUELER T.R. *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. Washington DC : Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

SERVICE TECHNIQUE DE L'URBANISME, AGENCES DE L'EAU. *Guide technique des bassins de retenue d'eaux pluviales*. Paris : Tec & Doc Lavoisier, 1994, 275 p.

SIMOS J. *Evaluer l'impact sur l'environnement : une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*. Bienne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1990, 261 p.

SIRIWARDENE N. R. *Development of an experimentally-derived clogging prediction method for stormwater infiltration systems*. Thèse de doctorat. Melbourne: Monash University, 2008, 240p.

SNIFFER. *Social impacts of stormwater management techniques including river management and SUDS*. Report no. SUDS01. Edinburgh: Scotland and Northern Ireland Forum for Environmental Research, 2005, 52 p.

SOUTHEASTERN WISCONSIN REGIONAL PLANNING COMMISSION. *Costs of Urban Nonpoint Source Water Pollution Control Measures*. Technical Report No. 31. Waukesha, WI : 1991, 107 pp.

STAHRE P., URBONAS B. *Stormwater detention for drainage, water quality and CSO management*. Englewood Cliffs, New Jersey, USA : Prentice Hall, 1990, 338 p.

STANEK III E.J. CALABRESE E.J. *Daily estimates of soil ingestion in children*. *Environmental Health Perspectives*, 1995, vol. 103, n° 3, pp. 276-285.

TARO OKA. *Urban storm-runoff control by gravel storage-infiltration method*. **In**: *Seventh International Conference on Urban Storm Drainage*, Hannover, 1996, pp. 509-514.

THUESEN H.G., FABRYCKY G. J. *Engineering Economy*. New Jersey : Prentice Hall, 1977.

TORRES A. *Décantation des eaux pluviales dans un ouvrage réel de grande taille : éléments de réflexion pour le suivi et la modélisation*. Thèse de Doctorat en Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, 2008, 374 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Stormwater Best Management Practices in an Ultra-Urban Setting: Selection and Monitoring*. **[en ligne]**. Landover : Department of Transportation Publications Warehouse, 2002. Disponible sur : <www.fhwa.dot.gov/environment/ultraurb> (consulté le 05/11/2003).

UPPER PARRAMATTA RIVER CATCHMENT TRUST. *Water Sensitive Urban Design: Technical guidelines for western Sydney*. Sydney: UPPER PARRAMATTA RIVER CATCHMENT TRUST, 2004, pagination multiple.

VAN WIJNEN J.H., CLAUSING P., BRUNEKREEF B. *Estimated soil ingestion by children*. *Environmental Research*, 1990, vol. 51, n° pp.147-162.

VINCKE P. *L'aide multicritère à la décision*. Bruxelles: Editions Ellipses, 1989. 179 p.

VSA. *Evacuation des eaux pluviales. Directive sur l'infiltration, la rétention et l'évacuation des eaux pluviales dans les agglomérations*. Zürich : Association Suisse des professionnels de la protection des eaux, 2002, 120 p.

WAARMARS E., LARSEN A. V., JACOBSEN P., MIKKELSEN P. S. *Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during 2 years of operation*. *Water Science and Technology*, 1999, vol. 39, n° 2, pp. 217-224.

WATERSHED PROTECTION TECHNIQUES. *On watershed education*, *Journal on Watershed Protection Techniques*, 2000, vol. 3, n° 3, Feature Article.

-
- WEBER J-L, LAVOUX T. Réflexion sur les critères de définition et de choix des indicateurs d'environnement : notes de méthode de l'IFEN. Édition 94, n°3. Orléans : IFEN, 1994, 54 p.
- WEIGAND H., TOTSCHE K. U., KOGEL-KNABNER I., ANNWEILER E., RICHNOW H. H. and MICHAELIS W. Fate of anthracene in contaminated soil: transport and biochemical transformation under unsaturated flow conditions. *European Journal of Soil Science*, 2002, vol. 53, n°1, pp. 71-81.
- WERF. Performance and whole-life costs of BMPs and SUDS. Repport 01-CTS-21T. Etats Unis: WERF, 2003.
- WILD T.C., MCKISSOCK G., D'ARCY B.J. SHAFFER P., ELLIOT C. An evaluation of SUS guidance in Scotland. **In** : Proceedings of the Second National Conference on Sustainable Drainage, Coventry University, 23-24 June 2003, Coventry. 2003, pp. 1-112.
- WILLIAMSON J.H. Least-squares fitting of a straight line. *Canadian Journal of Physics*, 1968, vol. 46, pp. 1845-1847.
- WINIARSKI T., DELOLME C., BEDELL J.P., GHIDINI M., CROSNIER J., BOBILLON G. Profils chimique, biologique et perméabilité du bassin Django Reinhardt. Rapport Final. Vaulx-en-Velin : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon, 2001, 10 p + annexes.
- WONG T. Australian Runoff Quality : A guide to Water Sensitive Urban Design. Sydney: Engineers Australia, 2006, pagination multiple.
- YOUNG, G.K., STEIN S., COLE P., KAMMER T., GRAZIANO F., BANK F. Evaluation and Management of Highway Runoff. Water Quality Technical Report. Washington, DC : Department of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments, 1996.
- YOUNG R.N., MOHAMED A.M.O., WARKENTIN B.P. Principles of contaminant transport in soils. Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 1992, 327 p.
- YU W. Aide multicritère à la décision dans le cadre de la problématique du tri : Concepts, Méthodes et Applications. Thèse de doctorat. Paris : Université de Paris-Dauphine, 1992.
- ZELENY M. Multiple criteria decision making. New York : Mc GrawHill, 1982, 326 p.

ANNEXE A – La présentation des sites utilisés

Bassin de rétention AhAh

Les informations de ce bassin ont été obtenues à partir de Petavy (2007). Le bassin de rétention AhAh draine une surface urbaine. Il récupère les eaux pluviales des rues des Entrepreneurs et des industries, rues traversant une zone industrielle dans la commune de Crosne (Essonne).



Figure A. 1 - Image aérienne du bassin AhAh

Bassin de rétention / infiltration du Centre Routier

Le bassin d'infiltration rétention du Centre Routier draine un parking de poids lourds, une station essence et un restaurant, le bassin versant est de 2,7 ha. Il est localisé au Bron, dans l'est lyonnais.

Le Tableau A. 1 présente données de conception des bassins.

Tableau A. 1 – Données de conception des bassins du Centre Routier (Grand Lyon, 2001a)

Caractéristiques	
Date de construction	1987
Coefficient d'apport	0,95
Capacité de rétention calculée pour une pluie de retour de	10 ans

Débit de la pluie	1,43 m ³ /s
Vitesse d'infiltration	Non disponible
Niveau piézométrique maximal ¹	9,20 m

¹Source : Dechesne, 2002

Le système est composé d'un bassin de rétention et d'un bassin d'infiltration. Le Tableau A. 2 présente les caractéristiques de chaque bassin.

Tableau A. 2 – Caractéristiques des bassin, Centre Routier(Grand Lyon, 2001a)

Caractéristiques	Bassin de rétention	Bassin d'infiltration
Creusé	oui	oui
Hauteur moyenne fond/niveau des plus hautes eaux	1,50 m	4,00 m
Hauteur moyenne fond/haut de talus	4,62 m	5,00 m
Pente du fond	0,003 m/m	Nulle
Nature du fond	Film étanche	gravier
Surface du fond	812m ²	436 m ²
Surface en haut du talus	3764 m ²	1283 m ²
Volume de stockage (par Bassin)	7 984 m ³	2616 m ³
Nature de l'étanchéité	film 10/10 anticontaminant	bitume
Nature de talus ou des berges	gravier film + enrobés	gravier
Pente des talus	3/2	3/2
Accès pour l'entretien	oui/enrobé/ Pente 7%	Grave compacté

La Figure A. 2 montre une image aérienne des bassins et la Figure A. 3 présente une photo de ces ouvrages.



Figure A. 2 - Image aérienne du bassin de Centre Routier



Figure A. 3 - Centre Routier – Bassin d’infiltration à gauche et bassin de rétention à droite

Dans le bassin Centre Routier, Dechesne (2002) a analysé 39 échantillons de sol provenant du bassin d’infiltration, par rapport à leurs concentrations en polluants. Ces échantillons ont été prélevés en 10 différents points (1 à 10) du bassin d’infiltration, et à différentes profondeurs (A - 0-5 cm ; B - 30-40 cm ; C - 60-70 cm ; D - 100-110 cm). Le Tableau A. 3 présente les résultats des analyses pour chaque échantillon, concernant les polluants utilisés dans les calculs des indicateurs.

**Tableau A. 3 – Résultats de l'analyse du sol du bassin d'infiltration (mg/kg de m.s.) - Centre Routier
(Dechesne, 2002)**

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fluoranthène	Benzo-ghi-pérylène
1A	4,00	60,94	142,35	29,97	222,27	1413,53	6,887	4,9
1B	0,51	13,69	7,61	7,61	8,62	65,93	0,374	0,374
1C	0,51	14,67	8,10	8,10	7,08	56,17	0,391	0,781
1D	0,49	11,37	6,43	7,42	4,94	38,07	0,389	0,778
2A	3,53	49,42	110,44	23,20	147,75	1144,72	11,62	5,378
2B	0,94	18,24	14,03	10,29	28,07	181,96	0,667	0,713
2C	0,47	14,46	7,47	7,47	6,53	71,86	0,362	0,362
2D	0,45	13,59	7,25	9,06	4,98	66,12	0,355	0,355
3A	0,97	22,74	24,67	11,61	67,73	255,46	0,759	0,765
3B	0,50	10,53	2,51	6,52	5,01	19,05	0,393	0,393
3C	0,49	12,76	3,93	7,36	4,91	23,56	0,38	0,38
3D	0,53	20,81	3,20	9,07	5,34	21,88	0,369	0,738
4A	3,55	56,33	121,79	27,40	176,59	1268,63	12,912	9,216
4B	1,04	23,85	20,74	11,41	52,89	247,83	1,183	1,095
4C	0,51	19,54	13,37	11,83	10,29	85,89	0,36	0,36
4D	0,52	19,22	10,91	12,99	6,75	51,95	0,335	0,335
5A	1,54	29,32	38,06	14,40	84,87	457,76	2,29	2,81
5B	1,01	29,91	29,40	14,19	83,13	371,03	3,453	3,129
5C	0,51	13,23	7,64	7,64	17,82	73,30	0,393	0,524
5D	0,51	22,87	14,23	19,31	7,11	54,37	0,363	0,726

6A	2,45	38,17	75,36	21,53	111,09	836,83	4,57	3,4
6B	0,46	16,59	5,99	10,14	4,61	27,65	0,359	0,719
6C	0,46	16,03	5,04	8,70	4,58	22,44	0,348	0,696
7A	4,75	66,92	175,61	33,22	223,08	1827,34	27,042	12,738
7B	0,48	21,59	7,68	9,60	4,80	45,58	0,381	0,762
7C	0,46	19,49	8,35	9,75	4,64	41,77	0,404	0,809
7D	0,48	17,82	8,67	9,63	4,82	55,39	0,364	0,728
8A	3,67	50,43	97,20	24,30	155,88	1150,80	9,005	7,797
8B	0,96	22,03	17,72	10,53	28,73	197,29	0,543	0,694
8C	0,48	15,43	9,16	8,68	8,19	89,66	0,362	0,723
8D	0,49	14,61	9,26	8,77	6,33	75,02	0,337	0,674
9A	4,11	66,64	152,00	31,04	224,58	1565,64	9,068	7,447
9B	0,93	17,28	14,01	8,87	19,14	141,95	0,356	0,712
9C	0,52	28,32	9,97	9,44	8,92	89,69	0,361	0,722
9D	0,48	21,28	13,54	12,09	5,80	83,18	0,332	0,665
10A	2,96	48,84	88,80	22,69	143,57	1065,66	7,141	6,667
10B	0,52	21,78	14,52	10,37	19,70	156,08	0,387	0,711
10C	0,52	14,95	9,28	9,28	7,73	67,01	0,347	0,694
10D	0,48	17,43	8,71	9,20	4,84	49,38	0,335	0,671

Bassin de rétention / infiltration de Cheviré

Les informations de ce bassin ont été obtenues à partir de Petavy (2007) et Ruban (2005). Le bassin de Cheviré draine un bassin versant de 38 425 m² du type routier. Il est localisé au sud ouest de Nantes et draine la partie sud du pont de Cheviré qui permet le franchissement de la Loire par la rocade ouest.

Les eaux de ruissellement sont collectées par des avaloirs et recueillies dans des gouttières en aluminium de chaque côté du pont. La surface du bassin est de 780 m² et sa profondeur d'environ 1,50 mètre. Le fond du bassin n'étant pas imperméabilisé, une partie importante peut s'évacuer par infiltration dans le sol.

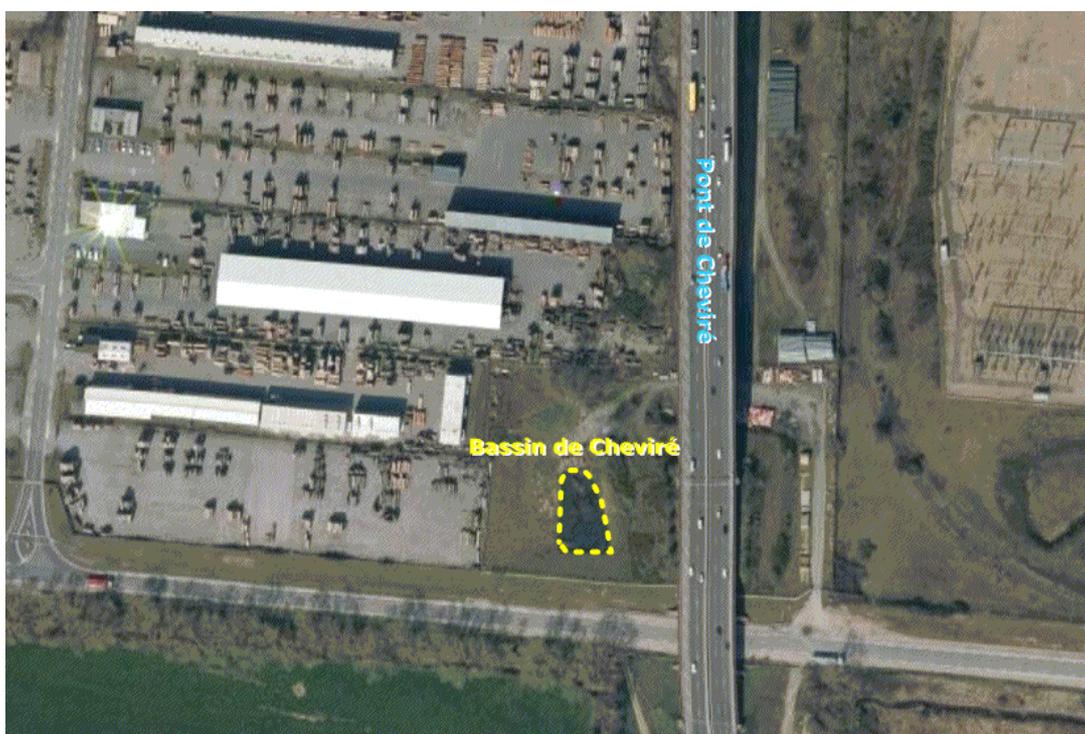


Figure A. 4- Image aérienne du bassin de Cheviré



Figure A. 5- Bassin de Cheviré (Ruban, 2005)

Bassin de rétention / infiltration de Django Reinhardt

Le bassin d'infiltration rétention de Django Reinhardt draine une zone industrielle de 253 ha. Il se localise à Chassieu, dans l'est lyonnais.

Le Tableau A. 4 présente les données de conception des bassins.

Tableau A. 4 – Données de conception des bassins de Django Reinhardt (Grand Lyon, 2001b)

Caractéristiques	
Date de construction	1975 réaménagements en 1985 et en 2004
Coefficient d'apport	0,80
Capacité de rétention calculée pour une pluie de retour de	20 ans
Débit de la pluie	Non disponible
Vitesse d'infiltration	5×10^{-5}
Niveau piézométrique maximal	17 m

Le système est composé d'un bassin de rétention et d'un bassin d'infiltration. Le Tableau A. 5 présente les caractéristiques de chaque bassin.

Tableau A. 5 – Caracteristiques des bassin, Django Reinhardt (Grand Lyon, 2001b)

Caractéristiques	Bassin de rétention	Bassin d'infiltration
Creusé	oui	oui
Hauteur moyenne fond/niveau des plus hautes eaux	2,85 m	4,95 m
Hauteur moyenne fond/haut de talus	5,10 m	7,20 m
Pente du fond	0.004 m/m	0.004 m/m
Nature du fond	Enrobé	Terrain naturel
Surface du fond	11 300 m ²	13 775 m ²
Surface en haut du talus	17 000 m ²	21 000 m ²
Volume de stockage (Par Bassin)	32 200 m ³	68 200 m ³
Nature de l'étanchéité	PEHD	Aucune
Nature de talus ou des berges	Enrobé / galets	Galets
Pente des talus	50 à 55%	40 à 50%
Accès pour l'entretien	Rampe d'accès bitumé (15%)	Rampe d'accès bitumé (13%)

La Figure A. 6 montre une image aérienne des bassins et la Figure A. 7 une photo des bassins.



Figure A. 6 - Image aérienne du bassin Django Reinhardt

Des analyses de concentration en polluants dans le sol du bassin d'infiltration de Django Reinhardt ont été effectuées en trois points distincts (Figure A. 6) :

- le point A : point au fond du bassin à gauche (zone non décolmatée lors de la réfection du bassin en 2004) quatre échantillons ont été pris A1 - 0-5 cm ; A2 - 20-30 cm ; A3 - 50-60 ;cm ; A4 - 90-110 cm ;
- le point B : au milieu de l'entrée du bassin, quatre échantillons ont été pris B1 - 0-3 cm ; B2 - 10-20 cm ; B3 - 50-60 ;cm ; B4 - 90-100 cm ;
- le point C : au fond de l'ouvrage au point bas, trois échantillons ont été pris B1 - 0-5 cm ; B2 - 30-40 cm ; B3 - 70-80 ;cm.

Les Tableau A. 6 et Tableau A. 7 montrent les résultats obtenus.

Tableau A. 6 – Résultats de l'analyse du sol du bassin d'infiltration métaux et autres paramètres (mg/kg de m.s.), Django Reinhardt

	pH	MVS ¹ (%)	COT ² (%)	NT ³ (%)	PT ⁴ (%)	Cd	Cu	Pb	Zn
A1	7,11	16,6	31,9	0,207	0,13	7,1	313	167	2500
A2	9,00	1,76	15,16	0,045	0,06	1,5	31	17	287
A3	9,26	0,72	16,52	0,011	0,06	2,6	6	5	54
A4	9,22	0,83	13,14	0,011	0,08	1,0	6	0	41
B1	7,36	12,86	14,52	0,207	0,18	3,5	265	105	1338
B2	8,83	0,88		0,012	0,06	0	14	8	105
B3	9,12	0,73		0,011	0,06	0	5	0	66
B4	9,13	0,76	19,62	0,011	0,07	0	6	6	132
C1	7,59	7,34		0,2	0,14	1,5	117	57	704
C2	8,98	1,21	18,39	0,024	<0,02	0	5	3	46
C3	9,15	0,82		0,011	0,07	0	11	7	77

¹ Matières volatiles

² Carbone organique total

³ Azote total

⁴ Phosphore total

**Tableau A. 7 – Résultats de l'analyse du sol du bassin d'infiltration hydrocarbures (mg/kg de m.s.),
Django Reinhardt**

	Fluoranthène	Benzo (b) fluoranthène	Benzo (k) fluoranthène	Benzo (a) pyrène	Benzo (ghi) pérylène	Indéno Pyrène	Hydrocarbures Totaux
A1	0,415	0,950	0,459	0,741	1,101	0,723	3553
A2	0,212	0,220	<0,147	0,200	0,266	0,222	212
A3	<0,161	<0,161	<0,161	<0,161	<0,161	<0,161	20
A4	<0,147	<0,147	<0,147	<0,147	<0,147	<0,147	26
B1	2,947	2,783	1,349	2,593	2,389	2,110	18722
B2	<0,157	<0,157	<0,157	<0,157	<0,157	<0,157	221
B3	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	105
B4	<0,141	<0,141	<0,141	<0,141	<0,141	<0,141	124
C1	0,369	0,421	0,209	0,308	0,503	0,363	3640
C2	<0,146	<0,146	<0,146	<0,146	<0,146	<0,146	171
C3	<0,136	<0,136	<0,136	<0,136	<0,136	<0,136	32



Figure A. 7 – Django Reinhardt – Bassin d'infiltration (gauche) et bassin de rétention (droite)

Bassin de rétention / infiltration des Droits de l'Homme

Le bassin d'infiltration rétention des Droits de l'Homme draine une zone mixte (voies de circulation, commerces et tertiaire) de 33,7 ha. Il se localise au Bron, dans l'est lyonnais. Les bassins de rétention

et d'infiltration sont situés dans deux sites différents. Le bassin de rétention est aussi nommé triangle de Bron.

Le Tableau A. 8 présente les données de conception des bassins.

Tableau A. 8 – Données de conception des bassins des Droits de l'Homme (Grand Lyon, 2001c)

Caractéristiques	
Date de construction	1981 changement de couche de gravier infiltration en 1987
Coefficient d'apport	0,6
Capacité de rétention calculée pour une pluie de retour de	20 ans
Débit de la pluie	3,6 m ³ /s
Vitesse d'infiltration	3 × 10 ⁻⁴
Niveau piézométrique maximal ¹	9,20 m

¹Source : Dechesne, 2002

Le système est composé d'un bassin de rétention et d'un bassin d'infiltration. Le Tableau A. 9 présente les caractéristiques de chaque bassin. La Figure A. 8 montre une image aérienne des bassins.

Tableau A. 9 – Caracteristiques des bassins, Droits de l'Homme (Grand Lyon, 2001c)

Caractéristiques	Bassin de rétention	Bassin d'infiltration
Creusé	oui	oui
Hauteur moyenne fond/niveau des plus hautes eaux	2,60	10 m
Hauteur moyenne fond/haut de talus ¹	Non disponible	2,8 m
Pente du fond	0.01 m/m	Nulle
Nature du fond	Enherbé	Gravier
Surface du fond	2 800 m ²	1 100 m ²
Surface en haut du talus	4 500 m ²	4 200 m ²
Volume de stockage (par bassin)	3 800 m ³	1 320 m ³
Nature de l'étanchéité	Non disponible	Aucune
Nature de talus ou des berges	Enherbé	Terrain naturel
Pente des talus	1/2	3/5
Accès pour l'entretien	Rampe enherbée (pente 5,5%)	Rampe grave compactée (pente 12%)

¹Source : Dechesne, 2002



Figure A. 8 - Image aérienne du bassin des Droits de l'Homme

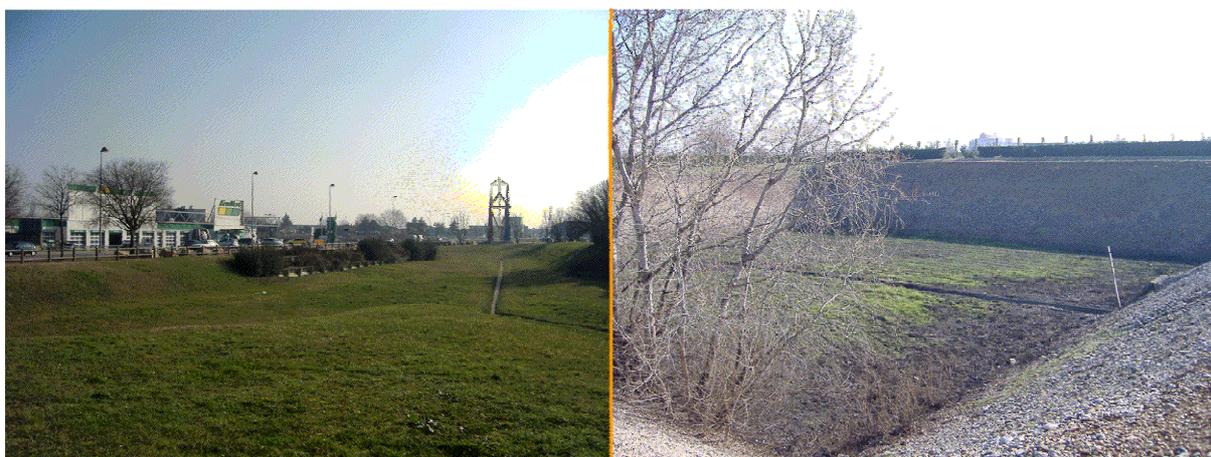


Figure A. 9 - Droits de l'Homme – Bassin d'infiltration (droite) et bassin de rétention (gauche)

Neuf échantillons de sol du bassin d'infiltration ont été analysés par rapport à leur concentration en polluants. Ces échantillons correspondent à trois points du bassin, et, le point d'entrée d'eau (11), le point le plus bas (12) et un autre point (13). Les concentrations en polluants ont été mesurées à différentes profondeurs (A - 0-5 cm ; B- 35-40 cm ; C - 40-45 cm). Les résultats des analyses sont donnés au Tableau A. 10.

Tableau A. 10 – Résultats de l'analyse du sol du bassin d'infiltration (mg/kg de m.s.), Droits de l'Homme (Dechesne, 2002)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fluoranthène	Benzo-ghi-pérylène
11A	3,01	73,85	355,70	53,25	335,61	1155,53	0,598	0,615
11B	1,06	30,08	54,35	17,94	96,57	254,89	<0,374	<0,374
11C	1,52	20,76	45,56	15,19	58,73	132,64	<0,372	<0,372
12A	3,10	57,95	232,31	42,94	260,77	812,31	0,491	0,569
12B	0,52	18,14	23,33	12,44	20,22	50,29	<0,381	<0,381
12C	0,53	19,53	17,42	12,67	23,75	44,33	<0,373	<0,373
13A	2,62	44,59	167,88	34,10	200,41	545,62	<0,373	<0,373
13B	0,52	14,47	9,82	9,30	5,17	20,67	<0,358	<0,358
13C	0,52	15,13	7,83	7,30	7,30	24,00	<0,365	<0,365

Bassin de rétention de Flavigny

Les informations de ce bassin ont été obtenues dans Petavy (2007). Le site de Flavigny se trouve à 8 km au sud de Nancy dans la vallée de la Moselle, sur la voie rapide RN 57 entre Nancy et Epinal. Le dispositif de traitement est composé de deux bassins en série reliés entre eux par un déshuileur préfabriqué. Ces bassins recueillent les eaux de ruissellement d'un bassin routier de 7,5 hectares et présentant une pente moyenne de 4 %.

Le bassin amont présente un volume de stockage de 3 000 m³ pour une surface de 2 500 m². Il est partiellement en eau (hauteur d'eau permanente de 0,8 m et hauteur de marnage de 1,6 m) et assure une fonction de décantation. Le bassin aval d'une capacité de stockage de 1 500 m³ a pour objectif principal d'autoriser un temps d'intervention supplémentaire de plusieurs heures en cas de déversement accidentel d'un polluant miscible dans l'eau. Les deux bassins sont étanchéifiés par une géomembrane en PEHD (polyéthylène haute densité).



Figure A. 10 - Image aérienne du bassin de Flavigny



Figure A. 11 - Bassin de Flavigny (Petavy, 2007)

Bassin de rétention / infiltration de Grange Blanche

Le bassin d'infiltration rétention de Grange Blanche draine une zone mixte de 300 ha. Il se localise à Corbas, dans l'est lyonnais.

Le Tableau A. 11 présente les données de conception des bassins.

Tableau A. 11 – Données de conception des bassins de Grange Blanche (Grand Lyon, 2001d)

Caractéristiques	
Date de construction	1997
Coefficient d'apport	Non disponible
Capacité de rétention calculée pour une pluie de retour de	10 ans
Débit de la pluie	Non disponible
Vitesse d'infiltration	1×10^{-4}
Niveau piézométrique maximal	10,5 m

Le système est composé d'un bassin de rétention et d'un bassin d'infiltration. Le Tableau A. 12 présente les caractéristiques de chaque bassin. La Figure A. 12 montre une image aérienne des bassins.

Tableau A. 12 – Caracteristiques des bassin, Grange Blanche (Grand Lyon, 2001d)

Caractéristiques	Bassin de rétention	Bassin d'infiltration
Creusé	oui	oui
Hauteur moyenne fond/niveau des plus hautes eaux	3,10 m	3,40 m
Hauteur moyenne fond/haut de talus	4,13 m	4,72 m
Pente du fond	0.002 m/m	0.002 m/m
Nature du fond	Enrobé	Grave naturel
Surface du fond	6 117 m ²	3 310 m ²
Surface en haut du talus	8 780 m ²	6 281 m ²
Volume de stockage (Par Bassin)	8 043 m ³	6 200 m ³
Nature de l'étanchéité	Béton bitumineux	Aucune
Nature de talus ou des berges	Bentonite + toile de jute	galets
Pente des talus	2/3	1/2
Accès pour l'entretien	Rampe enrobée (pente 10%)	Rampe enrobée (pente 10%)



Figure A. 12 - Image aérienne du bassin de Grange Blanche

Bassin d'infiltration de Lyon

Les informations de ce bassin ont été obtenues à partir de Petavy (2007). Le bassin d'infiltration de Lyon draine un bassin versant de 38 ha. Le bassin versant est mixte comprenant approximativement 15% de zones imperméables, concernant un tronçon de l'autoroute A47 et l'aire de service de l'autoroute.

Ce bassin a une fonction d'épuration et de régulation de l'eau de ruissellement sur les chaussées mais aussi de régulation du débit pour le bassin versant naturel intercepté par le remblai de l'autoroute.

Les eaux de ruissellement peuvent être récupérées au niveau de deux bassins : un premier bassin revêtu d'une géomembrane en PVC et un deuxième bassin en terre végétale. En fonctionnement normal, le premier bassin est court-circuité et reste sec et l'eau collectée traverse le deuxième bassin que régule le débit.

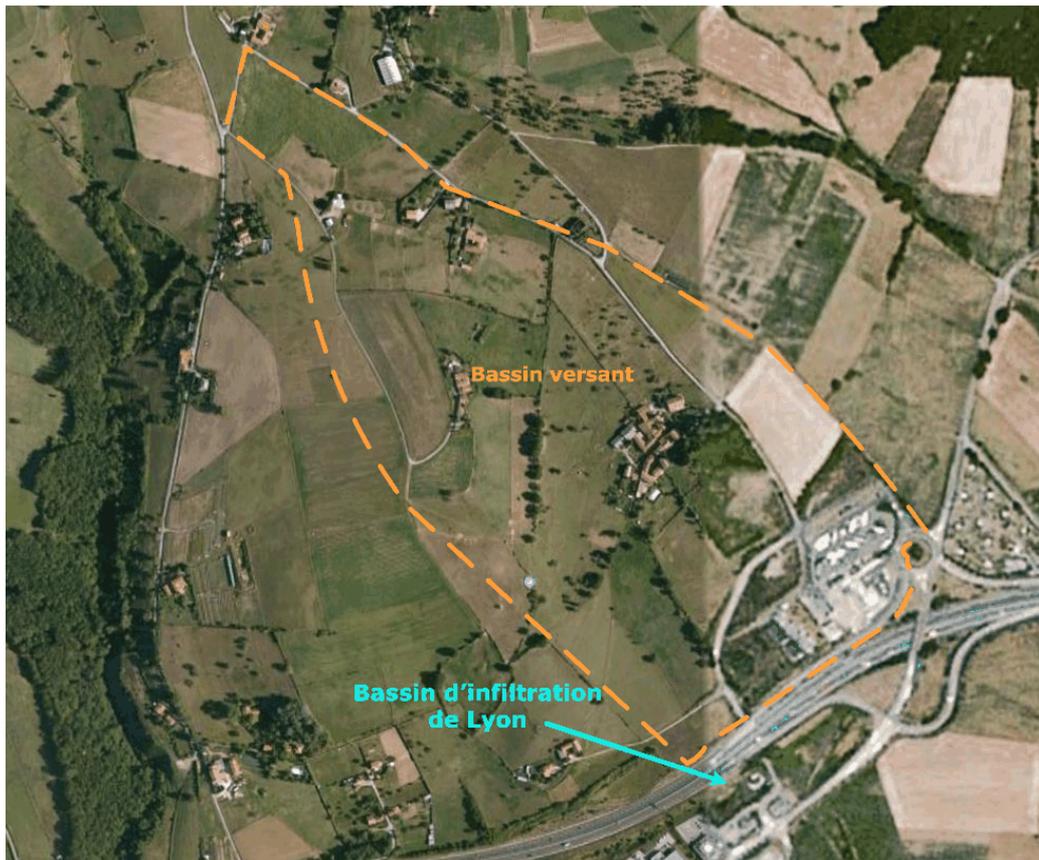


Figure A. 13 - Image aérienne du bassin de Lyon

Bassin de rétention / infiltration de la ZAC du Chêne

Le bassin d'infiltration rétention de la ZAC du Chêne draine une zone d'activités tertiaires de 74 ha. Il se localise au Bron, dans l'est lyonnais. Le bassin de rétention se localise à quelques centaines de mètres du bassin d'infiltration.

Le Tableau A. 13 présente les données de conception des bassins.

Tableau A. 13 – Données de conception des bassins de la ZAC du Chêne (Grand Lyon, 2001e)

Caractéristiques	
Date de construction	1988, 1990 agrandissement du système
Coefficient d'apport	0,66 ¹
Capacité de rétention calculée pour une pluie de retour de	20 ans
Débit de la pluie	6,81 m ³ /s
Vitesse d'infiltration	1 × 10 ⁻⁴
Niveau piézométrique maximal ¹	10 m

¹Source : Dechesne, 2002

Le système est composé d'un bassin de rétention et d'un bassin d'infiltration. Le Tableau A. 14 présente les caractéristiques de chaque bassin. La Figure A. 14 montre une image aérienne des bassins.

Tableau A. 14 – Caractéristiques des bassins, ZAC du Chêne (Grand Lyon, 2001e)

Caractéristiques	Bassin de rétention	Bassin d'infiltration
Creusé	oui	oui
Hauteur moyenne fond/niveau des plus hautes eaux	Non disponible	Non disponible
Hauteur moyenne fond/haut de talus	4,09 m	3,86 m
Pente du fond	0.005 m/m	Nulle
Nature du fond	Pelouse et caniveau en béton	Grave naturel
Surface du fond	3 868 m ²	1 860 m ²
Surface en haut du talus	7 732 m ²	3 684 m ²
Volume de stockage (par bassin)	22 341 m ³	10 700 m ³
Nature de l'étanchéité	Argile	Aucune
Nature de talus ou des berges	Terrain enherbé	Terrain naturel
Pente des talus	Non disponible	3/2
Accès pour l'entretien	Rampe bétonnée (pente 5,3%)	Rampe enrobée (pente 8%)



Figure A. 14 - Image aérienne des bassins de ZAC du Chêne



Figure A. 15 - ZAC du chêne – Bassin de rétention (haut) et bassin d'infiltration (bas)

Dechesne (2002) a analysé des échantillons de sol du bassin d'infiltration de la ZAC du Chêne. Trois carottes de sol ont été prélevés, une au le point d'entrée d'eau (14), une deuxième au point le plus bas du bassin (15) et une troisième à un autre point (16), et à différents profondeurs : 0 à 5 cm (A), 25 à 30 cm (B), 30 à 35 cm pour le point 14 et 60 cm pour les points 15 et 16 (C). Le Tableau A. 15 présente les résultats obtenus.

**Tableau A. 15 – Résultats de l'analyse du sol du bassin d'infiltration (mg/kg de m.s.), ZAC du Chêne
(Dechesne, 2002)**

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fluoranthène	Benzo-ghi-pérylène
14A	2,05	83,09	256,44	51,80	191,30	2605,40	0,843	0,794
14B	1,55	71,48	173,00	50,24	176,63	1724,82	0,997	0,805
14C	0,52	19,68	19,16	11,91	12,43	200,38	<0,354	<0,354
15A	2,02	77,88	181,04	56,64	160,31	1896,41	0,483	0,379
15B	0,51	23,89	20,33	13,21	14,23	133,16	<0,369	<0,369
15C	0,49	18,92	19,89	12,61	16,01	153,29	<0,381	<0,381
16A	0,95	40,45	87,09	30,93	77,57	861,38	<0,376	<0,376
16B	0,50	13,99	11,99	9,99	8,49	78,44	<0,372	<0,372
16C	0,48	14,49	8,69	8,21	4,83	42,50	<0,352	<0,352

Bassin de rétention / infiltration de la ZAC de Pivolles

Le bassin d'infiltration rétention de la ZAC de Pivolles draine une zone industrielle de 50 ha. Il se localise à Décines, dans l'est lyonnais.

Le Tableau A. 16 présente les données de conception des bassins.

Tableau A. 16 – Données de conception des bassins de la ZAC de Pivolles (Grand Lyon, 2001f)

Caractéristiques	
Date de construction	1992
Coefficient d'apport	0,55
Capacité de rétention calculée pour une pluie de retour de	20 ans
Débit de la pluie	Non disponible
Vitesse d'infiltration	2×10^{-3}
Niveau piézométrique maximal ¹	14 m

¹Source : Dechesne, 2002

Le système est composé d'un bassin de rétention et d'un bassin d'infiltration. Le Tableau A. 17 présente les caractéristiques de chaque bassin. La Figure A. 16 montre une image aérienne des bassins.

Tableau A. 17 – Caracteristiques des bassin, ZAC de Pivolles (Grand Lyon, 2001f)

Caractéristiques	Bassin de rétention	Bassin d'infiltration
Creusé	oui	oui
Hauteur moyenne fond/niveau des plus hautes eaux	2,60	10 m
Hauteur moyenne fond/haut de talus	3,21 m	4,15 m
Pente du fond	0.003 m/m	0.005 m/m
Nature du fond	Enrobé	Gravier
Surface du fond	2 800 m ²	1 245 m ²
Surface en haut du talus	4 250 m ²	2 700 m ²
Volume de stockage (par bassin)	8 395 m ³	7 962 m ³
Nature de l'étanchéité	Film étanche/enrobé	Aucune
Nature de talus ou des berges	Film étanche	Terrain naturel
Pente des talus	0,60 m/m	0,63 m/m
Accès pour l'entretien	Rampe enrobée (pente 8%)	Rampe enrobée (pente 9%)



Figure A. 16 - Image aérienne du bassin de ZAC de Pivolles



Figure A. 17 - ZAC de Pivolles – Bassin d'infiltration (gauche) et bassin de rétention(droite)

Des analyses de carottes de sol du bassin d'infiltration de ZAC de Pivolles ont été effectuées par Dechesne (2002). Neuf échantillons ont été analysés, ils correspondent à des échantillonnages en trois points distincts du bassin : point 17, arrivée d'eau dans le bassin, point 18 et point 19, point bas du bassin. Le point 17 a été analysé à quatre profondeurs différentes (A - 0-5 cm ; B - 45-50 cm ; C - 50-55 cm ; D - 90 cm), le point 18 à 8 profondeurs (A - 0-5 cm ; C - 50-55 cm), le point 19 a été analysé à 3 profondeurs différentes (A - 0-5 cm ; C - 50-55 cm ; D - 75 cm). Les résultats des analyses sont présentés au Tableau A. 18.

**Tableau A. 18 – Résultats de l'analyse du sol du bassin d'infiltration (mg/kg de m.s.), ZAC de Pivolle
(Dechesne, 2002)**

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fluoranthène	Benzo-ghi-pérylène
17A	1,97	57,58	173,22	48,72	930,07	1033,41	0,587	0,504
17B	0,99	37,08	85,53	28,68	428,16	538,91	<0,365	<0,365
17C	0,47	25,16	36,08	18,99	179,92	221,69	<0,375	<0,375
17D	0,49	30,16	60,31	23,35	256,33	364,31	<0,335	<0,335
18A	0,48	10,64	5,80	7,25	4,84	23,69	<0,330	<0,330
18C	0,49	15,23	7,86	10,32	4,91	20,64	<0,365	<0,365
19A	0,47	13,53	6,07	9,80	7,00	28,47	<0,345	<0,345
19C	0,48	14,42	5,77	9,61	4,81	17,30	<0,365	<0,365
19D	0,48	13,93	5,76	11,05	4,80	18,25	<0,380	<0,380

ANNEXE B – Fiches d'entretien des systèmes pour la phase de suivi des ouvrages

Tableau B. 1 – Fiche d’entretien pour les bassins

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Curage – enlèvement des sédiments du bassin de rétention	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage ou entretien des différents organes Régulateurs de débit Pompes Autres	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des ouvrages de prétraitement : Déssableurs	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire

<p>Séparateurs à hydrocarbures</p> <p>Autres</p>		<input type="checkbox"/> Non applicable	<p>(dans ce cas pourquoi ?)</p> <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
<p>Entretien des espaces verts (si pertinent)</p>	<p>Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)</p>	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau B. 1 – Fiche d’entretien pour les bassins (cont.)

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Grattage de la surface du bassin d’infiltration (si pertinent)	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d’accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d’œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Désherbage du fond et des berges (si pertinent)	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d’accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d’œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Ramassage des flottants, fauchage annuel des végétaux (pour les	Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué	<input type="checkbox"/> Difficulté d’accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire

bassins en eau)		<input type="checkbox"/> Non applicable	nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Vidange pour curage et renouvellement de la masse d'eau (pour les bassins en eau)	Tous les 10 ans	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Autres tâches			<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau B. 2 – Fiche d'entretien pour les chaussées

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Nettoyage – Curage	Tous les 3 mois (UPRCT)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des orifices	Tous les 6 mois (MEE, 1994)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des paniers	Tous les 6 mois (MEE, 1994)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire

		<input type="checkbox"/> Non applicable	nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des dispositifs d'épuration	Tous les 6 mois (MEE, 1994)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau B. 2 – Fiche d'entretien pour les chaussées (cont.)

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Curage des regards et des avaloirs	Tous les 6 mois (MEE, 1994)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Hydrocurage avec aspiration (si revêtement drainant)	Tous les ans (Balades & Garrigou, 1992)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Autres tâches			<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire

			nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?)		<input type="checkbox"/> compliqué	<input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire
			<input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Dangereux
						<input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau B. 3 – Fiche d’entretien pour les fossés et noues

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Nettoyage – enlèvement des débris	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des regards de décantation	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des déshuileurs	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire

		<input type="checkbox"/> Non applicable	nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?)		<input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des orifices (si pertinente)	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau B. 3 – Fiche d'entretien pour les fossés et noues (cont.)

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Tondaison du gazon	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Arrosage du gazon	Quand nécessaire (Azzout <i>et al.</i> , 1994)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Autres tâches			<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau B. 4 – Fiche d'entretien pour les puits

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Nettoyage des regards de décantation	Tous les mois (Azzout <i>et al.</i> , 1994 ; CERTU, 1998) Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des déshuileurs	Tous les mois (Azzout <i>et al.</i> , 1994 ; CERTU, 1998) Tous les ans (Grand Lyon, 2007)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Entretien du revêtement planté (si pertinent)	Tous les 6 mois	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Autres tâches		<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau B.5 – Fiche d’entretien pour les tranchées

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Nettoyage de la tranchée	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Tondaison du gazon (si pertinent)	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des orifices	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Nettoyage des paniers	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

Tableau B.5 – Fiche d'entretien pour les tranchées (cont.)

Tâche	Fréquence	Fait	Si non motif	Comment (moyens utilisés)	Facilité	Motif
Nettoyage des dispositifs d'épuration	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Curage des regards et des avaloirs	Tous les 6 mois (UPRCT, 2004)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Non applicable	<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :
Autres tâches			<input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> On estime que pas nécessaire aussi souvent (dans ce cas pourquoi ?) <input type="checkbox"/> Autre motif (lequel)		<input type="checkbox"/> aucune difficulté <input type="checkbox"/> un peu compliqué <input type="checkbox"/> compliqué <input type="checkbox"/> très contraignant	<input type="checkbox"/> Difficulté d'accès <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Manque de Main d'œuvre nécessaire <input type="checkbox"/> Dangereux <input type="checkbox"/> Autre motif :

ANNEXE C – Description des Alternatives de la ZAC du Petit Bourg

ZAC du Petit Bourg

Alternative 1 – drainage effectué par des puits et des tranchées

L'assainissement pluvial de l'alternative 1 est basé sur le principe suivant : les eaux des voiries sont infiltrées par des tranchées et les eaux de toitures soit par des puits d'infiltration soit par des tranchées.

Description des systèmes :

Tous les systèmes ont été projetés pour une période de retour de 10 ans.

Les puits recueillent l'eau des toitures et les infiltrent sans prétraitement. Les puits projetés sont conçus suivant le modèle de la Figure C. 1. Le coût d'implantation des 22 puits s'élève à 17.250,00 €.

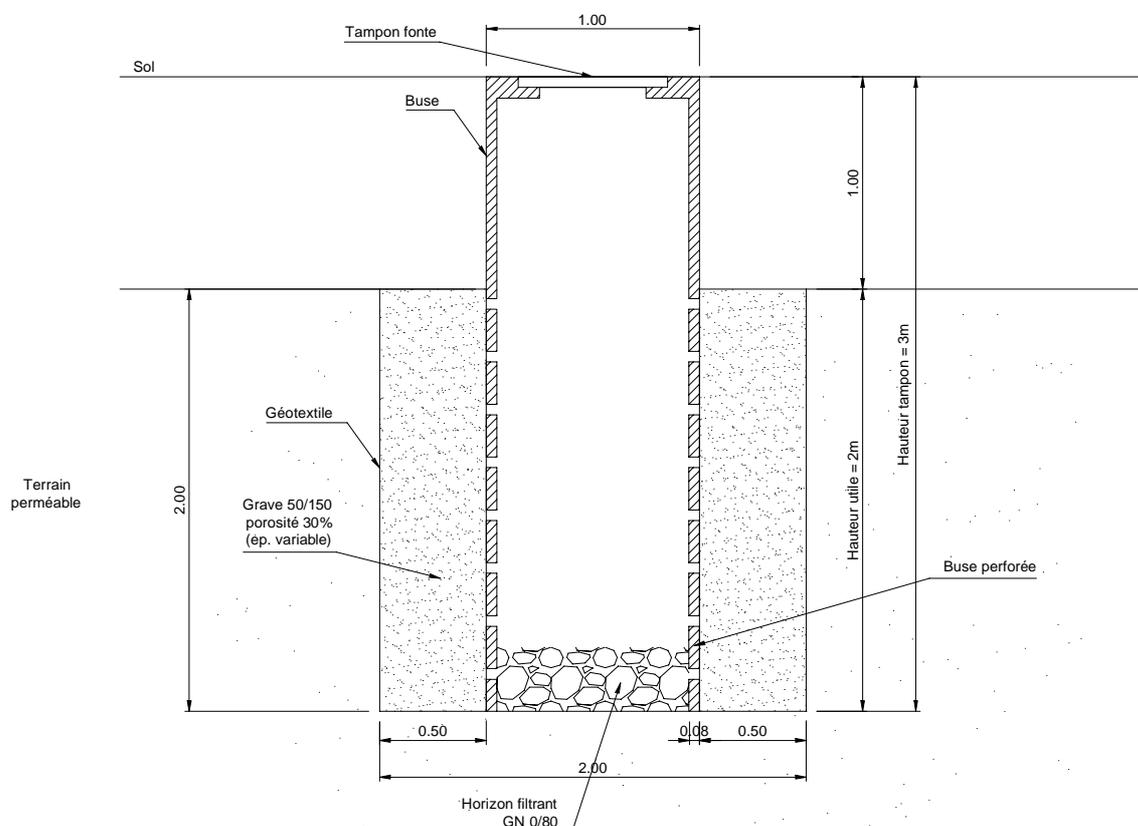


Figure C. 1 – Projet des puits

Les tranchées sont alimentées de manière répartie par ruissellement superficiel et ont une couverture en remblai de 1,20 m pour permettre le croisement de tous les autres réseaux sans démolition de l'ouvrage d'infiltration. La Figure C. 2 présente le schéma type des tranchées projetées.

Les eaux avant d'entrer dans ces tranchées passent par un regard de répartition muni d'une chambre de décantation. Chaque tranchée possède 2 regards de répartition, excepté la tranchée 2C qui en compte trois et la tranchée 5C un seul. Le coût d'implantation des tranchées est de 120.224,50 €.

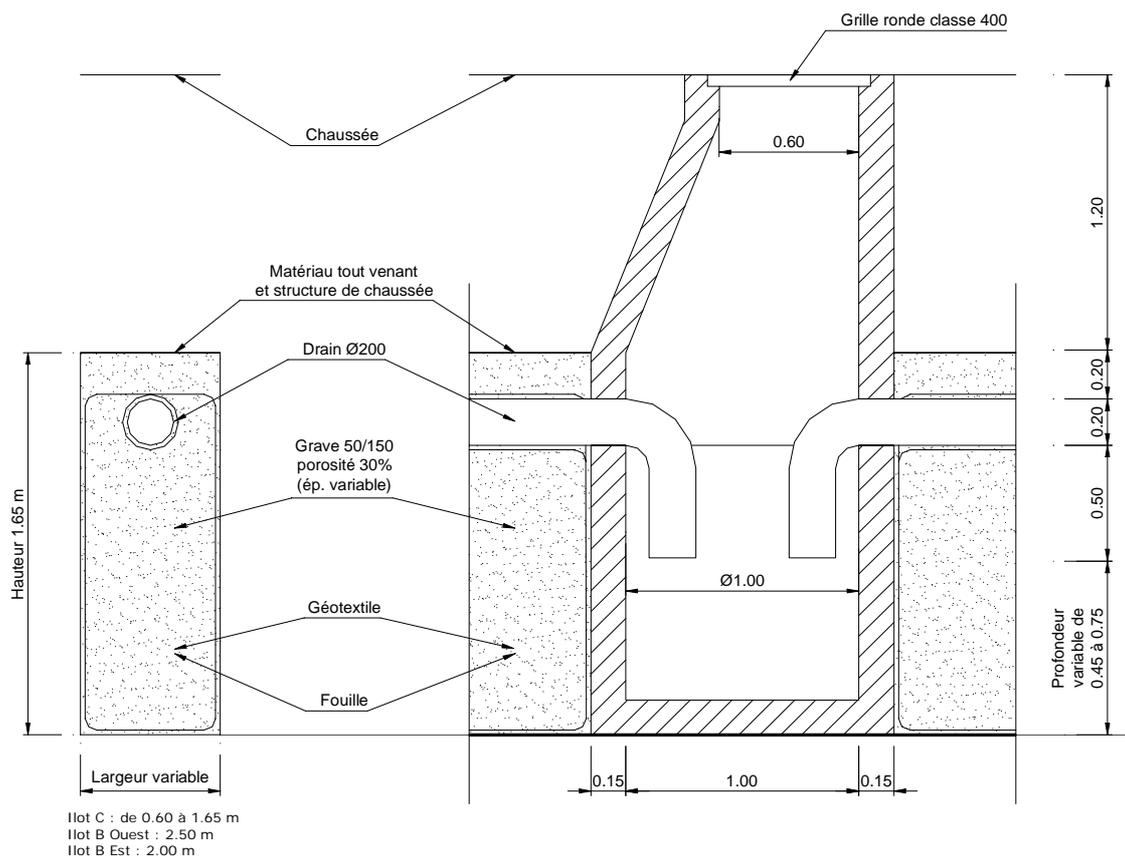


Figure C. 2 –Schéma type des tranchées projetées

Le coût d'implantation total revient à 12 513,65 €, il inclut les coûts d'implantation des puits, des tranchées et des canalisations qui les relient.

Alternative 2 – drainage effectué par des bassins rétention – infiltration

Le principe de l'alternative 2 est le suivant : les eaux pluviales sont recueillies par un réseau et acheminées à un système comprenant un bassin de rétention/infiltration localisé dans le parc du lotissement. Description des systèmes :

Le réseau a été dimensionné pour une période de retour de 10 ans et le bassin 20 ans.

La coupe du bassin est donnée à la Figure C. 3.

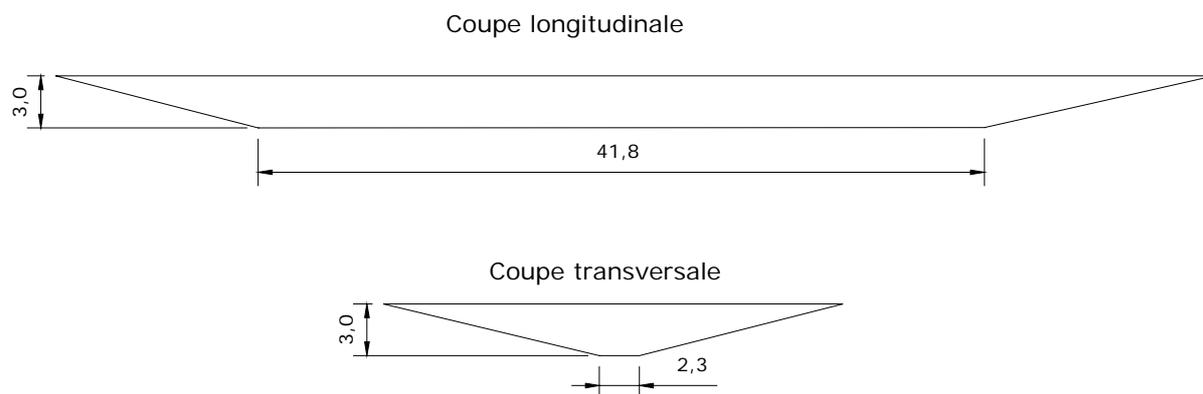


Figure C. 3 – Coupes du bassin de rétention/infiltration

Le coût d'implantation est de 624 435,21 €, il inclut le coût du bassin et des réseaux de collecte des eaux pluviales.

Alternative 3 – drainage effectué exclusivement par des puits d'infiltration

L'assainissement pluvial est basé sur l'infiltration par puits seulement.

Description des systèmes :

Tous les systèmes ont été projetés pour une période de retour de 10 ans.

Les puits recueillent l'eau et les infiltrent sans prétraitement. Les puits projetés sont les mêmes que ceux de l'alternative 1 (Cf. Figure C. 1). Le coût d'implantation des 117 puits nécessaires est de 111.618,00€.

ANNEXE D – Calculs des indicateurs

ZAC du Petit Bourg

Alternative 1 – drainage effectué par des puits et tranchées

Indicateur de fréquence de dimensionnement

Période de retour de dimensionnement : 10 ans

$$IC_{HYD1}=10$$

Indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées

Les volumes ont été calculés avec une pluie de temps de retour de 50 ans. Les systèmes peuvent toucher seulement la voirie et l'habitat, ainsi les indicateurs $IC_{HYD2PARK}$, $IC_{HYD2PARC}$, $IC_{HYD2IAR}$, $IC_{HYD2IFR}$ et $IC_{HYD2ACP}$ sont égaux à 0.

Les volumes débordés calculés pour chaque ouvrage dans la voirie et dans l'habitat sont présentés au Tableau D. 1.

Tableau D. 1 – Volumes débordés par ouvrage

		$IC_{HYD2VOI} (m^3)$	$IC_{HYD2HAB} (m^3)$
ILOT A	Puits 1A	0	0
	Puits 2A	0	0
	Puits 3A	0	0
	Puits 4A	0	0
	Puits 5A	0	0
	Puits 6A	0	0
	Puits 7A	0	1,03
	Tranchée 1A	0	0
	Tranchée 2A	0	0
	Tranchée 3A	0	0
Tranchée 4A	0	0	
ILOT B	Tranchée 1B	0	0
	Tranchée 2B	0	0
	Tranchée 3B	0	0
ILOT C	Tranchée 1 C	0,22	0
	Tranchée 2 C	0	0
	Tranchée 3 C	0	0
	Tranchée 4 C	0	0
	Tranchée 5C	0	0
	Puits 1C	0	0
	Puits 2C	0	0
	Puits 3C	0	0
	Puits 4C	0	0
	Puits 5C	0	0
	Puits 6C	0	0

	Puits 7C	0	0
	Puits 8C	0	0
	Puits 9C	0	0
	Puits 10C	0	0
	Puits 11C	0	0
	Puits 12C	0	0
	Puits 13C	0	0
	Puits 14C	0	0
	Puits 15C	0	0
	Puits 16C	0	0
	<hr/>		
	Tranchée 1D	14,2	0
	Tranchée 2D	10	0
ILOT D	Tranchée 3D	10	0
	Tranchée 4D	14,2	0

Indicateur de protection de la nappe

Les cotes de fond des ouvrages par rapport au niveau du sol sont données au Tableau D. 2. La nappe est à une profondeur d'au moins 4m.

Tableau D. 2 – Cotes de fond des ouvrages

		Cote du fond de l'ouvrage (en relation au sol)
ILOT A	Puits 1A	-3
	Puits 2A	-3
	Puits 3A	-3
	Puits 4A	-3
	Puits 5A	-3
	Puits 6A	-3
	Puits 7A	-3
	Tranchée 1A	-2,85
	Tranchée 2A	-2,85
	Tranchée 3A	-2,85
	Tranchée 4A	-2,85
	ILOT B	Tranchée 1B
Tranchée 2B		-2,85
Tranchée 3B		-2,85
ILOT C	Tranchée 1 C	-2,85
	Tranchée 2 C	-2,85
	Tranchée 3 C	-2,85
	Tranchée 4 C	-2,85
	Tranchée 5C	-2,85
	Puits 1C	-3
	Puits 2C	-3
	Puits 3C	-3
	Puits 4C	-3
	Puits 5C	-3
	Puits 6C	-3

	Puits 7C	-3
	Puits 8C	-3
	Puits 9C	-3
	Puits 10C	-3
	Puits 11C	-3
	Puits 12C	-3
	Puits 13C	-3
	Puits 14C	-3
	Puits 15C	-3
	Puits 16C	-3
	<hr/>	
	Tranchée 1D	-2,55
	Tranchée 2D	-2,55
ILOT D	Tranchée 3D	-2,55
	Tranchée 4D	-2,85

$IC_{NS1}(m)=1\text{ m}$

Indicateurs d'aptitude du sol à la rétention des polluants

Cet indicateur n'a pas pu être calculé car les données de pH du sol ne sont pas disponibles.

Indicateur de pression anthropique

Les surfaces d'infiltration, les surfaces actives, les facteurs de pondération, ainsi que l'indicateur calculé par chaque ouvrage, sont donnés au Tableau D. 3.

Tableau D. 3 – Surfaces d’infiltration, surfaces actives, facteurs de pondération et indicateur par ouvrage

		Surface d'infiltration	Surface active du bassin versant	Fi	Fj	IC _{PR}
	Puits 1A	6,3	100,7	0,114	1,5	2,74
	Puits 2A	6,3	100,7	0,114	1,5	2,74
	Puits 3A	6,3	100,7	0,114	1,5	2,74
	Puits 4A	6,3	100,7	0,114	1,5	2,74
	Puits 5A	6,3	100,7	0,114	1,5	2,74
ILOT A	Puits 6A	6,3	92,2	0,335	1,5	7,37
	Puits 7A	6,3	133,0	0,335	1,5	10,64
	Tranchée 1A	40,0	697,4	0,067	1	1,17
	Tranchée 2A	36,0	601,2	0,065	1	1,08
	Tranchée 3A	30,0	470,5	0,098	1	1,53
	Tranchée 4A	30,0	434,0	0,206	1	2,97
	Tranchée 1B	60,0	1130,3	0,082	1	1,55
ILOT B	Tranchée 2B	29,0	496,5	0,066	1	1,12
	Tranchée 3B	22,0	261,2	0,087	1	1,03
ILOT C	Tranchée 1 C	27,0	549,0	0,335	1	6,81
	Tranchée 2 C	67,5	874,1	0,170	1	2,20
	Tranchée 3 C	63,5	834,7	0,167	1	2,19
	Tranchée 4 C	50,0	477,8	0,225	1	2,15
	Tranchée 5C	26,4	294,5	0,211	1	2,35
	Puits 1C	6,3	96,0	0,066	1,5	1,50
	Puits 2C	6,3	56,9	0,091	1,5	1,23
	Puits 3C	6,3	56,6	0,091	1,5	1,23
	Puits 4C	6,3	57,3	0,090	1,5	1,23
	Puits 5C	6,3	57,3	0,090	1,5	1,23
	Puits 6C	6,3	42,4	0,091	1,5	0,92

	Puits 7C	6,3	68,6	0,065	1,5	1,07
	Puits 8C	6,3	36,6	0,081	1,5	0,70
	Puits 9C	6,3	37,4	0,079	1,5	0,71
	Puits 10C	6,3	37,7	0,080	1,5	0,72
	Puits 11C	6,3	90,7	0,057	1,5	1,24
	Puits 12C	6,3	85,8	0,079	1,5	1,62
	Puits 13C	6,3	70,7	0,075	1,5	1,27
	Puits 14C	6,3	46,9	0,074	1,5	0,83
	Puits 15C	6,3	69,9	0,085	1,5	1,42
	Puits 16C	6,3	55,0	0,086	1,5	1,12
ILOT D	Tranchée 1D	63,0	1470,0	0,335	1	7,82
	Tranchée 2D	44,4	1036,0	0,335	1	7,82
	Tranchée 3D	44,4	1036,0	0,335	1	7,82
	Tranchée 4D	45,0	1241,0	0,335	1	9,24

L'indicateur IC_{PR} prend la valeur maximale calculé par les ouvrages : 10,64.

Indicateur de recharge des nappes

Comme tout l'aménagement est drainé par infiltration l'indicateur IC_{NAPPE} vaut 1,00.

Indicateur de consommation de ressources naturelles

La consommation de ressources naturelles est calculé à partir des données de projet et est présenté au Tableau D. 4. La distance de transport du matériau excavé est de 10 km pour tous les ouvrages et pour le matériau de remblais est insignifiant.

Tableau D. 4 – Consommation de ressources par ouvrage

		I_{RNexc}	I_{RNmat}	$I_{RNtransp}$
ILOT A	Puits 1A	0,85	991,54	8,80
	Puits 2A	0,85	991,54	8,80
	Puits 3A	0,85	991,54	8,80

	Puits 4A	0,85	991,54	8,80
	Puits 5A	0,85	991,54	8,80
	Puits 6A	0,85	991,54	8,80
	Puits 7A	0,85	991,54	8,80
	Tranchée 1A	18,89	12 496,71	195,89
	Tranchée 2A	17,11	11 315,87	177,41
	Tranchée 3A	14,43	9 544,60	149,69
	Tranchée 4A	14,43	9 544,60	149,69
	Tranchée 1B	28,07	16 967,87	291,06
ILOT B	Tranchée 2B	13,99	9 249,39	145,07
	Tranchée 3B	10,87	7 182,92	112,73
ILOT C	Tranchée 1 C	12,35	16 604,09	128,07
	Tranchée 2 C	30,79	24 738,53	319,33
	Tranchée 3 C	28,99	23 282,09	300,62
	Tranchée 4 C	22,97	18 427,30	238,25
	Tranchée 5C	12,64	9 110,46	131,12
	Puits 1C	0,85	991,54	8,80
	Puits 2C	0,85	991,54	8,80
	Puits 3C	0,85	991,54	8,80
	Puits 4C	0,85	991,54	8,80
	Puits 5C	0,85	991,54	8,80
	Puits 6C	0,85	991,54	8,80
	Puits 7C	0,85	991,54	8,80
	Puits 8C	0,85	991,54	8,80
	Puits 9C	0,85	991,54	8,80
	Puits 10C	0,85	991,54	8,80
	Puits 11C	0,85	991,54	8,80

	Puits 12C	0,85	991,54	8,80
	Puits 13C	0,85	991,54	8,80
	Puits 14C	0,85	991,54	8,80
	Puits 15C	0,85	991,54	8,80
	Puits 16C	0,85	991,54	8,80
ILOT D	Tranchée 1D	23,23	34 379,68	240,86
	Tranchée 2D	16,45	24 284,74	170,55
	Tranchée 3D	16,45	24 284,74	170,55
	Tranchée 4D	20,37	27 535,82	211,23
	Canalisations	27,54	449,25	

L'indicateur prend donc la somme des consommations de chaque ouvrage : $IC_{RN}=305\ 887,65$

Indicateur de maintenance

Les alternatives ont été classées, par contrainte selon montre la Figure D. 1. L'alternative puits et tranchées reçoit donc la note 2.

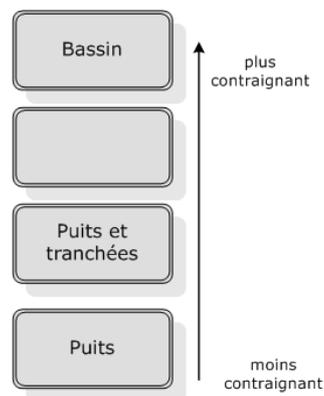


Figure D. 1 – Classement des alternatives d'aménagement par niveau de contrainte

Indicateur de sécurité des ouvrages

L'alternative puits et tranchées est classée comme type C, selon la Figure 1.5 - Typologies des ouvrages et dispositifs annexes, 1.2.6.3. L'indicateur de sécurité des ouvrages IC_{SS} reçoit la note 1.

Indicateur de déchets solides

IC_{DEC} est la surface active moyenne des ouvrages. Les surfaces actives des ouvrages peuvent être observés dans le Tableau D. 5. La surface active totale est de 13 598,3 m², divisé par 39 ouvrages. IC_{DEC} vaut donc 348,67 m².

Indicateur de coûts d'implantation

Les coûts totaux d'implantation des ouvrages ont été estimés à 149 988,15 €.

Indicateur de coûts de maintenance et gestion

Les coûts de maintenance et gestion ont été estimés selon les estimations de coûts dans Moura (2004). L'indicateur IC_{COUT2} revient donc à 84 127,72 €, pour une période de 30 ans.

Indicateur de qualité de l'aménagement

L'aménagement a été considéré comme : « dont la plurifonctionnalité n'a aucune importance », car il n'existe aucune interférence entre les ouvrages et les usages de la zone.

Alternative 2 – drainage effectué par une bassin de rétention / infiltration

Indicateur de fréquence de dimensionnement

Période de retour de dimensionnement : 20 ans

$IC_{HYD1}=20$

Indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées

Les volumes ont été calculés avec une pluie de temps de retour de 50 ans. Le bassin ne déborde pas avec une telle pluie. Les indicateurs sont donc nuls.

Indicateur de protection de la nappe

La cote de fond du bassin est de 3 mètres par rapport au niveau du sol. La nappe s'encontre à une profondeur d'au moins 4m, $IC_{NS1} (m)=1$ m.

Indicateurs d'aptitude du sol à la rétention des polluants

Cet indicateur n'a pas pu être calculé car les données de pH du sol ne sont pas disponibles.

Indicateur de pression anthropique

Les surfaces d'infiltration, les surfaces actives, les facteurs de pondération, ainsi que l'indicateur calculé, sont donnés au Tableau D. 5.

Tableau D. 5 – Indicateur de pression anthropique

Surface d'infiltration	Surface active du bassin versant	F_i	F_j	IC_{PR}
12,1	13 662,8	0,118	0,825	110,6

Indicateur de recharge des nappes

Comme tout l'aménagement est drainé par infiltration l'indicateur IC_{NAPPE} vaut 1,00.

Indicateur de consommation de ressources naturelles

La consommation de ressources naturelles est calculé à partir des données de projet et est présenté au Tableau D. 6. La distance de transport du matériau excavé est de 10 km.

Tableau D. 6 – Indicateur de consommation de ressources naturelles

I_{RNexc}	I_{RNmat}	$I_{RNtransp}$	IC_{RN}
740	46 223	6375	53 340

Indicateur de maintenance

Les alternatives ont été classées, par contrainte selon montre la Figure D. 1. L'alternative bassin reçoit donc la note 4.

Indicateur de sécurité des ouvrages

L'alternative bassin est classée comme type I, selon la Figure 1.5 - Typologies des ouvrages et dispositifs annexes, 1.2.6.3. L'indicateur de sécurité des ouvrages IC_{SS} reçoit la note 10,8.

Indicateur de déchets solides

IC_{DEC} est la surface active moyenne, IC_{DEC} vaut donc 13 662,8 m².

Indicateur de coûts d'implantation

Les coûts totaux d'implantation du bassin et du réseau ont été estimés à 624 435,21 €.

Indicateur de coûts de maintenance et gestion

Les coûts de maintenance et gestion ont été estimés selon les estimations de coûts dans Moura (2004). L'indicateur IC_{COUT2} revient à 672 527,13 €, pour une période de 30 ans.

Indicateur de qualité de l'aménagement

L'aménagement a été considéré comme : « dont la plurifonctionnalité n'a aucune importance », car il n'existe aucune interférence entre les ouvrages et les usages de la zone.

Alternative 3 – drainage effectué exclusivement par des puits d'infiltration

Indicateur de fréquence de dimensionnement

Période de retour de dimensionnement : 10 ans

$$IC_{HYD1}=10$$

Indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées

Les volumes ont été calculés avec une pluie de temps de retour de 50 ans. Les systèmes peuvent toucher seulement la voirie et l'habitat, pourtant les indicateurs $IC_{HYD2PARK}$, $IC_{HYD2PARC}$, $IC_{HYD2IAR}$, $IC_{HYD2IFR}$ et $IC_{HYD2ACP}$ sont égaux à 0.

Les volumes débordés calculés pour chaque ouvrage dans la voirie et dans l'habitat sont présentés au Tableau D. 7.

Tableau D. 7 – Volumes débordés par ouvrage

		$IC_{HYD2VOI} (m^3)$	$IC_{HYD2HAB} (m^3)$
ILOT A	Puits A1 a A5	0,00	0,00
	Puits A6 a A11	0,00	1,52
	Puits A12 a A17	0,00	0,00
	Puits A18 a A21	0,00	1,26
	Puits A22 a A25	0,00	0,18
	A26	0,00	0,86
	A27	0,00	0,00
ILOT B	Puits B1 a B9	0,00	5,06
	B10	0,00	0,89
	B11	0,00	0,89
	B12	0,45	0,45
	B13	0,00	0,00
	B14	0,00	0,62
	B15	0,00	0,62

Tableau D. 7 – Volumes débordés par ouvrage (cont.)

		$IC_{HYD2VOI} (m^3)$	$IC_{HYD2HAB} (m^3)$
ILOT C	C1	0,00	0,00
	C2	0,00	0,43
	C3	0,00	0,41
	C4 et C5	0,00	0,43
	C5	0,00	0,43
	C6	0,00	0,14
	C7	0,00	1,17
	C8	0,78	0,00
	C9	0,00	0,00
	C10	0,00	0,00
	C11	0,00	0,00
	C12	0,00	1,23
	C13	0,00	0,00
	C14	0,00	0,35
	C15	0,00	0,36
	C16	0,00	0,52
	C17	0,00	0,00
	C18	0,10	0,00
	C19	0,10	0,00
	C20	0,10	0,00
	C21	0,10	0,00
	C22	0,10	0,00
	C23	0,00	0,00

	C24	0,48	0,00
	C25	0,00	0,00
	C26	1,07	0,00
	C27	0,00	0,00
	C28	0,34	0,00
	C29	0,34	0,00
	C30	0,34	0,00
	C31	0,00	0,00
	C32	0,00	0,00
	C33	0,00	0,00
	C34	0,00	1,55
	C35	0,00	0,00
	C36	0,00	0,00
	C37	0,00	0,00
	C38	0,00	0,00
	C39	0,00	0,39
	C40	0,00	0,19
ILOT D	D1 a D10	7,72	0,00
	D11 a D18	7,10	0,00
	D19 a D26	4,16	0,00
	D27 a D35	7,03	0,00

Indicateur de protection de la nappe

La cote de fond du bassin est de 3 mètres par rapport au niveau du sol. La nappe a une profondeur d'au moins 4m, $IC_{NSI} (m)=1$ m.

Indicateurs d'aptitude du sol à la rétention des polluants

Cet indicateur n'a pas pu être calculé car les données de pH du sol ne sont pas disponibles.

Indicateur de pression anthropique

Les surfaces d'infiltration, les surfaces actives, les facteurs de pondération, ainsi que l'indicateur calculé par chaque ouvrage, sont donnés au Tableau D. 8.

Tableau D. 8 – Surfaces d'infiltration, surfaces actives, facteurs de pondération et indicateur par ouvrage

	Surface d'infiltration	Surface active du bassin versant	Fi	Fj	IC _{PR}	
	A1 a A5	6,28	100,70	0,114	1,5	2,74
	A6 a A11	6,28	114,45	0,075	1,5	2,04
	A12 a A17	6,28	98,61	0,073	1,5	1,72
ILOT A	A18 a A21	6,28	116,34	0,094	1,5	2,62
	A22 a A25	6,28	108,11	0,208	1,5	5,38
	A26	6,28	133,00	0,114	1,5	3,62
	A27	6,28	91,80	0,335	1,5	7,34
	B1 a B9	6,28	123,91	0,087	1,5	2,58
	B10	6,28	134,05	0,076	1,5	2,42
	B11	6,28	134,05	0,076	1,5	2,42
ILOT B	B12	6,28	134,05	0,076	1,5	2,42
	B13	6,28	94,10	0,049	1,5	1,10
	B14	6,28	125,55	0,086	1,5	2,58
	B15	6,28	125,55	0,086	1,5	2,58

**Tableau D. 8 – Surfaces d’infiltration, surfaces actives, facteurs de pondération et indicateur par ouvrage
(cont.)**

		Surface d'infiltration	Surface active du bassin versant	Fi	Fj	IC _{PR}
ILOT C	C1	6,28	95,95	0,066	1,5	1,50
	C2	6,28	120,00	0,100	1,5	2,87
	C3	6,28	119,20	0,100	1,5	2,85
	C4	6,28	119,90	0,100	1,5	2,85
	C5	6,28	119,90	0,100	1,5	2,85
	C6	6,28	110,90	0,103	1,5	2,73
	C7	6,28	142,50	0,081	1,5	2,76
	C8	6,28	130,50	0,335	1,5	10,44
	C9	6,28	81,10	0,091	1,5	1,77
	C10	6,28	81,90	0,090	1,5	1,77
	C11	6,28	82,20	0,090	1,5	1,78
	C12	6,28	144,20	0,065	1,5	2,25
	C13	6,28	104,40	0,335	1,5	8,35
	C14	6,28	117,50	0,103	1,5	2,88
	C15	6,28	117,70	0,102	1,5	2,88
	C16	6,28	122,50	0,095	1,5	2,79
	C17	6,28	85,50	0,335	1,5	6,84
	C18	6,28	109,80	0,335	1,5	8,78
	C19	6,28	109,80	0,335	1,5	8,78
	C20	6,28	109,80	0,335	1,5	8,78
	C21	6,28	109,80	0,335	1,5	8,78
	C22	6,28	109,80	0,335	1,5	8,78
	C23	6,28	88,20	0,335	1,5	7,05
	C24	6,28	121,25	0,215	1,5	6,22

C25	6,28	59,60	0,254	1,5	3,62	
C26	6,28	139,50	0,335	1,5	11,16	
C27	6,28	84,60	0,335	1,5	6,77	
C28	6,28	117,00	0,335	1,5	9,36	
C29	6,28	117,00	0,335	1,5	9,36	
C30	6,28	117,00	0,335	1,5	9,36	
C31	6,28	104,40	0,335	1,5	8,35	
C32	6,28	104,40	0,335	1,5	8,35	
C33	6,28	104,40	0,335	1,5	8,35	
C34	6,28	154,00	0,079	1,5	2,92	
C35	6,28	76,90	0,114	1,5	2,09	
C36	6,28	85,80	0,079	1,5	1,62	
C37	6,28	105,70	0,114	1,5	2,88	
C38	6,28	69,90	0,085	1,5	1,42	
C39	6,28	118,50	0,097	1,5	2,75	
C40	6,28	112,50	0,087	1,5	2,34	
<hr/>						
ILOT D	D1 a D10	6,28	130,32	0,335	1,5	10,42
	D11 a D18	6,28	133,88	0,335	1,5	10,71
	D19 a D26	6,28	122,63	0,335	1,5	9,81
	D27 a D35	6,28	130,60	0,335	1,5	10,44

L'indicateur IC_{PR} prend la valeur maximale calculé par les ouvrages : 11,16.

Indicateur de recharge des nappes

Comme tout l'aménagement est drainé par infiltration l'indicateur IC_{NAPPE} vaut 1,00.

Indicateur de consommation de ressources naturelles

La consommation de ressources naturelles est calculée à partir des données de projet et est présentée au Tableau D. 9. La distance de transport du matériau excavé est de 10 km pour tous les ouvrages et pour le matériau de remblais est insignifiant.

Tableau D. 9 – Consommation de ressources par puits

I_{RNexc}	I_{RNmat}	$I_{RNtransp}$	IC_{RN} (par puits)
0,848	991,54	8,80	1 001,18

L'indicateur prend donc la somme des consommations de chaque puits : $IC_{RN}=117\ 139$.

Indicateur de maintenance

Les alternatives ont été classées, par contrainte selon montre la Figure D. 1. L'alternative puits reçoit donc la note 1.

Indicateur de sécurité des ouvrages

L'alternative puits et tranchées est classée comme type C, selon la Figure 1.5 - Typologies des ouvrages et dispositifs annexes, 1.2.6.3. L'indicateur de sécurité des ouvrages IC_{SS} reçoit la note 1.

Indicateur de déchets solides

IC_{DEC} est la surface active moyenne des ouvrages. Les surfaces actives des ouvrages peuvent être observés dans le Tableau D. 8. La surface active total est de 6 477,19 m², divisé par 117 ouvrages. IC_{DEC} vaut donc 116,44 m².

Indicateur de coûts d'implantation

Les coûts totaux d'implantation des ouvrages ont été estimés à 111 618,00 €.

Indicateur de coûts de maintenance et gestion

Les coûts de maintenance et gestion ont été estimés selon les estimations de coûts dans Moura (2004). L'indicateur IC_{COUT2} revient donc à 14 425,75 €, pour une période de 30 ans.

Indicateur de qualité de l'aménagement

L'aménagement a été considéré comme : « dont la plurifonctionnalité n'a aucune importance », car il n'existe aucune interférence entre les ouvrages et les usages de la zone.

Consolidation des résultats

Le Tableau D. 10 montre les valeurs de chaque indicateur, pour les trois alternatives de projet.

Tableau D. 10 – Résultats des calculs des indicateurs, ZAC du Petit Bourg

Indicateurs		Alternative 1 (Puits+ tranchées)	Alternative 2 (Bassins)	Alternative 3 (Puits)
Indicateur de fréquence de dimensionnement	IC _{HYD1} (ans)	10	20	10
	IC _{HYD2VOI} (m ³)	49	0	30
	IC _{HYD2PARK} (m ³)	0	0	0
	IC _{HYD2HAB} (m ³)	1	0	20
Indicateurs de vulnérabilité des surfaces touchées	IC _{HYD2PARC} (m ³)	0	0	0
	IC _{HYD2IAR} (m ³)	0	0	0
	IC _{HYD2IFR} (m ³)	0	0	0
	IC _{HYD2ACP} (m ³)	0	0	0
Indicateur de protection de la nappe	IC _{NS1} (m)	1	1	1
Indicateurs d'aptitude du sol à la rétention des polluants	IC _{NS3} (m/s)	1	1	1
Indicateur de pression anthropique	IC _{PR} (Adim.)	10,64	110,06	11,16
Indicateur de recharge des nappes	IC _{NAPPE} (Adim.)	1,00	1,00	1,00
Indicateur de consommation de ressources naturelles	IC _{RN} (Eq. Habitant × 100 000)	42 774	53 340	117 138
Indicateur de maintenance	IC _{MAIN} (Adim.)	2	4	1
Indicateur de sécurité des ouvrages	IC _{SS} (Adim.)	1,00	10,80	1,00
Indicateur de déchets solides	IC _{DEC} (m ²) ^(c)	348,67	13 662,80	116,44

Indicateur de coûts d'implantation	IC _{COUT1} (€)	149 988,15	624 435,21	111 618,00
Indicateur de coûts de maintenance et gestion	IC _{COUT2} (€)	84 127,72	672 527,13	14 425,75
Indicateur de qualité de l'aménagement	IC _{QUAL} (Adim.)	4	4	4

Bassin de Django Reinhardt

Protéger contre les inondations

Aucun épisode d'inondation n'a été enregistré dans le bassin Django Reinhardt. L'indicateur de fréquence de débordement, IS_{HYD1} vaut 0.

En ce qui concerne le suivi de la performance hydraulique du bassin d'infiltration, l'évolution de la résistance hydraulique a été suivie et est présentée à la Figure D. 2.

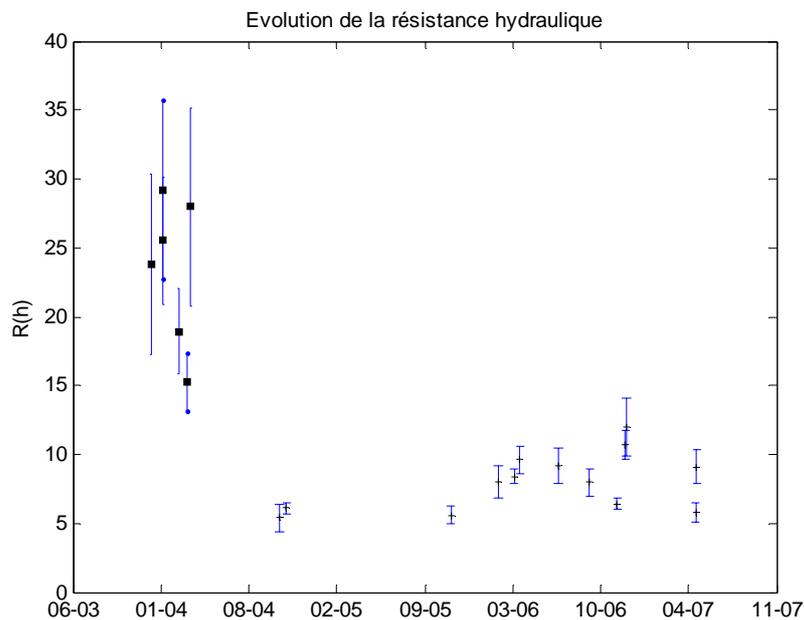


Figure D. 2 – Evolution de la résistance hydraulique, bassin de Django Reinhardt (Le Coustumer, 2008)

Nous pouvons observer que actuellement la résistance hydraulique du bassin est aux alentours de 9 heures, avec un incertitude de ± 6 heures.

Ne pas dégrader la qualité de la nappe

L'évaluation de l'indicateur est basée sur l'analyse des chroniques présentées en Figure D. 3.

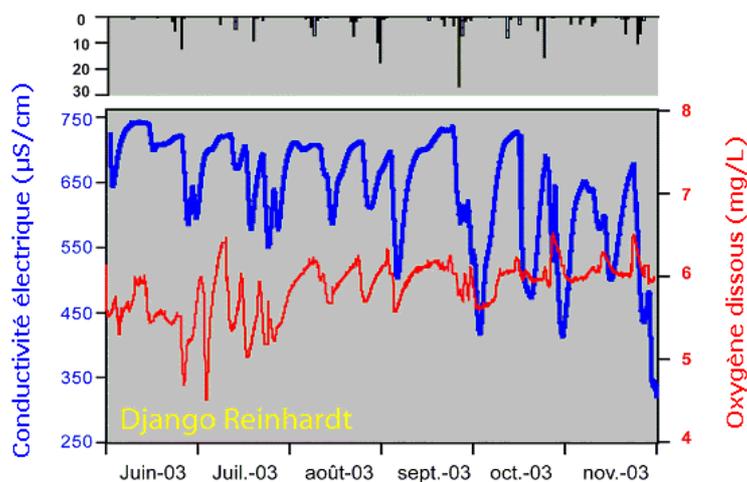


Figure D. 3 – Enregistrement en continu (pas de temps horaire) de la conductivité électrique (bleu) et de la concentration en oxygène dissous (rouge) des eaux de la nappe phréatique à l'aplomb hydraulique du bassin de Django Reinhardt (Perrodin *et al.*, 2005)

Nous pouvons observer d'après la Figure 2.5 que les épisodes pluvieux induisent une baisse de la conductivité électrique et n'entraîne pas de diminution importante de la concentration en oxygène dissous (nappe proche de la saturation en oxygène dissous).

L'examen des chroniques indique donc « *un fonctionnement attendu, à surveiller normalement* ».

$$IS_{NAPPE} = 1$$

Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas polluer le sol en profondeur)

L'indicateur d'efficacité de prétraitement a été calculé en utilisant les données de suivi du bassin Django Reinhardt. Les masses entrantes et sortantes du bassin de rétention ont été calculés, selon montre le Tableau D. 11.

Tableau D. 11 – Masses en matières en suspension entrant et sortant du bassin de rétention, Django Reinhardt

	Masse entrant (kg)	Masse sortant (kg)
Temps de pluie	30 314 ± 470	21 401 ± 700
Temps sec	735 ± 387	619 ± 419

L'indicateur d'efficacité, IS_{PT} , a été calculé à 0,29.

Les indicateurs de contamination du sol ont été calculés à partir des concentrations en polluants présentés au Annexe A. L'indicateur IS_{SOL1} vaut 1 mètre et l'indicateur IS_{SOL2} vaut 1.

Etre maintenable facilement

L'évaluation du bassin Django Reinhardt par rapport à des dysfonctionnement est donnée au Tableau D. 12.

Tableau D. 12 – Liste des dysfonctionnements qui pourront être observés

Bassins	
Aspect négligé (du bassin lui-même et des autres dispositifs)	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence d'érosion	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>
Revêtement en mauvais état	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>
Présence importante d'insectes	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence de poches d'eau stagnante	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>

L'indicateur IS_{MAIN} vaut donc 3.

Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels

L'Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers a été calculé à partir des données de concentrations en polluants dans le sol du bassin d'infiltration, données au Annexe A. L'indicateur IS_{SANI} a été estimé à 0,67.

Produire des déchets facilement gérables

Aucun sédiment recueilli dans le bassin Django Reinhardt n'est valorisé. L'indicateur IS_{DEC} vaut alors 0.

Acceptabilité sociale d'un scénario

Aucune plainte n'a été posée par rapport au bassin Django Reinhardt. L'indicateur IS_{AS} vaut alors 1.

Les indicateurs proposés ont été calculés pour le bassin Django Reinhardt. Le Tableau D. 13 montre les résultats.

Tableau D. 13 – Résultats des calculs des indicateurs et seuils calculés, bassin de Django Reinhardt

Indicateurs	Résultats	Seuil d'indifférence	Seuil de préférence stricte
IS _{HYD1}	0	0	0
IS _{HYD2}	9	6	12
IS _{NAPPE}	1	0	0
IS _{PT}	0,29	0,03	0,03
IS _{SOL1}	1	0,2	0,5
IS _{SOL2}	1	0	0
IS _{MAIN}	3	1	2
IS _{SAN1}	0,67	0	0
IS _{SAN2}	Non calculé par manque de données	-	-
IS _{SAN3}	Non calculé par manque de données	-	-
IS _{DEC}	0	0	0
IS _{SCOUT}	Non calculé par manque de données	-	-
IS _{AS}	1	0	0

Bassin de ZAC de Pivolles

Protéger contre les inondations

Aucun épisode d'inondation n'a été enregistré dans le bassin ZAC de Pivolles. L'indicateur de fréquence de débordement, IS_{HYD1} vaut 0.

En ce qui concerne le suivi de la performance hydraulique du bassin d'infiltration, le suivi de la résistance hydraulique n'est pas fait pour ce bassin, toutefois sa résistance hydraulique a été calculée à partir d'observations par Dechesne (2002). L'indicateur IS_{HYD2} vaut 0,0004 heures.

Ne pas dégrader la qualité de la nappe

L'évaluation de l'indicateur est basée sur l'analyse des chroniques présentées en Figure D. 4.

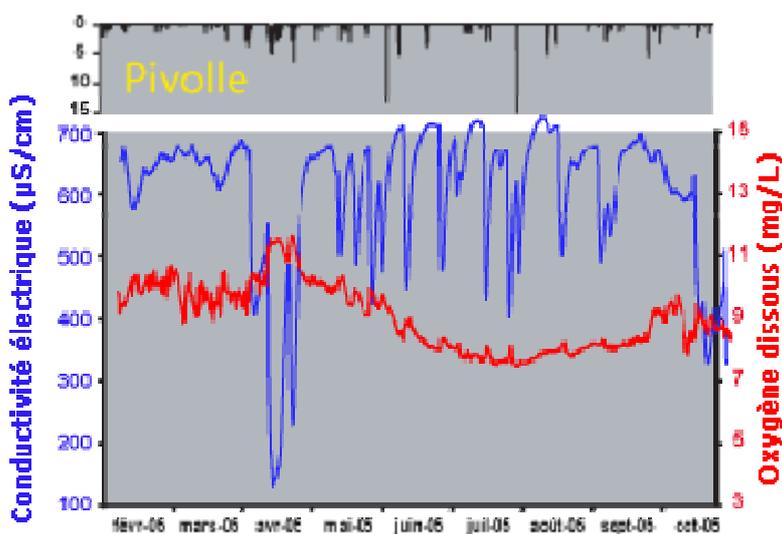


Figure D. 4 – Enregistrement en continu (pas de temps horaire) de la conductivité électrique (bleu) et de la concentration en oxygène dissous (rouge) des eaux de la nappe phréatique à l'aplomb hydraulique du bassin de ZAC de Pivolles (Malard, 2007)

Nous pouvons observer d'après la Figure 2.5 que les épisodes pluvieux induisent une baisse de la conductivité électrique et n'entraîne pas de diminution importante de la concentration en oxygène dissous.

L'examen des chroniques indique donc « *un fonctionnement attendu, à surveiller normalement* ».

$$IS_{NAPPE} = 1$$

Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas polluer le sol en profondeur)

Les indicateurs de contamination du sol ont été calculés à partir des concentrations en polluants présentés au Annexe A. L'indicateur IS_{SOL1} vaut 0,9 mètre et l'indicateur IS_{SOL2} vaut 0,333.

Etre maintenable facilement

L'évaluation du bassin Django Reinhardt par rapport à des dysfonctionnements est donnée au Tableau D. 14.

Tableau D. 14 – Liste des dysfonctionnements qui pourront être observés

Bassins	
Aspect négligé (du bassin lui-même et des autres dispositifs)	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>
Présence d'érosion	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>
Revêtement en mauvais état	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>
Présence importante d'insectes	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>
Présence de poches d'eau stagnante	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>

L'indicateur IS_{MAIN} vaut donc 0.

Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels

L'Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers a été calculé à partir des données de concentrations en polluants dans le sol du bassin d'infiltration, données au Annexe A. L'indicateur IS_{SANI} a été estimé à 0,88.

Produire des déchets facilement gérables

Aucun sédiment recueilli dans le bassin ZAC de Pivolles n'est valorisé. L'indicateur IS_{DEC} vaut alors 0.

Acceptabilité sociale d'un scénario

Aucune plainte n'a été posée par rapport au bassin ZAC de Pivolles. L'indicateur IS_{AS} vaut alors 1.

Les indicateurs proposés ont été calculés pour le bassin ZAC de Pivolles. Le Tableau D. 15 montre les résultats.

Tableau D. 15 – Résultats des calculs des indicateurs et seuils calculés, bassin ZAC de Pivolles

Indicateurs	Résultats	Seuil d'indifférence	Seuil de préférence stricte
IS _{HYD1}	0	0	0
IS _{HYD2}	0,0004	0,000316	0,000632
IS _{NAPPE}	1	0	0
IS _{PT}	Non calculé par manque de données	-	-
IS _{SOL1}	0,9	0,2	0,5
IS _{SOL2}	0,333	0	0
IS _{MAIN}	0	1	2
IS _{SAN1}	0,88	0	0
IS _{SAN2}	Non calculé par manque de données	-	-
IS _{SAN3}	Non calculé par manque de données	-	-
IS _{DEC}	0	0	0
IS _{COUT}	Non calculé par manque de données	-	-
IS _{AS}	1	0	0

ANNEXE E – de la méthode des entropies

La méthode des entropies (Zeleny, 1982) in (Pomerol et Barba-Romero, 1993) est en fait une méthode de détermination des poids sans intervention directe du décideur. Elle n'a pas été développée à l'origine pour l'application que nous en faisons. Elle part de l'hypothèse que plus les évaluations d'un critère pour les différentes solutions sont dispersées, plus le critère en question a des chances d'être décisif dans le processus de classement. L'idée principale est que l'influence d'un critère j est directement fonction de la quantité d'informations apportée par le critère par rapport à l'ensemble des actions. Ainsi, le critère j sera d'autant plus important que la dispersion des évaluations des actions sera importante pour j . Ceci revient à dire que les critères les plus importants sont ceux qui ont le plus fort pouvoir de discrimination entre les actions. Cette méthode revient en fait à trouver une mesure de dispersion des évaluations.

L'entropie E_j d'un critère j est définie par :

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \cdot \sum_{i=1}^n a'_{ij} \cdot \ln(a'_{ij}) \quad (\text{Équation E.1})$$

$$a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (\text{Équation E.2})$$

Avec :

n : nombre d'actions

a_{ij} : évaluation d'une action i par rapport au critère j

a'_{ij} : évaluation normalisée d'une action i par rapport au critère j

L'entropie d'un critère est d'autant plus importante que les valeurs a'_{ij} sont proches les unes des autres. Recherchant plutôt l'inverse, il est nécessaire d'introduire une mesure de dispersion D_j définie par : $D_j = 1 - E_j$ pouvant être à son tour normalisée en posant que le poids issu de la méthode des entropies est :

$$w_j = D_j / \sum_{j=1}^{nc} D_j \quad (\text{Équation E.3})$$

ANNEXE F –Méthode ELECTRE III & ELECTRE TRI

La méthode ELECTRE III

La méthode ELECTRE III a été proposée par Roy (1978). Son objectif est de comparer et de classer des actions potentielles dont les performances sont connues sur un ensemble de critères. Elle est basée

sur la construction d'un surclassement floue, l'élaboration de deux classements antagonistes et la synthèse selon un classement final.

Le principe de la méthode est le suivant. La matrice des évaluations des performances des différentes actions potentielles ayant été établie, les critères définis et pondérés (importance relative des critères les uns par rapport aux autres), les actions sont alors comparées deux à deux (agrégation partielle) à partir d'une *relation de surclassement*.

ELECTRE III utilise à ce niveau la notion de « pseudo critère » dans la modélisation des préférences. Chacun des critères est caractérisé par : un seuil d'indifférence (q) et un seuil de préférence stricte (p) permettant de distinguer une préférence faible et une préférence stricte. Le seuil d'indifférence est défini de manière à tenir compte de l'incertitude qui entache les évaluations sur ce critères ou représente l'écart jugé insignifiant pour pouvoir faire une différence entre deux actions. Un troisième seuil est utilisé (le seuil de veto) qui est la limite au-dessus de laquelle deux actions sont considérées comme non comparables même si une des actions est en grande majorité meilleure que l'autre sur les autres critères.

Les pseudo critères

Un pseudo-critère est une fonction g dont le pouvoir discriminant est caractérisé par les seuils q et p , comme indiqué à la Figure 3.1.

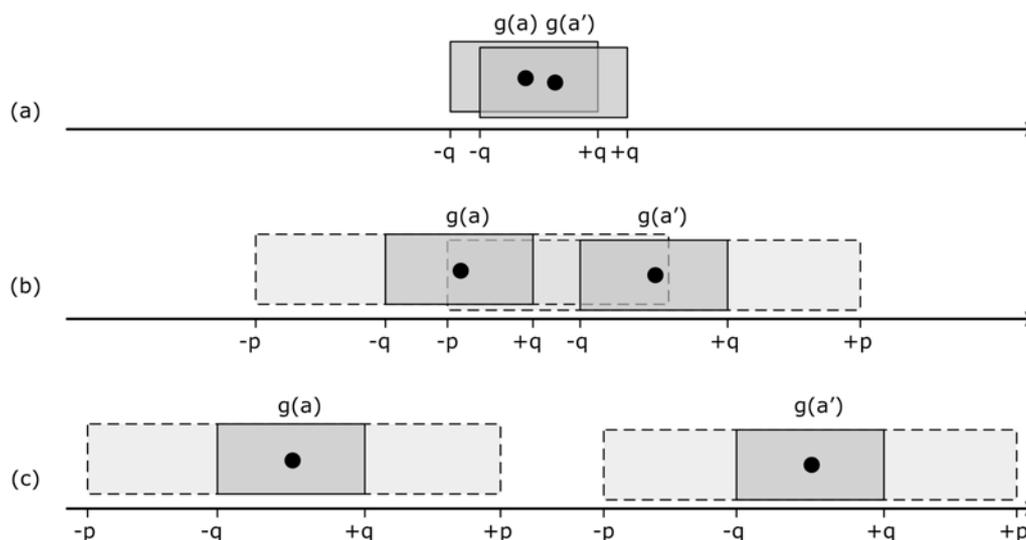


Figure 3.1 – Zones (a) indifférence ; (b) de préférence faible ; (c) de préférence stricte (Maystre *et al.*, 1994)

Les seuils p et q peuvent être définis comme :

- constant ;
- proportionnel à la performance, comme par exemple : $p(g(a)) = \alpha + \beta.g(a_1)$.

Les indices de concordance

ELECTRE III utilise un indice partiel de concordance par critère (c_j) et un indice de concordance globale (C_{ik}). Les équations sont établis, pour l'exposé en considérant des critères croissants (plus la valeur est grand, meilleure est la performance).

L'indice partiel de concordance par critère indique dans quelle mesure l'action a_i est au moins aussi bonne que l'action a_k pour le critère j .

$$c_j(a_i, a_k) = 0 \Leftrightarrow p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i)$$

$$0 < c_j(a_i, a_k) < 1 \Leftrightarrow q_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j$$

$$c_j(a_i, a_k) = 1 \Leftrightarrow g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq q_j$$

L'indice de concordance globale affirme dans quelle mesure il y a concordance avec l'hypothèse « l'action a_i surclasse l'action a_k ». Il est défini par la formule suivante :

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot c_j(a_i, a_k)}{\sum_{j=1}^m P_j} \quad (\text{Équation 3.4})$$

Avec :

P_j : Poids du critère j

c_j : indice partiel de concordance du critère j

L'indice de discordance

La notion de discordance permet d'examiner le cas où une action a_i est moins bonne que a_k . Elle s'appuie sur le seuil de veto. Elle s'exprime par une mesure de l'affaiblissement de l'indice de concordance. Le seuil de veto pour le critère j est, par définition, la valeur de la différence $g_j(a_k) - g_j(a_i)$ à partir de laquelle il paraît prudent de refuser tout crédibilité au surclassement de l'action a_i par l'action a_k , même si tous les autres critères sont en concordance avec ce surclassement.

L'indice de discordance $d_j(a_i, a_k)$ est donnée par :

$$d_j(a_i, a_k) = 1 \Leftrightarrow v_j < g_j(a_k) - g_j(a_i)$$

$$0 < d_j(a_i, a_k) < 1 \Leftrightarrow p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq v_j$$

$$d_j(a_i, a_k) = 0 \Leftrightarrow g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j$$

Relation de surclassement floue et degré de crédibilité

Le degré de crédibilité est l'indice de concordance global affaibli par les indices de discordance. Il est donné par :

$$\delta_{ik} = C_{ik} \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(a_i, a_k)}{1 - C_{ik}} \quad (\text{Équation 3.5})$$

Avec :

C_{ik} : indice de concordance globale

\bar{F} : sous ensemble de la famille F qui a comme éléments les critères pour lesquels l'indice de discordance est supérieur à l'indice de concordance globale

$d_j(a_i, a_k)$: indice de discordance

La méthode réalise enfin donc deux préordres complets, à travers la distillation ascendante et la distillation descendante, synthétisés in fine par un classement median final.

3.2.1 La méthode ELECTRE TRI

La méthode ELECTRE TRI, proposé par Yu (1992), est basée sur l'affectation des actions à une catégorie, à travers deux procédures d'affectation appelées optimiste et pessimiste. Cette affectation est réalisée à partir de la comparaison de chaque action potentielle avec des actions de référence.

La méthode ELECTRE TRI utilise, comme la méthode ELECTRE III, pour chaque un des critères deux seuils dits d'indifférence (q) et de préférence stricte (p) ; ces seuils ont été définis de manière à tenir compte de l'incertitude qui entache les valeurs de la matrice d'évaluation. Ces seuils permettent l'apparition de la notion de préférence faible. Un troisième seuil, le seuil de veto (v), est utilisé dans la concrétisation de la notion de discordance.

Les indices de concordance

ELECTRE TRI utilise les mêmes indices de concordance par critère (c_j) et un indice de concordance globale (C_{ik}) que la méthode ELECTRE III.

L'indice de concordance par critère indique dans quelle mesure l'action a_i est au moins aussi bonne que l'action b^k de référence pour le critère j .

$$c_j(a_i, b^k) = 0 \Leftrightarrow p_j < g_j(b^k) - g_j(a_i)$$

$$0 < c_j(a_i, b^k) < 1 \Leftrightarrow q_j < g_j(b^k) - g_j(a_i) \leq p_j$$

$$c_j(a_i, b^k) = 1 \Leftrightarrow g_j(b^k) - g_j(a_i) \leq q_j$$

L'indice de concordance globale affirme dans quelle mesure il y a concordance avec l'hypothèse « l'action a_i surclasse l'action b^k ». Il est défini par la formule suivante :

$$C(a_i, b^k) = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot c_j(a_i, b^k)}{\sum_{j=1}^m P_j} \quad (\text{Équation 3.6})$$

Avec :

P_j : Poids du critère j

$c_j(a_i, b^k)$: indice de concordance du critère j

L'indice de discordance

De même l'indice de discordance $d_j(a_i, b^k)$ est donnée par :

$$d_j(a_i, b^k) = 1 \Leftrightarrow v_j < g_j(b^k) - g_j(a_i)$$

$$0 < d_j(a_i, b^k) < 1 \Leftrightarrow p_j < g_j(b^k) - g_j(a_i) \leq v_j$$

$$d_j(a_i, b^k) = 0 \Leftrightarrow g_j(b^k) - g_j(a_i) \leq p_j$$

Relation de surclassement floue et degré de crédibilité

Le degré de crédibilité est l'indice de concordance global affaibli par les indices de discordance, comme dans la méthode ELECTRE III. Il est donné par :

$$\sigma_s(a_i, b^k) = C(a_i, b^k) \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(a_i, b^k)}{1 - C(a_i, b^k)} \quad (\text{Équation 3.7})$$

Avec :

$C(a_i, b^k)$: indice de concordance globale

\bar{F} : sous ensemble de la famille F qui a comme éléments les critères pour lesquels l'indice de discordance est supérieur à l'indice de concordance globale

$d_j(a_i, b^k)$: indice de discordance

La relation de surclassement entre une action potentielle et une action de référence est établie à partir de degrés de crédibilité et d'un seuil de coupe λ , comme montre la Figure 3.2.

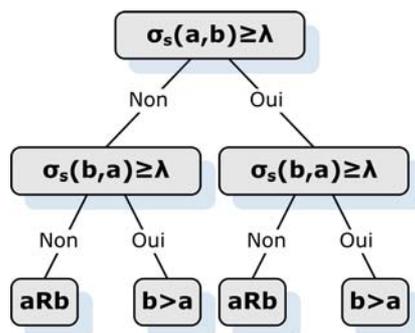


Figure 3.2 – Etablissement de la relation de surclassement (Maystre *et al.*, 1994)

Procédure d'affectation

La comparaison des actions aux profils de référence est effectuée selon deux procédures. Les caractéristiques des deux procédures d'affectation sont détaillées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 - caractéristiques des procédures d'affectation

Procédure d'affectation	Pessimiste	Optimiste
Objectif	Pousser les actions dans les catégories les plus basses possibles	Pousser les actions dans les catégories les plus hautes possibles
Procédure	Affecter l'action à une catégorie de façon telle que cette action surclasse l'action de référence basse de cette catégorie : $aSb^h \rightarrow a \in C^{h+1}$ avec $h=1,$	Affecter l'action à une catégorie de façon telle que l'action de référence haute de cette catégorie soit préférée à l'action : b^h

	2	$\succ a \rightarrow a \in C^h$ avec $h=1, 2$
Sens	de haut en bas	de bas en haut

3.2.2 Méthodes de pondération des critères et indicateurs

L'importance relative des critères et des indicateurs entre eux est un aspect primordial dans l'analyse multicritère. Ces poids doivent être le reflet des points de vue des décideurs. Chacun d'eux s'appuie sur un système de valeurs, des convictions, d'opinions différentes pour expliciter leurs préférences.

Diverses méthodes de pondération de critères existent et leurs résultats peuvent beaucoup influencer le résultat final de l'analyse (Pomerol & Barba-Romero, 1993). Les poids peuvent être déterminés par des méthodes dites « objectives » comme la méthode des entropies (Zeleny, 1982), par des méthodes d'évaluation directe, comme le classement simple ou la méthode de comparaisons successives (Churman & Ackoff, 1954) ou encore par des méthodes indirectes, comme la méthode AHP (Saaty, 1977).

Il est important de bien insister sur le fait que les poids peuvent influencer le résultat final d'une analyse multicritère, d'où l'importance de déployer tous les efforts possibles dans une analyse de sensibilité à la variation des poids, avant de donner des recommandations finales en matière d'aide à la décision. Cependant l'analyse de sensibilité doit rester fidèle à une stratégie donnée.