

Projet de Fin d'Études (PFE) 2022-2023

L'adaptation au risque climatique en ville grâce aux NBS



Photographie de noue (Maxence Paris et Nathan Requillart, 2023)

L'adaptation au risque climatique en ville grâce aux NBS : La gestion de l'eau et le risque inondation

Vincent Rotgé

Maxence Paris et Nathan Requillart

2022-2023

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

Les auteurs (Maxence Paris et Nathan Requillart) de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- § Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- § Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- § Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- § Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Nous tenons à remercier monsieur Vincent Rotgé pour nous avoir fait confiance en nous laissant travailler sur ce sujet, et également pour son aide qui nous aura permis de produire ce rapport.

Sommaire

Table des figures	1
Table des tableaux	1
Introduction	2
I. L'intérêt des NBS dans la gestion de l'eau	3
I.1. Les NBS, qu'est ce que c'est ?	3
I.2. Typologie des NBS dans la gestion de l'eau	6
i. La typologie générale de NBS	6
ii. La typologie des NBS en terme de gestion de l'eau	7
I.3. Cas de deux NBS	9
i. Les chaussées perméables	9
ii. Aménagement linéaire : Les noues et bandes enherbées	11
I.4. Synthèse	13
II. La méthodologie de mise en oeuvre des NBS	13
II.1. Les méthodes d'implémentation des NBS	13
i. Evaluation des services écosystémiques	14
ii. La cartographie	16
iii. La méthode ATP/AP	19
iv. Synthèse	21
II.2. Des méthodes de planification adaptatives pour la gestion de l'eau	22
i. Assumption-based planning (ABP)	23
ii. Adaptive policy making (APM)	24
iii. Adaptation Tipping Points and Adaptation Pathways (ATP et AP)	26
iv. L'aboutissement : Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP)	28
II.3 Bilan	29
Conclusion	30
Bibliographie	31
Annexes	33

Table des figures

Figure 1 : Les solutions fondées sur la nature : un terme parapluie

Figure 2 : Les principaux effets des nature-based solutions sur les différents services écosystémiques

Figure 3 : Couches types d'une chaussée perméable

Figure 4 : Exemples de couches de surface d'une chaussée perméable

Figure 5 : Exemple de noue

Figure 6 : Extrait de la première matrice d'évaluation de la capacités des types de couverture terrestre à fournir des biens et des services écosystémiques

Figure 7 : Exemples d'indicateurs pour la matrice théorique

Figure 8 : Synthèse de la méthode du Cerema

Figure 9 : Régulation des macro-polluants de l'eau

Figure 10 : Catégories et sous catégories d'UMT pour la ville d'Addis Ababa

Figure 11 : Services écosystémiques rendus par 3 des 5 villes africaines étudiées

Figure 12 : Résultats de la méthode ATP pour l'étude exemple

Figure 13 : Étapes de la modélisation

Figure 14 : Les 5 étapes de l'ABP

Figure 15 : Les étapes de l'APM

Figure 16 : Comparaison des approches de planification classiques avec l'ATP

Figure 17 : Schéma conceptuel de la méthode AP

Figure 18 : Les étapes de la DAPP

Table des tableaux

Tableau 1 : typologie des NBS dans la gestion de l'eau

Tableau 2 : Forces et faibles des techniques de mise en place des NBS

Introduction

Depuis le siècle dernier, la Terre connaît des changements climatiques sans précédents. En effet, la hausse de la température atmosphérique, bien trop rapide, entraîne des dérèglements de grande ampleur sur l'ensemble du globe. Les enjeux liés à cette crise sont multiples, allant d'enjeux politiques, en passant par la philosophie ou encore l'éthique jusqu'à l'économie. Il va sans dire que l'enjeu majeur est écologique : la faune et la flore, finalement la biodiversité en générale, est impactée, allant jusqu'à la disparition d'espèces. Cette vision recoupe finalement nos intérêts en tant qu'êtres humains faisant partie de cette biodiversité. Et alors, l'enjeu est pour nous sécuritaire. Effectivement, les conséquences directes les plus désastreuses sont en fait l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de phénomènes climatiques devenant de véritables catastrophes naturelles : inondations, incendies, etc... Le dérèglement climatique est notamment lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Il convient ici de comprendre que ces émissions sont dans leur globalité d'origine anthropique. De plus, il semblerait que les villes soient plus émettrices de GES puisqu'elles seraient responsables de plus de 70% des émissions globales selon le CNRS.

Plusieurs solutions existent pour faire face aux dangers liés au changement climatique dont les "Nature-based Solutions" (NbS), solution très récente et qui est en pleine émergence. Le concept de "Nature-based Solutions" est un terme assez récent qui a été introduit vers la fin des années 2000 par l'UICN. Ce concept est utilisé "afin de souligner l'importance de la conservation de la biodiversité pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique." (Pauleit et al., 2017). C'est ensuite en 2015 que la commission européenne a adopté, pour son programme de recherche Horizon 2020, le concept de solutions fondées sur la nature en pointant plus précisément les zones urbaines (Pauleit et al., 2017). C'est ainsi qu'en 2016 lors du congrès mondial de la nature, les membres de l'UICN ont adopté une résolution qui allie les avantages de la biodiversité et le bien être humain grâce à l'utilisation de la nature.

Jusqu'à présent, la plupart des efforts déployés par les villes pour répondre au changement climatique se sont concentrés sur l'atténuation (c'est-à-dire la réduction des émissions de gaz à effet de serre) et beaucoup moins sur l'adaptation (c'est-à-dire les stratégies à long terme visant à réduire l'exposition, la susceptibilité et à améliorer la capacité d'adaptation des communautés face à divers dangers), car ces stratégies impliquent d'adopter une approche de précaution et d'anticipation. Cependant, la mise en œuvre de plans d'adaptation est urgente. Le changement climatique mondial est déjà en cours et les coûts sociaux, infrastructurels et économiques de l'inaction sont élevés.

Par la suite, nous évoquerons essentiellement comment les NbS permettent de s'adapter face aux risques climatiques en ville concernant le facteur "eau" comme les inondations. L'aspect atténuation associé aux NbS sera traité en second plan et peu détaillé. Cependant une question subsiste et celle-ci interroge la convenance des NBS : sont-elles suffisantes pour faire face au risque climatique en ville ? Nous ferons, dans un premier temps, une description plus précise des NbS et nous montrerons en quoi les NbS sont une solution utile qui apporte plusieurs bénéfices. Ensuite, nous expliquerons les méthodes d'implantation des NbS. Nous montrerons qu'il est possible de les combiner et qu'il est important de bien quantifier le ou les risques auxquels une NbS peut faire face.

I. L'intérêt des NBS dans la gestion de l'eau

I.1. Les NBS, qu'est ce que c'est ?

Les Nature-based Solutions (NBS) sont des conceptions qui, comme son nom l'indique, sont basées sur la nature. Le concept de "Nature-based Solutions" (NbS) a été introduit par l'UICN vers la fin des années 2000. Comme énoncé dans l'introduction, c'est en 2015 et 2016 que le concept des NBS se fait connaître en Europe et mondialement par une résolution qui utilise la nature dans le but d'allier les avantages de la biodiversité et le bien être humain. Cette résolution définit donc les NBS comme "actions visant à protéger, gérer durablement et restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés, répondant aux défis sociétaux de manière efficace et adaptative, tout en offrant des avantages en termes de bien-être humain et de biodiversité". (IUCN)

Ce qui est intéressant avec les NbS c'est qu'il s'agit d'un concept "parapluie". Ce ne sont donc pas des infrastructures qui cherchent à imiter la nature. Ce sont plutôt des projets qui vont s'appuyer sur les avantages que peuvent apporter la nature afin de répondre à des enjeux. Elles regroupent les infrastructures vertes et bleues, les adaptations basées sur les écosystèmes, la restauration écologique, l'ingénierie écologique, l'atténuation écosystémique ou encore la réduction des risques basée sur l'écosystème (IUCN). C'est donc une solution qui permet d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre mais aussi de s'adapter aux potentiels risques climatiques (figure 1).

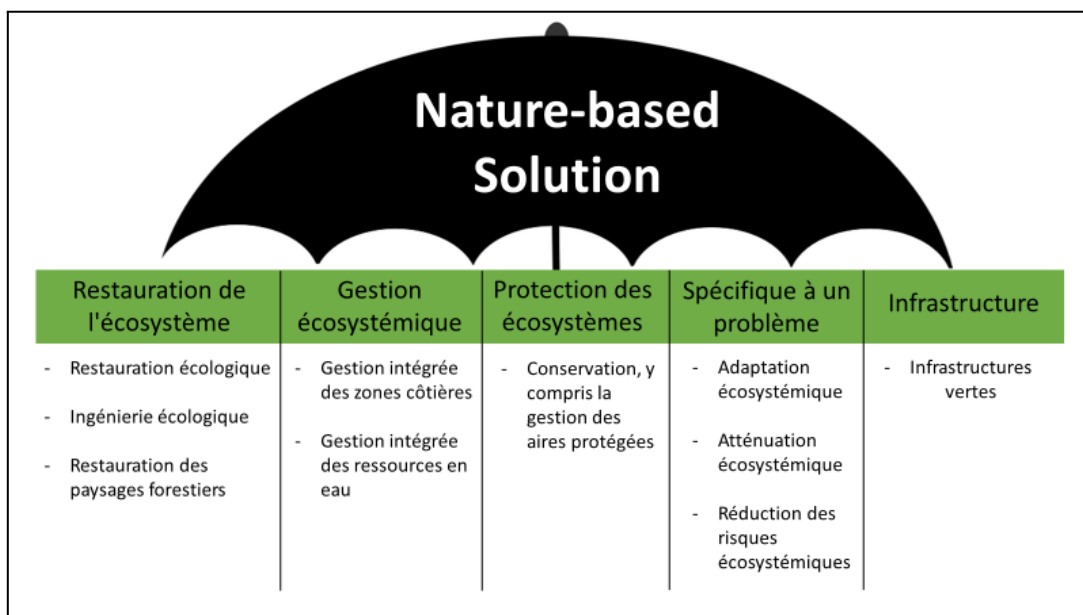


Figure 1 : Les solutions fondées sur la nature : un terme parapluie (Maxence Paris et Nathan Requillart, 2022)

Les NbS vont permettre de rendre des services écosystémiques (SE). Ces derniers correspondent à la contribution d'un projet en fonction des enjeux présents. Le ou les SE

rendus dépendent du type de NBS, un service écosystémique peut-être sanitaire, environnemental, social ou économique. Par exemple, les NBS peuvent être efficaces face aux inondations car elles permettent une meilleure régulation des ruissellements. Copenhague a subi 800 millions de dommages suite à des inondations en 2011, ce qui a poussé la ville à adopter de nouvelles approches tels que les toits végétalisés ou encore les “cloudbursting” dans les parcs (permet d’accueillir une grande quantité d’eau, utile pendant les crues) (Schweitzer J. P. et al., 2018). Un autre service écosystémique est l’amélioration de la qualité de l’air. La pollution de l’air est le plus grand risque environnemental pour la santé en Europe. La végétation a la capacité d’agir en tant que barrière et d’éliminer les polluants par adsorption ou dépôt sec. Les écosystèmes urbains et les infrastructures vertes comme les corridors verts peuvent contribuer à la réduction des émissions. Ces mêmes infrastructures vertes ont la capacité de réduire les nuisances sonores. Ces services écosystémiques sont plus de l’ordre environnemental, un exemple de SE plutôt de l’ordre sanitaire ou social va être le bien-être et la santé des habitants. La présence d’écosystème en ville joue un rôle pour le bien-être et la santé mentale. Des espaces verts ou connectés avec la nature ont des effets positifs sur l’humeur, la concentration ou le stress (Alberto P. et al., 2018).

Ces services écosystémiques rendus par les NBS sont donc nombreux (figure 2) et sont très utiles pour faire face aux risques climatiques car elles vont permettre d’atténuer ces risques ou d’y faire face en s’adaptant aux différents risques et elles vont en plus de cela pouvoir donner des bénéfices sanitaire, social et économique pour les villes qui les utilisent.

	Ecosystem Services (TEEB categories)	Green areas	Morphological rehabilitation of streams & floodplains	Constructed wetlands	Sustainable urban drainage systems
Provisioning	Food	+			
	Water		+		+
	Raw Materials	+			
	Genetic resources	+			
	Medicinal resources				
	Ornamental resources	+	+	+	+
Regulation and maintenance	Air quality regulation	++	+		+
	Waste treatment (water purification)		++	++	+
	Regulation of water flows and moderation of extreme events	+	++	++	+
	Erosion prevention		+	+	
	Climate regulation	++	+	++	++
	Maintenance of soil fertility	+	+		
	Pollination	++		++	+
	Biological control	+	+		
	Maintenance of life cycles of migratory species (incl. nursery service)	+	+	++	+
	Maintenance of genetic diversity (especially in gene pool protection)	+	+	++	
Cultural	Spiritual experience	++	+		
	Aesthetic information	++	++	+	++
	Inspiration for culture, art and design	++	++		++
	Recreation and tourism	++	++	+	
	Information for cognitive development	++	++		

Figure 2 : Les principaux effets des nature-based solutions sur les différents services écosystémiques (Alberto P. et al., 2018)

Les services écosystémiques sont ici regroupés en trois grandes catégories (figure 2). D'une part l'approvisionnement, qui est la capacité à fournir des ressources naturelles comme l'eau ou la nourriture. D'autre part, les services de régulation et de gestion, permettant entre autres la régulation de la qualité de l'air ou encore la prévention contre l'érosion. Et enfin, les services culturels englobant tout ce qui a attiré au bien être. Cela permet d'identifier les différences entre les types de NBS en termes de services rendus.

Nous avons donc vu que les Nature-based Solutions était un terme récent et qu'elles regroupent un grand nombre d'infrastructures qui utilisent les avantages de la nature afin d'en tirer des bénéfices. Ces bénéfices sont appelés des services écosystémiques et dépendent des différentes NBS. Les NBS ressortent donc comme un bon allié pour faire face aux risques climatiques grâce à l'atténuation du changement climatique ou par l'adaptation au changement climatique. Le premier fait référence aux interventions anthropiques visant à réduire les forces anthropiques du système climatique. Les stratégies d'atténuation des changements climatiques comprennent celles visant à réduire les émissions et les sources de gaz à effet de serre et à améliorer les puits de gaz à effet de serre tandis que l'adaptation est caractérisée comme l'ajustement des systèmes naturels ou

humains tels que les zones urbaines en réponse à des stimuli climatiques réels ou attendus à leurs effets. Les stratégies d'adaptation au changement climatique devraient atténuer les dommages ou exploiter les opportunités bénéfiques du changement climatique (N. Kabisch et al., 2017).

Par la suite nous nous intéresserons plus particulièrement aux stratégies d'adaptations au changement climatique qu'apportent les NBS et nous nous focaliserons sur la gestion de l'eau qui fait référence au risque inondation et ruissellement. Nous classerons les NBS par typologie puis nous entrerons dans les détails techniques de deux NBS.

I.2. Typologie des NbS dans la gestion de l'eau

Nous avons vu que les NBS regroupent un grand nombre de projets. Ces projets sont tous différents mais présentent parfois des similitudes et qui peuvent donc être classés par "familles" de NBS.

i. La typologie générale de NBS

Tout d'abord, selon plusieurs sources (Eggermont et al. 2015), (UICN, 2016) il existerait une typologie de NbS. Toutes s'articulent autour d'écosystèmes naturels. La première typologie correspond à la préservation et la protection de l'écosystème. Elle consiste en une intervention nulle ou minimale dans les écosystèmes, dans le but de maintenir ou d'améliorer la fourniture d'une gamme de SE à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de ces écosystèmes préservés. Nous retrouvons dans cette catégorie la protection de zones maritimes ou la création d'aires marines protégées pour conserver la biodiversité dans ces zones. Un autre exemple qui entre dans cette première typologie est la protection des mangroves dans les zones côtières pour limiter les risques associés aux conditions météorologiques extrêmes et pour fournir des avantages et des opportunités aux populations locales. Ce type de NBS montre bien que les NbS ne sont pas seulement des aménagements "verts" mais qu'elles utilisent les écosystèmes eux-mêmes comme solution.

La deuxième typologie de NbS est la gestion des écosystèmes naturels, ici entendus de manière plus durable et multifonctionnelle visant à améliorer ou rendre plus de services écosystémiques par rapport à ce qui serait obtenu avec une intervention plus conventionnelle. Les exemples incluent la planification innovante des paysages agricoles pour accroître leur multifonctionnalité ; la gestion des forêts qui sont exploitées pour le bois en gérant de manière plus durable les cycles de coupe. L'agroforesterie, elle aussi, est un concept considéré comme NbS de gestion des écosystèmes. Elle est décrite par le ministère de l'agriculture et de l'alimentation comme étant "l'association d'arbres et de cultures ou d'animaux sur une même parcelle" permettant "une meilleure utilisation des ressources, une plus grande diversité biologique et la création d'un micro-climat favorable à l'augmentation des rendements".

Enfin, la dernière typologie de NBS serait la restauration des écosystèmes qui consiste à gérer les écosystèmes de manière très intrusive ou même à créer de nouveaux écosystèmes. Ce type de NBS est lié à des concepts tels que les infrastructures vertes et bleues. Un bon exemple sont les toîts ou les murs végétalisés créés pour atténuer le réchauffement de la ville et purifier l'air pollué. Dans le cadre de notre sujet, c'est cette

typologie qui va nous intéresser car nous retrouvons des NBS capables d'être utilisées en ville et qui vont avoir un effet sur l'atténuation du réchauffement climatique mais surtout être capables de s'adapter aux risques climatiques et notamment au risque inondation et à la gestion de l'eau. On se propose donc, au sein de cette typologie, de classer une nouvelle fois les NBS cantonnées dans la gestion de l'eau en ville en plusieurs familles.

ii. La typologie des NBS en terme de gestion de l'eau

On le sait, le réchauffement climatique à l'échelle mondiale va nous amener à subir des événements climatiques de plus en plus extrêmes comme des inondations de plus en plus intenses ou des pluies de plus en plus fortes qui, avec l'imperméabilisation des villes, peuvent avoir de graves conséquences à l'échelle locale ou régionale liées au ruissellement (Y. Depietri et T. Mcphearson, 2017). Heureusement, les NBS comme les infrastructures vertes et bleues, faisant parti de la typologie 3 comme vu précédemment, et qui sont spécifiques à la gestion de l'eau sont nombreuses et vont être très utiles dans la gestion de l'eau en favorisant l'infiltration, en reconduisant l'eau, en ralentissant les pics de crue, ou tout simplement en stockant l'eau pour ensuite la relâcher progressivement pour soutenir le niveau de la nappe ou pour hydrater pendant un certain temps l'air urbain sec (Dagmar Haase, 2017). Ces NBS peuvent aussi avoir un rôle épurateur, utile en ville lorsque le ruissellement peut emporter des polluants.

Ces NBS peuvent donc être encore une fois triées par "familles". Le cerema classe ces NBS en fonction du type d'aménagement, ce qui est une bonne approche pour répartir ces Nature-based Solutions en différentes familles. On se propose donc de trier ces NBS en se basant sur l'approche du Cerema (tableau 1).

Tableau 1 : typologie des NBS dans la gestion de l'eau (Maxence Paris et Nathan Requillart, 2022)

Familles	Type d'ouvrage
Milieux humides	Bassin en eau
	Zone de rejet végétalisé
	Filtre planté de roseaux
Aménagement linéaire	Fossé
	Tranchée
	Noue
Bassin sec	Bassin de rétention
	Bassin d'infiltration
Fosse	Récupération des eaux pluviales
	Puisard
Aménagement isolé	Mur et toiture végétalisés
	Surface imperméable

Milieux humides

Ce sont des terres dont le sol reste saturé d'eau. Cette famille de NBS aura comme caractéristique principale de filtrer et dépolluer les eaux entrantes. Les algues et les plantes des zones humides assurent un niveau particulièrement bon de filtrage et d'élimination des nutriments. Ces ouvrages vont aussi permettre de stocker l'eau et de la laisser s'infiltrer dans le sol, ils ont donc la capacité de régulariser des débits d'eau, et de modérer les pics d'inondation (C. Poletto and R. Tassi, 2012). On retrouve notamment dans cette typologie les bassins en eau, les zones de rejet végétalisées et les filtres plantés de roseaux.

Aménagement linéaire

Cette famille se définit par des ouvrages comme des fossés, des noues ou encore des tranchées. Ce sont donc des aménagements linéaires avec une longueur bien supérieure à leur largeur et leur profondeur qui ont pour rôle principal de conduire l'eau. Ils auront aussi un rôle infiltrant grâce à leur forme linéaire qui leur confère une plus grande longueur de berge et donc maximise le volume de sol sollicité pour l'infiltration. Selon les conditions locales et le volume à infiltrer, la conception peut privilégier l'infiltration, le stockage ou les deux. Avec une bonne végétation, ces ouvrages peuvent aussi retenir l'eau et avoir une petite fonction épurateur.

Bassin sec

Comme son nom l'indique, il s'agit ici de bassins sans eau qui auront comme principale fonction de retenir l'eau des ruissellements des surfaces imperméables. Ces aménagements permettent de stocker des quantités d'eau importantes et sont très utiles pour lutter contre les inondations. En plus de la rétention d'eau, ces ouvrages vont permettre ensuite à l'eau de s'infiltrer naturellement dans le sol et peuvent aussi avoir un rôle épurateur s'ils sont bien végétalisés. L'avantage de ces bassins est qu'ils peuvent être installés dans des zones publiques comme les places, les parcs et les cours (C. Poletto and R. Tassi, 2012).

Fosse

Cette famille correspond à de gros volumes souvent enterrés comme les récupérateurs des eaux pluviales ou les puisards. Leur fonction première est de collecter et de stocker l'eau pour une utilisation ultérieure. Les puisards vont aussi permettre à l'eau de s'infiltrer doucement dans le sol.

Aménagement isolé

Ce type d'aménagement se définit par des aménagements qui ne sont pas forcément liés à tout le système de drainage de la ville. On retrouve dans cette typologie les murs et toitures végétalisés qui vont principalement collecter les eaux pluviales et éviter que ces eaux ne finissent en ruissellement. Ils vont aussi apporter d'autres services comme la réduction de pollution sonore et de l'air et aussi une isolation thermique au bâtiment. On retrouve aussi dans cette famille les surfaces perméables qui auront un rôle d'infiltration. Ces surfaces perméables peuvent être des jardins de pluie qui correspondent à des jardins végétalisés à petite échelle utile dans le stockage et l'infiltration de l'eau, ou nous pouvons retrouver les chaussées perméables utilisées par exemple dans les parkings. Étant donné qu'une bonne partie des villes sont imperméabilisées, l'utilisation de ce type d'aménagement peut se rendre très utile dans la gestion des ruissellements en ville et limiter l'impact des inondations.

Ces types de NBS possèdent donc des points communs et différences. Néanmoins, nous remarquons que les NBS, dans la plupart des cas, ne se suffisent pas à elles seules. En effet, une grande partie des NBS nécessitent l'association d'infrastructures conventionnelles, dites "grises"). Par exemple, dans la typologie des aménagements linéaires, les fossés ou les noues sont souvent associés à des drains en bétons qui peuvent les aider à évacuer l'eau si la quantité est trop importante. Les récupérateurs d'eau sont aussi construits en ingénierie civile comme du béton imperméable afin de stocker l'eau. Ou encore, les aménagements isolés tels que les toits ou les murs végétalisés sont construits sur le bâti existant.

Les NBS sont donc utiles pour s'adapter au changement climatique de part leurs services écosystémiques. Néanmoins, celles-ci sont souvent associées aux infrastructures grises pour tirer les avantages des deux parties.

I.3. Cas de deux NBS

Nous venons donc de voir que les NBS sont nombreuses en ce qui concerne la gestion de l'eau et qu'elles peuvent être de différents types qui auront des spécificités différentes. Nous proposons donc de présenter deux NBS plus précisément en rentrant dans les termes techniques afin de montrer comment les NBS fonctionnent pour s'adapter face aux phénomènes climatiques comme les inondations.

i. Les chaussées perméables

Comme expliqué dans la partie I.2.ii, les chaussées perméables peuvent se rendre très utiles dans des villes où les surfaces imperméabilisées dominent. Les chaussées perméables sont des chaussées qui agissent normalement dans le contrôle du pic et du volume de ruissellement, dans le contrôle de la pollution diffuse et, lorsqu'elles infiltrent l'eau dans le sol, elles favorisent la recharge des eaux souterraines (C. Poletto et R. Tassi, 2012). En raison de leurs caractéristiques mécaniques limitées, les chaussées perméables sont couramment utilisées dans les zones piétonnes, aux aires de stationnement, aux places, aux terrains de sport et dans les zones réservées aux véhicules légers, généralement avec des limitations de vitesse jusqu'à environ 90 km/h. De plus, en raison de leur perméabilité élevée, les chaussées perméables ne sont pas recommandées pour les zones qui peuvent avoir un potentiel élevé de polluants, de dépôt de sédiments ou d'accumulation de matière organique pour éviter le colmatage trop fréquent (C. Poletto et R. Tassi, 2012 ; D. Ciriminna et al., 2022).

Une section de chaussée perméable typique est illustrée sur la figure 3, la première couche correspond à la couche perméable ou poreuse mais toujours avec les caractéristiques requises pour permettre aux eaux pluviales et à leur pollution de s'infiltrer dans les chaussées. Dessous, il y a la couche de base et de sous-base qui sont séparés un géotextile qui est là pour éviter que ces deux couches se mélangent et éviter l'infiltration des hydrocarbures. De plus, le géotextile protège l'eau stockée de l'évaporation (Gomez-Ullate, E. et al., 2011). Des alternatives proposent d'associer les chaussées perméables avec une infrastructure grise comme une conduite de sortie qui permet à l'eau stockée dans la

sous-base de passer ensuite par une série de zones humides pour la dépolluer avant de rejoindre un ruisseau (Abbott et Comino-Mateos, 2003).

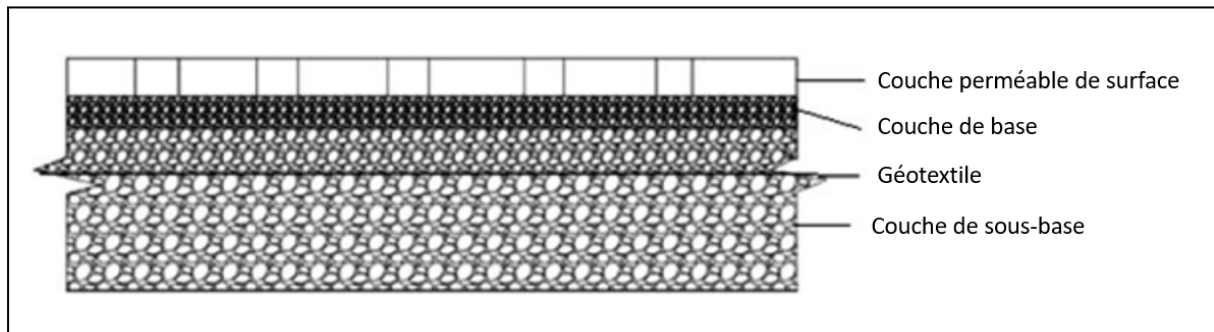


Figure 3 : Couches types d'une chaussée perméable (Abbott et Comino-Mateos, 2003)

Il existe de multiples couches de surface perméable capable d'infiltrer l'eau. Nous pouvons retrouver par exemple l'asphalte poreux (figure 4 (a)), le béton drainant (figure 4 (b)), la chaussée perméable en béton autobloquant, également appelée chaussée perméable en blocs de béton (figure 4 (c)) ou encore la chaussée grillagée, en béton ou en plastique (figure 4 (d)) (D. Ciriminna et al., 2022). On remarque que la plupart de ses surfaces sont faites avec du génie civil classique comme le béton ou l'asphalte et que seule la chaussée grillagée peut être accompagnée de végétation. La chaussée perméable est donc une NBS où la végétation ne sera pas prédominante. Le service écosystémique tiré de la nature, dans cette NBS, sera essentiellement la capacité naturelle du sol à infiltrer et stocker l'eau.

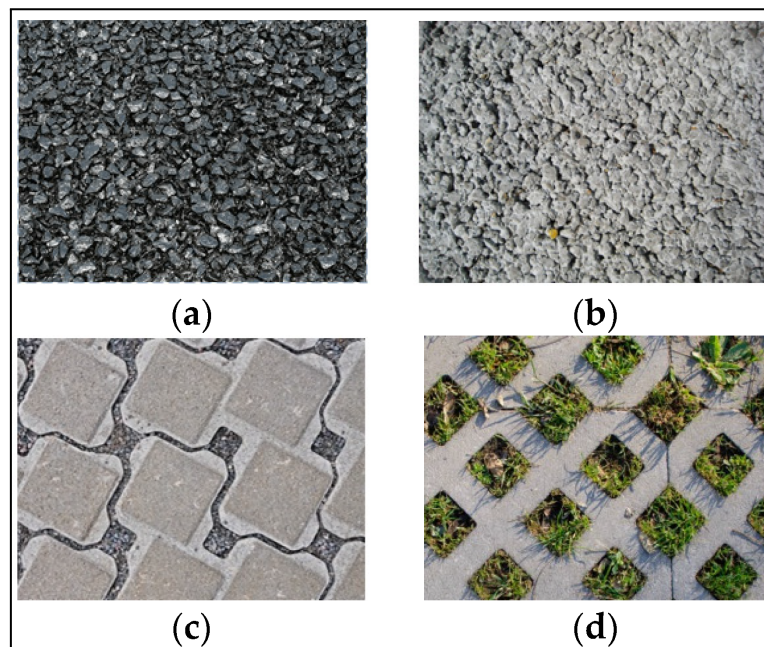


Figure 4 : Exemples de couches de surface d'une chaussée perméable (D. Ciriminna et al., 2022)

Des études ont démontré que les chaussées perméables permettent d'obtenir de bon résultats. Par exemple, Abbott & Comino-Mateos (2003) affirme que le pic de débit

correspondant à une intensité de pluie de 12 mm/h était de 0,37 mm/h. Il s'agit d'un avantage majeur de ces systèmes car :

- ils réduisent la capacité des systèmes d'égouts; et,
- permet aux aménagements urbains de se conformer plus facilement aux autorisations de décharge.

Cette même étude démontre aussi que le pourcentage de ruissellement (calculé par événement) a donné une valeur moyenne de 67 %. Le pourcentage de ruissellement des zones urbanisées est d'environ 90% tandis que celui des plantations forestières est d'environ 60% (T. V. Ramachandra et al., 2014). Cela montre que le pourcentage de ruissellement moyen d'une chaussée perméable est plutôt bon et permet une bonne réduction des eaux de ruissellements.

E. Gomez-Ullate et al. (2011) a, quant à lui, garanti la capacité de ces systèmes à stocker l'eau de pluie dans le temps. Le volume d'eau stocké d'un peu plus d'un mètre cube dans une place de parking pourrait gérer les nécessités pour irriguer un jardin de 10 m² pendant près d'un mois complet de sécheresse.

Enfin plusieurs études ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les différentes couches de surfaces dans la réduction de ruissellement et la capacité de stockage de l'eau. L'utilisation de surface herbeuse, de chaussée perméable en blocs de béton ou de chaussée grillagée par exemple serait donc égale pour s'adapter aux risques climatiques et atténuer les inondations et eaux de ruissellement (E. Gomez-Ullate et al., 2011; Chen, L.-M. et al., 2019; D. Ciriminna et al., 2022). Seule l'asphalte poreux aurait une réduction de ruissellement plus faible que les autres matériaux pouvant être utilisés et serait donc à éviter lors d'implantation de chaussée perméable (D. Ciriminna et al., 2022).

Ces zones perméables s'avèrent donc être une solution efficace pour l'atténuation des inondations urbaines puisqu'ils réduisent tous fortement le ruissellement par rapport à une zone urbanisée imperméable. Ce sont des solutions alternatives aux chaussées traditionnelles, même s'ils présentent certaines spécificités à prendre en compte comme la résistance mécanique réduite en raison de leur teneur élevée en vides ou la nécessité d'un entretien fréquent pour éviter le colmatage. Elles sont une solution alternative mais peuvent être associées à des infrastructures traditionnelles comme un drain pour aider à évacuer l'eau stockée ou alors elles pourraient être renforcées par du béton pour compenser le manque de résistance mécanique.

ii. Aménagement linéaire : Les noues et bandes enherbées

Nous allons maintenant nous intéresser aux noues et bandes enherbées. Comme énoncé plus haut (cf. 1.2.ii), ces aménagements sont linéaires et possèdent donc une longueur bien supérieure à leur profondeur et leur largeur. Les noues sont des canaux ouverts peu profonds, à fond plat et végétalisés conçus pour transporter, traiter et souvent atténuer le ruissellement des eaux de surface (figure 5). Les noues et bandes enherbées sont souvent utilisées pour drainer des routes, des parkings ou des chemins, elles sont conçues pour ralentir, recueillir et infiltrer partiellement les flux laminaires provenant de ces surfaces urbaines imperméables ou comme moyen de véhiculer les ruissellements en surface tout en valorisant des couloirs d'accès ou d'autres espaces ouverts. En macro drainage, elles assument le rôle de zones d'évacuation des crues. Ainsi, ces aménagements contribuent

considérablement à la réduction des débits de pointe et à la gestion des inondations dans les zones urbaines (C. Poletto et R. Tassi, 2012 ; B. Woods Ballard et al., 2015).



Figure 5 : Exemple de noue (B. Woods Ballard et al., 2015)

Le canal de noue standard est large et peu profond et couvert de végétation, généralement de l'herbe, pour ralentir l'eau - facilitant la sédimentation, la filtration à travers la zone racinaire et du sol, l'évapotranspiration et l'infiltration dans le sol sous-jacent. Yves Le Bissonnais et al. (2004) a montré qu'une largeur de bande enherbée de 6 m de large a permis une infiltration des eaux de ruissellement avec une efficacité moyenne de 80 %. De plus, la capacité d'infiltration maximale de la bande herbeuse a été estimée à env. 50 mm/h.

La sélection du couvert végétal peut avoir un impact sur l'efficacité des noues et des bandes enherbées. En effet, une sélection appropriée peut réduire jusqu'à 70 % le ruissellement des eaux pluviales à partir de 25,4 mm de pluie. L'herbe des prairies réduirait davantage le ruissellement que le gazon (A. Osouli et al., 2017). Cette même étude a montré que les sols de type sablonneux seraient plus efficaces en terme de réduction du volume de ruissellement que les sols argileux.

Enfin, B. Woods Ballard et al. (2015) explique que les noues peuvent être conçues de trois manières différentes (Annexes 1, 2, 3). La première manière est d'aménager une noue de transport, c'est un moyen particulièrement efficace pour collecter et acheminer les eaux de ruissellement de la zone drainée vers une autre étape de gestion des eaux. Ces noues sont généralement végétalisées et peu profondes. L'autre manière est l'utilisation de noue sèche, c'est un canal de transport végétalisé qui est conçu pour inclure un lit filtrant de sol préparé qui recouvre un système de drainage souterrain. Ce drain souterrain offre une capacité de traitement et de transport supplémentaire et empêche l'engorgement. L'utilisation d'un revêtement comme un géotextile peut être intéressant pour empêcher l'infiltration. Enfin, il y a la rigole humide qui est équivalente à la rigole de transport, mais est conçue spécifiquement pour créer des conditions humides et/ou marécageuses dans la base. Elle peut être utilisée lorsque les sites sont très plats et que les sols sont mal drainés pour fournir la fonctionnalité d'une zone humide. Dans tous les cas, ces noues peuvent inclure une variété de plantations. Les espèces végétales indigènes devraient normalement être

utilisées pour fournir une couverture végétale dense et durable qui crée un habitat approprié pour les espèces indigènes.

Nous avons donc vu que les noues végétalisées sont des NBS qui s'intègrent très bien dans les zones urbanisées et qu'elles permettent aux villes de s'adapter aux risques d'inondations et aux ruissellements de surface. Leurs conceptions peuvent être variées car elles dépendent du sol et du couvert végétal ainsi que l'emplacement de la noue. Ces aménagements peuvent, ici encore, être associés à des infrastructures d'ingénierie classique comme pour la noue sèche avec l'utilisation d'un drain souterrain.

I.4. Synthèse

Nous avons vu, à travers cette partie, que les NBS sont récentes et en pleine émergence. C'est un terme parapluie qui regroupe une large gamme d'infrastructures qui s'appuie sur les avantages que peuvent apporter la nature afin de répondre à des enjeux. Ces avantages rendus sont appelés services écosystémiques et peuvent être de nature différente (sanitaire, environnemental, social, économique etc..). Grâce à eux, les NBS sont efficaces pour faire face aux risques climatiques en ville car elles vont permettre d'atténuer le changement climatique mais surtout s'adapter aux risques qui en découlent.

En ce qui concerne la gestion de l'eau, les risques en villes vont être principalement le fort taux de ruissellement qui peut amener à de fortes inondations. Heureusement, il existe de nombreuses NBS ayant un rôle dans la gestion de l'eau. Ces dernières peuvent être classées par type d'aménagement, nous allons retrouver par exemple les milieux humides, les aménagements linéaires, les aménagements isolés etc.. Enfin nous avons montré techniquement comment les chaussées perméables et les noues végétalisées peuvent réduire considérablement la quantité d'eau qui ruisselle et qu'elles sont une solution alternative aux infrastructures grises. Malgré ça, la combinaison des NBS avec ces infrastructures grises sont possibles et peuvent se révéler intéressantes comme nous l'avons vu avec les chaussées perméables et la noue sèche.

Enfin, il est important de tenir compte de la position d'implémentation des NBS grâce aux caractéristiques de la région, s'il s'agit d'une région avec de fortes pentes par exemple. Cela induit le choix de l'utilisation de tel ou tel NBS. Ce choix doit donc être réfléchi en amont grâce à des méthodes que nous allons voir par la suite.

II. La méthodologie de mise en oeuvre des NBS

II.1. Les méthodes d'implémentation des NBS

Après ces présentations des différentes NBS, ainsi que de leur utilité dans les projets d'aménagement d'aujourd'hui et de demain, il convient d'expliquer comment celles-ci sont choisies. Il existe en effet un large panel de NBS, chacune avec une multitude de services écosystémiques rendus, il peut donc être difficile d'en sortir la solution parfaitement adéquate au projet. Il est entendu par là que celle-ci doit répondre aux enjeux dans le contexte dans lequel elle est implémentée. C'est-à-dire, d'une part, relever la problématique

pour laquelle elle est déployée, ce peut être la gestion des risques inondation par exemple. D'autre part, elle doit prendre en compte les enjeux locaux, tels que la dimension sociale, écologique ou encore économique. Enfin, la NBS se doit d'être viable financièrement, et ce sur le long terme.

Pour ce faire, il existe diverses méthodes. Quelques-unes d'entre elles seront présentées dans la suite de ce rapport, chacune ayant ses spécificités.

i. Evaluation des services écosystémiques

Pour commencer, le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) a mis au point une méthode d'évaluation des services écosystémiques rendus par les aménagements végétalisés de gestion des eaux pluviales. Celle-ci se base sur la méthode de Burkhard. Elle consiste en l'attribution d'une note, allant de 1 à 5, à chaque NBS (ici des couvertures terrestres) pour caractériser sa capacité à rendre un ensemble de services écosystémiques (figure 6). Cette méthode est à "dire d'experts", c'est-à-dire qu'elle repose sur le savoir et l'avis de spécialistes, et donc d'une certaine manière, celle-ci reste subjective. Néanmoins, elle a l'avantage d'être à moindre coût car elle n'engage par conséquent aucune campagne de mesures ou de relevés physico-chimiques (Cerema, 2020).

Services écosystémiques (SE)

Types d'occupation
des sols/habitats

	Ecological Integrity Σ								Provisioning services Σ										
	Abiotic heterogeneity	Biodiversity	Biotic waterflows	Metabolic efficiency	Exergy Capture (Radiation)	Reduction of Nutrient loss	Storage capacity (SOM)		Crops	Livestock	Fodder	Capture Fisheries	Acquaculture	Wild Foods	Timber	Wood Fuel	Energy (Biomass)	Biochemicals/Medicine	Freshwater
Continuous urban fabric	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Discontinuous urban fabric	7	1	1	1	1	1	1	3	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Industrial or commercial units	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Road and rail networks	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Port areas	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Airports	7	1	1	1	1	1	2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Mineral extraction sites	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dump sites	8	2	1	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Construction sites	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Green urban areas	18	3	3	2	1	4	3	2	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Sport and leisure facilities	16	2	2	2	1	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-irrigated arable land	22	3	2	3	4	5	1	4	21	5	5	5	0	0	0	0	5	1	0
Permanently irrigated land	21	3	2	5	2	5	1	3	18	5	5	2	0	0	0	0	5	1	0
Ricefields	20	3	2	5	1	5	1	3	7	5	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Vineyards	14	3	2	3	1	3	0	2	5	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Figure 6 : Extrait de la première matrice d'évaluation de la capacités des types de couverture terrestre à fournir des biens et des services écosystémiques (Cerema, 2020)

Cette matrice attribue deux notes : une note sur l'intégrité écologique (avec des paramètres tels que la biodiversité, la capture des micropolluants, etc.) ainsi qu'une note sur les services

d'approvisionnement comprenant l'ensemble des ressources fournies comme l'eau, le bois, ou encore les animaux. Des plantations de vignes, par exemple, obtiennent la note totale de 5 sur les services d'approvisionnement, car elles procurent des récoltes (noté 4 sur 5) et une quantité modérée de bois de chauffage (noté 1 sur 5).

La méthode du Cerema reprend ce principe, mais de façon adaptative en fonction du contexte du projet. Pour ce faire, deux matrices ont été créées, l'une utilisée pour dimensionner les nouveaux aménagements végétalisés, appelée "matrice théorique", visant à optimiser les services écosystémiques rendus par les futurs aménagements. La seconde, ayant pour but d'évaluer les services rendus par un aménagement existant et ainsi de l'améliorer, appelée "matrice spécifique". La matrice théorique est scindée en une matrice simplifiée et une matrice détaillée (figure 7).

Régulation des inondations et recharge de la ressource en eau souterraine					
Indicateurs Matrice simplifiée	Régulation des inondations			Recharge de la ressource en eau souterraine	
Indicateurs Matrice détaillée	Diminution de la vitesse de ruissellement des eaux pluviales	Diminution des volumes ruisselés par rétention et évapo-transpiration	Diminution du débit de points des eaux de ruissellement	Capacité de restitution des volumes collectés par infiltration	Réduction de l'utilisation d'eau potable du rejet en STEP grâce à la réutilisation de l'eau pluviale

Figure 7 : Exemples d'indicateurs pour la matrice théorique (Cerema, 2020)

Dans la conception d'un nouvel aménagement végétalisé, la matrice théorique aborde la multitude de services pouvant être rendus, ici le cas de la régulation des inondations et la recharge de la ressource en eau souterraine. Dans la matrice détaillée, ces deux services sont divisés en sous-actions : la diminution de la vitesse de ruissellement, des volumes ruisselés et du débit de points des eaux ruisselées faisant partie de la régulation des inondations. Cela permet une description précise des services rendus par les aménagements envisagés et ainsi de parfaitement cibler le type de NBS souhaité pour répondre à la problématique. Cette méthode peut être décomposée en 5 étapes principales (figure 8).

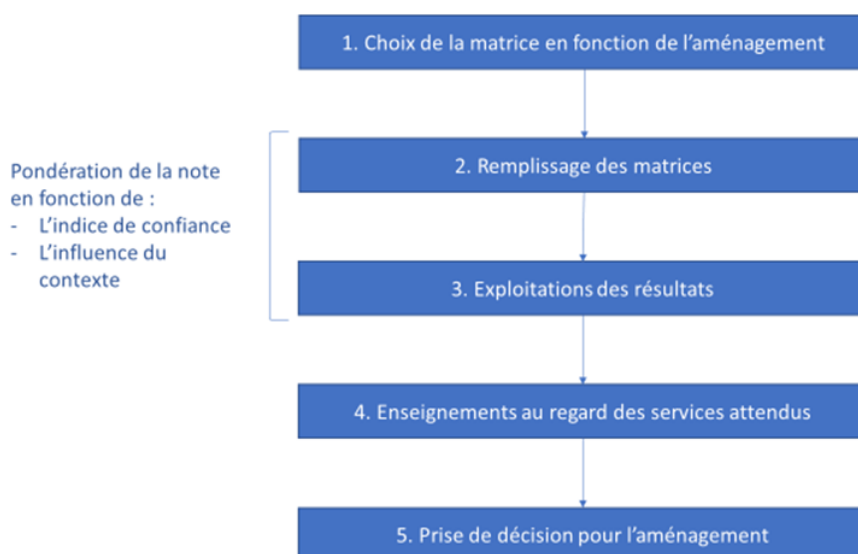


Figure 8 : Synthèse de la méthode du Cerema (Maxence Paris et Nathan Requillart, 2022)

A l'issue de ce travail de diagnostic, le rendu final s'établit sous la forme de graphiques, comme le montre l'exemple d'un diagramme radar récapitulant les notes des services rendus dans la régulation des macro-polluants, présenté ci-dessous (figure 9).

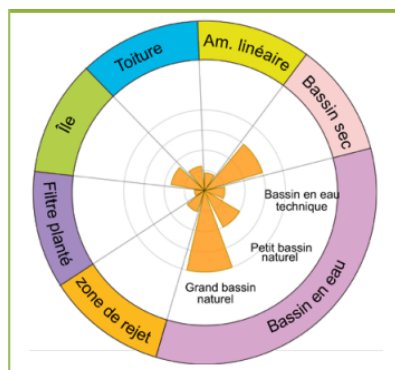


Figure 9 : Régulation des macro-polluants de l'eau (Cerema, 2020)

Cette première méthode de choix des NBS s'appuie directement sur les services écosystémiques rendus et permet de s'adapter au contexte local et aux enjeux. Elle prend en compte de manière très détaillée chacun des paramètres des services étudiés, comme il a été vu pour la problématique inondation. L'indice de confiance permet de s'affranchir en partie de la subjectivité de la méthode. De plus, elle promeut les bénéfices pouvant être tirés des NBS auprès des acteurs locaux, ce qui d'un point de vue politique est une excellente chose pour gagner la confiance des porteurs de projet en leur efficacité. Les rendus sous forme graphique permettent une communication facile et une bonne synthèse du diagnostic. En revanche, cela demande de produire ces synthèses pour chacun des aménagements futurs ou existants. De plus, l'analyse est portée sur les aménagements et pas sur une échelle plus globale.

ii. La cartographie

A l'instar de la méthode du Cerema, la méthode cartographique s'appuie elle aussi sur l'analyse des services écosystémiques rendus par les différentes infrastructures. Il existe plusieurs façons de concevoir des cartes pour répondre aux enjeux des risques climatiques. La méthode qui va suivre a été développée pour s'adapter aux changements climatiques dans les villes africaines, là où on retrouve, contrairement à ce qui peut être pensé, énormément de problématiques urbaines liées à ces changements. L'outil suivant a alors été développé, il se nomme UMT (*Urban Morphology Types*), traduit en "type de morphologie urbaine". Ces UMT sont la base d'un système de classification qui délimite des unités géographiques, distinguées par leurs processus biophysiques. Il s'agit en fait de diagnostiquer un territoire, ici à l'échelle de la ville, et d'y répertorier à l'aide de cartes les différentes unités spatiales fonctionnelles. Ce travail demande l'utilisation de données existantes, mais aussi de compléments issus d'un diagnostic de terrain, notamment pour des espaces verts isolés par exemple. Une série de paramètres liés à l'occupation du sol sont pris en compte dans la réalisation des cartes, comme le drainage ou encore les propriétés thermiques. Les paramètres liés à la population, l'accessibilité sont également importants (Sarah J. Lindley et al., 2015). Cela permet en outre de relier les activités humaines et les processus naturels afin de comprendre au mieux le territoire et ses enjeux.

Basiquement, le produit se présente sous la forme d'une carte d'occupation des sols (figure 10).

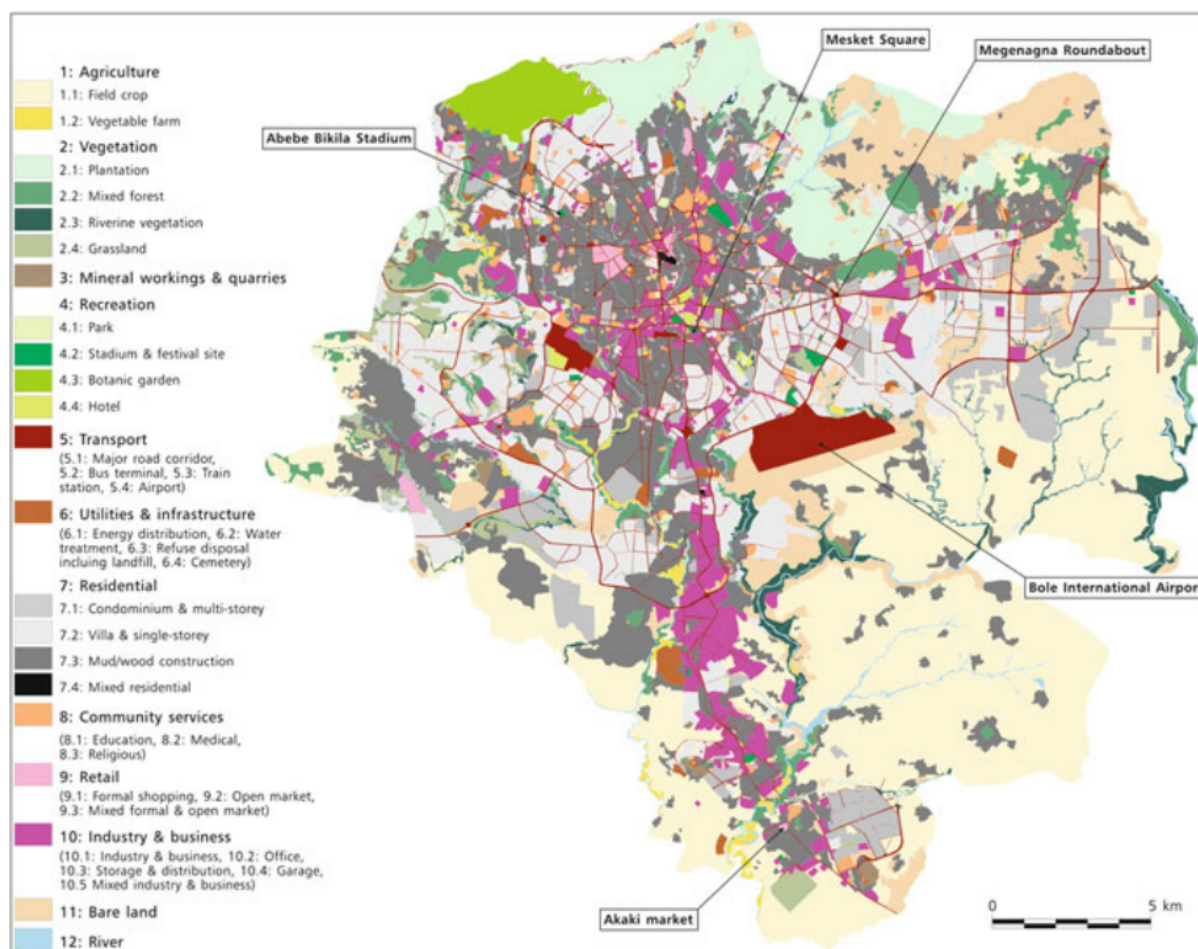


Figure 10 : Catégories et sous catégories d'UMT pour la ville d'Addis Abada (Sarah J. Lindley et al., 2015)

Sur cette carte (figure 10) sont distingués différents types d'occupation des sols (agriculture, transport, industrie, etc.). Chacune de ces catégories est sous divisée pour une description plus précise de la couverture. Cela permet de produire un ensemble de données très riche en termes de gammes de couvertures terrestres, et cela est d'autant plus intéressant puisqu'il s'agit d'un territoire urbain, bien plus morcelé qu'un territoire en contexte rural où l'agriculture domine. Connaître la nature du sol est un paramètre primordial pour calculer le coefficient de ruissellement dans la planification des risques inondations.

Cette donnée seule ne suffit pas, elle est par la suite exploitée de façon à faire l'état des services écosystémiques pour chaque ville. L'évaluation se fait sur la base de preuves scientifiques et de l'expérience locale. Les cartes d'occupation des sols sont croisées avec les cartes d'évapotranspiration, de couverture d'arbres, etc. Finalement, un tableau est utilisé pour synthétiser les résultats (figure 11).

Service		Addis	Dar	Saint Louis
Provisioning	Food	X	X	X
	Wood (non-fuel wood) and fibre	X		
	Water (irrigation)	X	X	X
	Fuel	X	X	X
	Fresh water (drinking)	X		X
	Medicinal resources	X		X
	Ornamental resources			X
Regulating	Temperature control – shade	X	X	
	Temperature control – evaporative cooling	X	X	
	Temperature control – cool/fresh air corridors	X		
	Carbon sequestration and storage	X	X	X
	Flood – urban surface water regulation	X	X	X
	Flood – river	X		X
	Erosion regulation (non-coastal)		X	X
	Water purification/waste treatment			X
	Coastal erosion regulation			X
Cultural	Recreation	X	X	X
	Livelihoods		X	X
	Tourism		X	X
	Spiritual/religious values			X
	Educational			X
	Aesthetics and inspiration			X
	Heritage and sense of place			X
	Psychological/other aspects of health/wellbeing			X
Supporting	Species habitats	X	X	X
	Maintaining genetic diversity			X
TOTAL number of ecosystem services considered		14	12	22

Figure 11 : Services écosystémiques rendus par 3 des 5 villes africaines étudiées (Sarah J. Lindley et al., 2015)

Les services écosystémiques sont divisés en plusieurs catégories (figure 11) :

- approvisionnement (nourriture, ressource énergétique, ressource en eau, etc.)
- régulation (séquestration carbone, inondations, etc.)
- culturel (bien être, éducation, etc.)
- support (habitats, support de biodiversité).

Le total des services rendus est alors calculé pour chaque ville. Enfin, une note est donnée suivant la capacité de chaque unité spatiale à rendre un service écosystémique, mais aussi suivant son besoin à recevoir ce service. Cela sert d'outil dans la planification urbaine, en identifiant les forces mais aussi les lacunes de chaque ville en termes de services rendus.

Cette méthode s'apparente à la précédente car elle demande un diagnostic des services écosystémiques. L'évaluation se fait dans les deux cas par "dire d'experts", et prend en compte le contexte local, même si celle-ci demande des coûts financiers plus importants. Néanmoins, la méthode cartographique par UMT à l'avantage de spécialiser les services écosystémiques, et ce à une échelle plus grande, là où la méthode du Cerema se focalise sur des aménagements. De plus, un grand nombre de données sont ici croisées, notamment sur l'hydrologie de la zone. La méthode cartographique permet une approche globale et donc une planification à l'échelle de la ville, tandis que la précédente serait plutôt utilisée pour une planification très ponctuelle.

iii. La méthode ATP/AP

La méthode des “*Adaptive Tipping Points*” ou “*Adaptive Pathways*” (littéralement voies d’adaptatives) est principalement utilisée dans le cadre d’aménagements d’infrastructures vertes et bleues. L’exemple utilisé est la gestion du risque inondation en contexte urbain. Il s’agit contrairement aux précédentes d’une modélisation. Sa logique intègre des infrastructures de drainage grises et vertes/bleues, c’est-à-dire des infrastructures d’ingénierie civile classique et des solutions basées sur la nature.

La modélisation est d’abord hydraulique et s’appuie sur le logiciel *Storm Water Management Model* qui est un outil dynamique de ruissellement des pluies. A l’aide des données publiques de la compagnie des eaux et des autorités chargées des inondations, il permet de simuler les événements ponctuels et d’évaluer les ruissellements qui en résultent. Le ruissellement est alors implémenté dans le réseau de drainage existant et des ajustements de paramètres exhibent la réactivité du système en fonction des solutions envisagées. Car ces solutions sont préalablement implémentées pour être évaluées. Le modèle permet de reproduire fidèlement les épisodes d’inondations historiques, pour coller au mieux à la réalité (Leon Kapetas and Richard Fenner, 2020).

Pour comprendre le fonctionnement de cette méthode, un exemple est utilisé. Il s’agit d’une étude menée sur un sous bassin versant en Angleterre, en contexte urbain, découpé en 5 zones de drainage. Les paramètres pris en compte sont les données pluviométriques, les coefficients de ruissellement et d’échelle de précipitation, les données LIDAR, le réseau d’eaux usées, les classes de sol ainsi que les systèmes de drainages durables (comme les bassins de rétention par exemple).

Quatre solutions sont évaluées :

- Les cellules de biorétention (BCs), considérées comme infrastructures bleues/vertes.
- Les systèmes de drainage durables (SuDS), considérés comme infrastructures bleues/vertes.
- Les chaussées perméables (PPs), considérées comme infrastructures bleues/vertes.
- L’extension du réseau de drainage existant, considéré comme infrastructure grise.

Une modélisation hydraulique est alors effectuée selon la méthodologie explicitée plus tôt.

Tel qu’il a été exposé précédemment dans ce rapport, la clef de l’adaptation aux risques climatiques en ville semble résider dans la capacité à combiner l’ingénierie civile et les infrastructures vertes et bleues, fondées sur la nature. Et c’est justement le fondement de cette méthode qui évalue la viabilité des combinaisons possibles des solutions proposées, et ce dans le temps. Cette méthodologie, appelée méthode des “*Adaptations Tipping Points*” soit ATP, ou encore “*Adaptation Pathways*”, soit AP, utilise la modélisation hydraulique et propose un schéma de synthèse montrant les chemins possibles d’adaptation (figure 12).

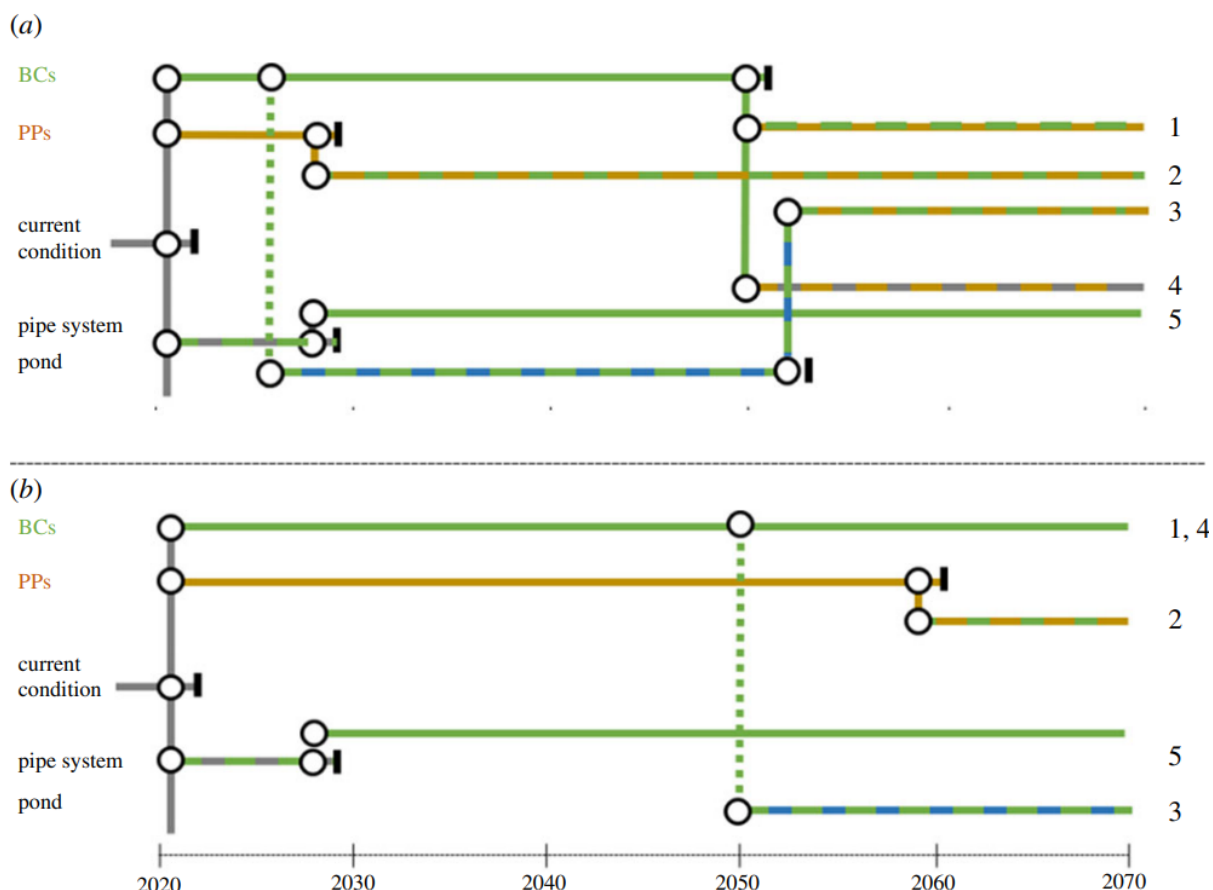


Figure 12 : Résultats de la méthode ATP pour l'étude exemple (Leon Kapetas and Richard Fenner, 2020)

Sur ce schéma (figure 12), cinq chemins sont visibles, dans deux scénarios différents (a et b). Le scénario "a" correspond à un scénario de hautes émissions de GES (cas plus critique où le temps entre chaque adaptation est plus court), le "b" correspond à un scénario plus modéré. L'intérêt est plutôt porté sur le premier scénario. Chaque chemin correspond à une combinaison de solutions, envisagée pour répondre à la problématique. La période d'évaluation s'étend sur 50 ans, de 2020 à 2070. Les "tipping points", identifiés par les ronds suivis d'une barre noire, correspondent à la fin de viabilité d'une solution. A chaque point de rupture, une combinaison est ajoutée pour prendre le relais de la solution à remplacer. Prenons l'exemple du chemin numéro 1 dans le scénario "a". Les cellules de biorétention assurent leur rôle de régulation des inondations jusqu'en 2050, là, un point de rupture est rencontré, ce qui signifie qu'elles ne suffisent plus, leurs performances sont dégradées. Alors, une combinaison avec les chaussées perméables est envisagée pour suffire à la régulation des inondations jusqu'en 2070.

Une fois que les voies d'adaptation viables ont pu être identifiées, il s'agit maintenant d'évaluer les coûts de chaque aménagement.

Finalement, cette méthode peut être résumée en quatre grandes étapes (figure 13).

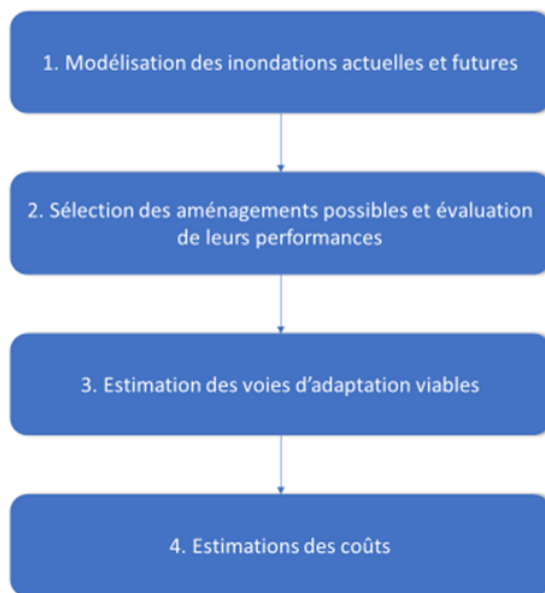


Figure 13 : Étapes de la modélisation (Maxence Paris et Nathan Requillart, 2022)

Cette méthode reprend les avantages de la précédente car elle permet une approche à une échelle plus globale, ici à l'échelle d'un sous bassin versant. Elle spatialise également les solutions envisagées, mais va encore plus loin. En effet, celle-ci a une approche combinatoire des infrastructures, en associant de l'ingénierie civile à des solutions fondées sur la nature. Elle permet également une réponse adaptative, en prenant en compte différents scénarios. L'approche vise à intégrer la flexibilité dans la stratégie d'adaptation globale (plutôt que dans les actions individuelles), les actions sont échelonnées dans le temps de manière à ce que le système s'adapte à l'évolution du climat, des conditions sociales, économiques, etc. Les options restent ouvertes pour faire face à une série de conditions futures plausibles. Il est aussi important de noter que les coûts sont pris en compte en plus des services rendus et des performances. Le coût d'une telle méthode reste néanmoins plus élevé que les précédentes.

iv. Synthèse

Afin de résumer les propriétés des méthodes présentées, et d'en comprendre les spécificités, le tableau de synthèse suivant vous est proposé (tableau 2) :

Tableau 2 : Forces et faibles des techniques de mise en place des NBS (Maxence Paris et Nathan Requillart, 2022)

	Forces	Faiblesses
Evaluation des SE par aménagement (méthode du Cerema)	<ul style="list-style-type: none"> • Peu coûteux • Utile pour la planification à petite échelle • Évaluation précise des SE rendus 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu adapté pour la planification à grande échelle • Pas de combinaison d'infrastructures • Méthode à « dire d'experts »
Evaluation cartographique des SE	<ul style="list-style-type: none"> • Coût modéré • Permet une planification à l'échelle de la ville • Spatialise les NBS 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de combinaison d'infrastructures • Méthode à « dire d'experts »
Modélisation (méthode ATP/AP)	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation précise des inondations futures • Planification à l'échelle de la ville • Spatialisation des NBS • Combinaisons d'infrastructures grises et bleues/vertes • Modèle dynamique : adaptation • Évaluation des coûts et des performances 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé

Ces méthodes sont à utiliser dans des contextes différents, et pour des demandes différentes, l'ATP sera très utile pour la gestion du risque inondation, à l'échelle de la ville, et permet des combinaisons avec les infrastructures grises déjà en place. La cartographie permet d'identifier les lacunes d'un territoire, et ainsi de prévoir le développement de NBS là où leurs services écosystémiques seront importants. Enfin, la méthode du Cerema intervient en dernière si elle devait être utilisée avec l'une des précédentes, car elle donne l'opportunité de choisir la NBS végétale la plus adaptée au contexte local pour lequel elle serait étudiée.

II.2. Des méthodes de planification adaptatives pour la gestion de l'eau

Dans un contexte où la volonté est d'intégrer au mieux le concept de développement durable dans les aménagements, il a été démontré l'intérêt des NBS grâce à leurs co-bénéfices. Il a également été vu précédemment différentes méthodes de choix de NBS, telle que la méthode cartographique, qui apporte une dimension de planification à l'échelle de la ville. L'ATP quant à elle nous a instruit sur l'importance de prendre en compte le temps dans cette planification. C'est pourquoi, au-delà de la définition de développement durable, qui joint les objectifs économique, environnemental et social, aujourd'hui et dans le futur, les décisionnaires doivent adopter des plans qui se voient robustes dans le temps, pour pouvoir faire face aux changements climatiques, et surtout la grande variété de changements

possibles. C'est le défi de la planification notamment face au risque inondation et de la gestion de l'eau. Cela est vrai pour trois raisons : la première est que toutes les incertitudes ne peuvent pas être relevées. Ensuite, ignorer ces incertitudes limite la possibilité d'action corrective dans le futur, et mène à des situations qui auraient pu être évitées. Enfin, ignorer ces incertitudes peut faire manquer des opportunités et mener à des plans non durables.

Il y aurait quatre façons de concevoir un plan durable :

- La résistance : plan conçu pour le pire des futurs. Cependant cette méthode est très coûteuse et ne peut tout de même pas prendre en compte les événements appelés "Black Swans", correspondant à des événements imprédictibles et aux conséquences très lourdes, rendant le plan inefficace.
- La résilience : plan qui permet un rétablissement rapide face aux perturbations, qui laisse donc une liberté, la possibilité qu'un dysfonctionnement arrive. Néanmoins, les objectifs sont alors trop mis de côté.
- La robustesse statique : un grand ensemble de conditions sont prises en compte, et la méthode vise à réduire les vulnérabilités du plan dans toutes ces conditions.
- La robustesse dynamique : il s'agit d'une méthode similaire à la précédente, à la différence que celle-ci va permettre au plan de s'adapter aux conditions qui viendraient à changer. Ce concept sera le plus utilisé dans l'élaboration des méthodes de planification adaptative, et certaines d'entre elles seront détaillées par la suite (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013).

Il est important ici de resituer le sujet, qui est l'adaptation aux risques climatiques en ville grâce aux NBS. Il a été vu l'utilité des NBS pour s'adapter face au risque inondation notamment. Mais au-delà de cela, il est intéressant non pas seulement de voir en quoi chaque NBS permet de s'adapter, mais aussi comment une planification peut être adaptative face au changement climatique lié à la gestion de l'eau et des inondations en ville. Les méthodes détaillées dans cette partie sont des outils de prise de décisions. Elles servent à une meilleure anticipation financière et appuient des parti-pris politiques. Elles peuvent être utilisées dans le cadre d'aménagements ou de plans de gestion faisant intervenir uniquement des infrastructures grises, tout comme elles peuvent intégrer la combinaison avec les NBS (exemple de la méthode ATP/AP).

i. Assumption-based planning (ABP)

Cet outil est utilisé pour améliorer l'adaptativité et la robustesse des plans déjà existants, et non pas pour en créer. Il veut littéralement dire "Planification basé sur des hypothèses" et permet de créer un plan plus résistant aux changements significatifs et savoir quand l'adapter.

Les hypothèses se basent sur une série d'événements plausibles, 3 types d'hypothèses sont imaginés :

- Les hypothèses sur lesquelles le plan repose le plus (appelée "*load-bearing assumptions*"),
- les hypothèses susceptibles d'être mises en défaut par des événements futurs,
- les hypothèses regroupant ces deux caractéristiques, qui sont donc les plus à risque.

Les événements néfastes risquant de se produire sont la raison pour laquelle de telles méthodes de planification sont imaginées, lorsque l'un d'entre eux survient et met en péril une ou plusieurs hypothèses (hypothèses qui sont les fondements de cette planification), celui-ci est immédiatement identifié, c'est le "*signpost*". Cela revient finalement à identifier les vulnérabilités du plan (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013).

Dans le cas où un événement se produit, cette méthode prévoit deux types d'actions à mettre en oeuvre suivant la nature du risque :

- La "*shaping action*", qui est là pour faire face à cet événement et corriger.
- La "*hedging action*" est là en secours, au cas où la première aurait échoué.

Cette méthode peut être résumée de la manière suivante (figure 14) :

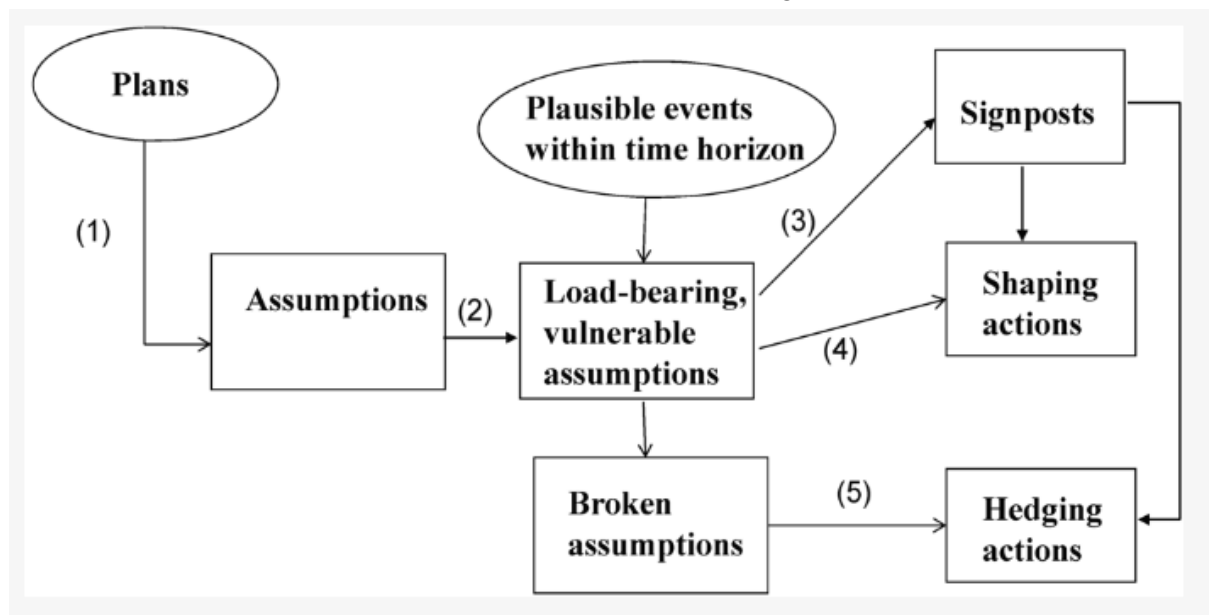


Figure 14 : Les 5 étapes de l'ABP (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013)

Premièrement, le plan et ses hypothèses sont établis (1 et 2), en cours de déroulement, les événements à risque sont identifiés (3) et les actions correctives entrent en jeu pour pallier la menace (4 et 5).

Cette méthode a notamment été utilisée dans le domaine de l'assainissement et de l'approvisionnement en eau potable. Elle sera par la suite remaniée afin d'y intégrer la gestion.

ii. Adaptive policy making (APM)

Cette deuxième méthode, qui permet de produire des plans robustes dynamiques, reprend les éléments de la précédente, mais de manière plus complète, en intégrant la gestion sur le long-terme malgré les incertitudes. Elle s'exerce en deux phases, la première consistant en la création du plan d'adaptation dynamique, du programme de surveillance et des diverses actions préalables et postérieures à la mise en œuvre. La seconde est la phase de mise en œuvre, c'est là que le plan et le programme de surveillance sont appliqués, et les actions d'adaptation sont prises, si nécessaire. Le processus n'est pas forcément linéaire, puisque la

surveillance est continue et peut conduire à différentes actions prises à divers moments dans le temps (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013) (figure 15).

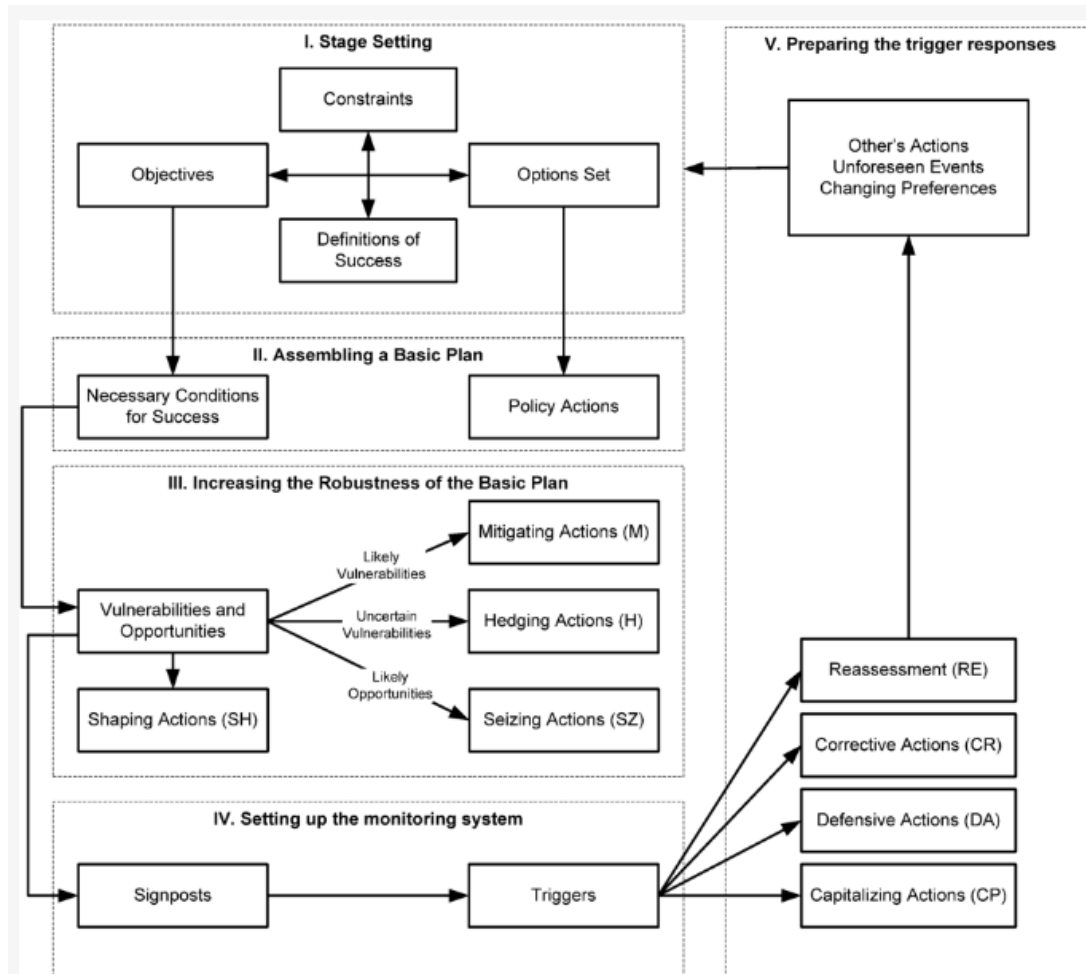


Figure 15 : Les étapes de l'APM (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013)

Ici, comme pour la méthode ABP, il existe cinq grandes étapes :

- étape 1 = les conditions de départ et objectifs
- étape 2 = la manière dont ces objectifs doivent être atteints est précisée par l'élaboration d'un plan de base
- étape 3 = le plan de base est rendu plus robuste (augmentation des chances d'achever les objectifs) grâce à 4 types d'action :
 - "mitigating actions" = réduire les effets négatifs probables
 - "hedging actions" = répartir ou réduire les effets négatifs incertains
 - "seizing actions" = saisir les opportunités disponibles probables
 - "shaping actions" = réduire l'échec ou améliorer le succès
- étape 4 = la planification d'urgence. Les indicateurs (*signposts*) précisent les informations qui doivent être suivies afin de déterminer si le plan remplit les conditions de sa réussite. En outre, les valeurs critiques des "signpost" (*triggers*) au-delà desquelles des actions supplémentaires doivent être mises en œuvre sont spécifiées
- étape 5 = 4 différents types d'actions peuvent être déclenchés :

- les actions défensives = prises pour préserver ses avantages sans modification du plan de base
- les actions correctives = ajustements au plan de base
- les actions de capitalisation = tirer parti des opportunités qui peuvent améliorer les performances du plan de base
- réévaluation du plan = initiée lorsque l'analyse et les hypothèses essentielles à la réussite du plan ont perdu leur validité

Cette méthode est utilisée pour la gestion du risque inondation en ville à cause du changement climatique. Elle est également utilisée aux Pays-Bas pour l'évaluation des risques de sécheresse, dans le cadre du "*Dutch Delta Programme*". Ceux-ci ont couplé des modèles hydrologiques avec des fonctions d'impact socio-économique pour calculer les coûts financiers des impacts de la pénurie d'eau. Celle-ci est induite par la sécheresse et ce pour : l'agriculture, la navigation, la production d'eau potable, l'utilisation d'eau industrielle, l'approvisionnement en eau urbaine, la qualité de l'eau et l'affaissement du sol. Cela a permis aux scientifiques de quantifier la façon dont les risques de sécheresse évolueront dans le cadre de divers scénarios futurs et dans quelle mesure les actions politiques proposées sont capables de réduire le risque à un coût acceptable (Marjolein J. P. Mens et al., 2022).

Finalement, il s'agit d'une amélioration de l'ABP, puisqu'elle étend sa portée jusqu'à la gestion du plan au-delà de la logique de préservation.

iii. Adaptation Tipping Points and Adaptation Pathways (ATP et AP)

La méthode suivante a déjà été présentée précédemment, celle-ci introduit une nouvelle dimension dans la planification puisqu'elle prend en compte la possibilité d'évolution des conditions dans le temps. ATP et AP ont été développés pour les Pays-Bas pour la gestion de l'eau, et pour répondre à de nouveaux scénarios de changements climatiques. Les acteurs souhaitaient une méthode qui soit moins dépendante des conditions initiales (conditions au moment de l'élaboration du plan). Alors, une nouvelle façon de penser émerge : on préfère se demander "sous quelles conditions tel plan échoue ?" plutôt que "que se passe-t-il si tel scénario se produit ?" (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013) (figure 16).

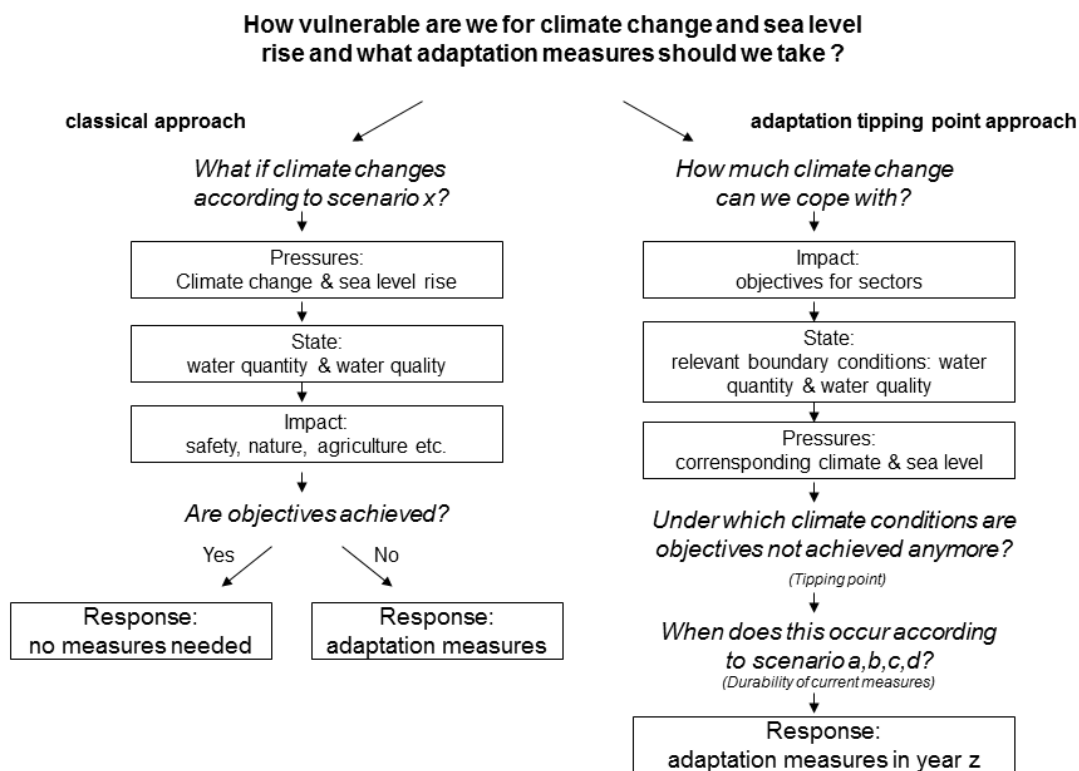


Figure 16 : Comparaison des approches de planification classiques avec l'ATP (Jaap C. J.Kwadijk et al., 2010)

Dans les autres stratégies, des changements peuvent faire échouer le plan, et il est impossible de savoir quand celui-ci aura lieu. Alors, grâce à l'ATP, lorsque de nouveaux scénarios climatiques sont présentés, seul le calendrier des actions nécessaires pour protéger le plan contre l'échec doit être mis à jour (figure 16). L'AP échelonne la mise en œuvre des actions dans le temps, de manière à ce que le système s'adapte à l'évolution du climat, des conditions sociales, économiques, etc..

Elle peut être représentée sous la forme d'une carte conceptuelle (figure 17) avec des chemins correspondant à des combinaisons de solutions (combinaisons de NBS par exemple) et des points de ruptures correspondant à la fin de viabilité de la combinaison (voir partie II.1.iii.).

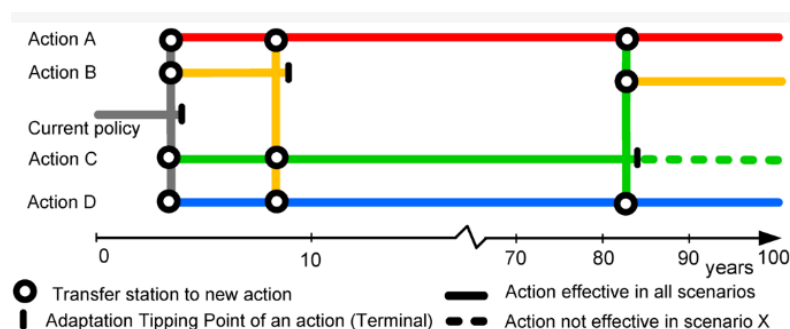


Figure 17 : Schéma conceptuel de la méthode AP (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013)

Comme il peut être observé sur le schéma (figure 17), l'AP permet une projection sur près d'un siècle et il est possible de trouver des combinaisons viables sur toute cette période.

Cette méthode est utilisée pour la gestion de l'eau et du risque inondation. Elle fut utile aux Pays-Bas en 2011, à Rotterdam, pour la restauration du bassin du Rhin, la gestion de risque en Nouvelle-Zélande ou encore la gestion de risque dans le bassin de l'Elbe en Allemagne.

Puisqu'il s'agit d'une méthode qui s'affranchit presque totalement des conditions initiales, elle passe outre les besoins de robustesse par rapport aux précédentes. La planification est réfléchie de manière plus globale, plutôt que se reposant uniquement sur des actions individuelles. Aussi, c'est la seule qui jusqu'à maintenant énonce clairement la possibilité de combinaisons de NBS.

iv. L'aboutissement : Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP)

Cette dernière méthode combine l'APM et l'ATP/AP. En effet, elle reprend le concept des chemins adaptatifs, tout en proposant des actions correctives selon les 4 types vus auparavant. Sur ce point, cela en fait la méthode la plus complète, et assure qu'elle permette la combinaison de NBS (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013). Celle-ci peut être représentée ainsi (figure 18) :

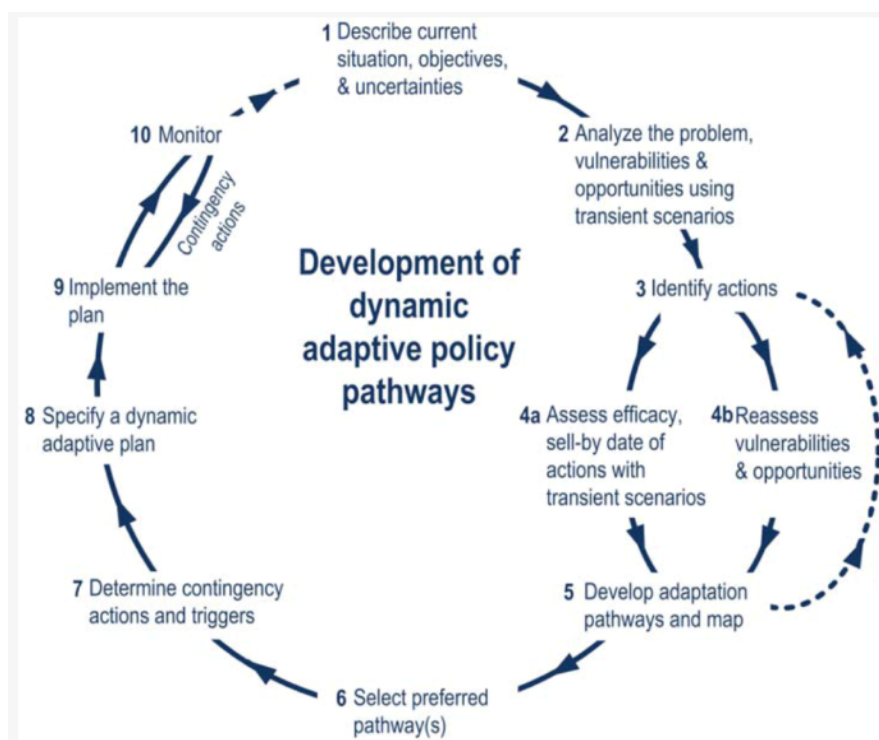


Figure 18 : Les étapes de la DAPP (Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., 2013)

Les quatre premières étapes reprennent le principe de l'établissement des conditions initiales et de l'implémentation d'actions correctives (issu de la méthode ABP et de l'APM). Ensuite, les chemins de combinaisons d'infrastructures, solutions grises et NBS, sont conçus, en se basant sur la méthode AP. Enfin, la gestion est également prise en compte, de la même façon que l'APM l'a conçue. Ce fut la DAPP qui a été utilisée pour le Delta du Rhin aux Pays-Bas.

II.3 Bilan

Chaque NBS a ses propriétés et il existe une multitude de services écosystémiques différents. Face au risque climatique en ville, il peut donc être difficile de faire un choix de la solution la plus adaptée, d'un point de vue fonctionnel mais aussi financier. C'est là qu'interviennent les différentes méthodes d'implémentation. La première, qui évalue les services écosystémiques rendus par les infrastructures végétalisées, est adaptée à un contexte local. La cartographie, quant à elle, reprend le principe d'évaluation des SE sur une échelle plus large et permet une planification. C'est ce concept de planification qui est important pour comprendre en quoi, en plus de leurs fonctions et SE, les NBS permettent-elles de s'adapter. Cette dimension est apportée par la méthode ATP/AP, qui implique l'échelle de temps dans la planification et l'évolution des conditions au cours de celui-ci. Elle montre l'importance de la combinaison des NBS entre elles pour permettre à un plan d'être durable, sans quoi celui-ci viendrait échouer.

Outre la méthode ATP/AP, il existe d'autres outils de planification dont celle-ci s'inspire, mais également qu'elle a pu inspirer. En effet, celle-ci repose d'abord sur un des quatre concepts possibles dans la création d'un plan durable : la robustesse dynamique. Cela induit une viabilité du plan dans le temps en termes d'objectifs à accomplir, ce qui en fait un plan parfaitement adaptatif. Cela a permis d'imaginer en plus de la méthode des chemins adaptatifs, les méthodes de l'ABP et l'APM qui introduisent les types d'actions à mettre en place ainsi que la gestion du plan. La DAPP est finalement une réutilisation des grands principes de ces trois méthodes. Avoir un regard sur ces méthodes a permis de comprendre comment concevoir un plan durable et adaptatif, en plus de connaître en quoi les NBS permettent de s'adapter au risque inondation.

Conclusion

La question se pose quant à l'utilité des NBS face aux solutions d'ingénierie classique; qui s'avèrent efficaces dans la gestion de l'eau et des risques d'inondation en ville. L'intérêt des solutions fondées sur la nature réside dans leur capacité à fournir des services écosystémiques, en plus de leur fonction principale. Les NBS ont prouvé leur efficacité en termes de gestion de l'eau à la suite d'études, elles vont notamment réduire le pic de crue grâce à leur capacité à infiltrer l'eau ou à la stocker en surface. De plus, elles apportent d'autres bénéfices, ces co-bénéfices sont très variés, allant de l'amélioration du cadre de vie, en passant par le regain de biodiversité, jusqu'à la captation de carbone. Étant donné cette multitude de services rendant leur choix complexe, des outils d'aide à la planification ont été créés. Certains distinguent les NBS entre elles par les services qu'elles peuvent rendre, d'autres optent pour une analyse plus globale en étudiant les services rendus à l'échelle d'une ville. Dans les deux cas, ces méthodes permettent d'affirmer des choix en termes de NBS à utiliser. Cependant, d'autres méthodes vont encore plus loin et permettent d'élaborer une planification réellement adaptative aux changements climatiques et à la gestion de l'eau et du risque inondation en ville. Le principe le plus abouti, que l'on retrouve dans les deux dernières méthodologies présentées, qui est l'utilisation des voies adaptatives, renseigne sur l'importance de combiner les solutions entre elles pour une planification durable. Cela incombe l'association de NBS, vertes et bleues, entre elles mais aussi avec l'ingénierie classique.

Bibliographie

Abbot, C. L. & Comino-Mateos, L. 2003. In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management*, v.17, n.3, p. 187–90.

Alberto P. et al., nature-based solutions for urban water management in : Paracchini, M. L., Zingari, P. C., & Blasi, C. (2018). *Reconnecting natural and cultural capital. Contributions from science and policy*. Bruxelles: Commissione Europea

Dagmar Haase, Urban Wetlands and Riparian Forests as a Nature-Based Solution for Climate Change Adaptation in Cities and Their Surroundings. In N. Kabisch et al. (eds.), *Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas, Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*, 2017, DOI 10.1007/978-3-319-56091-5_7

Cerema, *Méthode d'évaluation des services écosystémiques rendus par les aménagements végétalisés de gestion des eaux pluviales*, fiche n°1, juillet 2020, PDF.

Chen, L.-M.; Chen, J.-W.; Chen, T.-H.; Lecher, T.; Davidson, P.C. Measurement of Permeability and Comparison of Pavements. *Water* 2019, 11, 444. <https://doi.org/10.3390/w11030444>

Ciriminna, D.; Ferreri, G.B.; Noto, L.V.; Celauro, C. Numerical Comparison of the Hydrological Response of Different Permeable Pavements in Urban Area. *Sustainability* 2022, 14, 5704. <https://doi.org/10.3390/su14095704>

Cristiano Poleto and Rutinéia Tassi (2012). *Sustainable Urban Drainage Systems*, Drainage Systems, Prof. Muhammad Salik Javaid (Ed.), ISBN: 978-953-51-0243-4, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/drainage-systems/sustainable-drainage-systems>

Eggermont et al., 2015, *Nature-Based Solutions : New Influence for Environmental Management and Research in Europe*. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society 24(4) : 243-48 : doi : 10.14512/gaia.24.4.9.

Gomez-Ullate, E.; Castillo-Lopez, E.; Castro-Fresno, D.; Bayon, J.R. Analysis and contrast of different pervious pavements for management of storm-water in a parking area in Northern Spain. *Water Resour. Manag.* 2011, 25, 1525–1535.

Jaap C. J. Kwadijk et al., *Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands*, © John Wiley & Son s, Ltd., 2010, pages 728-740, DOI : 10.1002/wcc.64

Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2017). *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: Linkages between science, policy and practice*. Springer Nature

Leon Kapetas and Richard Fenner, *Integrating blue-green and grey infrastructure through an adaptation pathways approach to surface water flooding*, © The Royal Society Publishing, 2020, 22 pages, PDF.

Marjolein J. P. Mens et al., *Integrated drought risk assessment to support adaptive policymaking in the Netherlands*, © Author(s) This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License, 2022, DOI : 10.5194/nhess-22-1763-2022.

Osouli, A.; Bloorchian, A.A.; Grinter, M.; Alborzi, A.; Marlow, S.L.; Ahiablame, L.; Zhou, J. Performance and Cost Perspective in Selecting BMPs for Linear Projects. *Water* 2017, 9, 302. <https://doi.org/10.3390/w9050302>

Pauleit, S. et al.. (2017). Nature-Based Solutions and Climate Change – Four Shades of Green. In: Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., Bonn, A. (eds) *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_3

Sarah J. Lindley et al., *Chapter 4 Green Infrastructure for Climate Adaptation in African Cities*, © Springer International Publishing Switzerland, 2015, pages 107 à 152, DOI : 10.1007/978-3-319-03982-4_4, PDF.

Schweitzer J. P. et al., Investing in nature for well-being in the city In : Paracchini, M. L., Zingari, P. C., & Blasi, C. (2018). *Reconnecting natural and cultural capital. Contributions from science and policy*. Bruxelles: Commissione Europea

T. V. Ramachandra, N. Nagar, S. Vinay and B. H. Aithal, "Modelling hydrologic regime of Lakshmanatirtha watershed, Cauvery river," 2014 IEEE Global Humanitarian Technology Conference - South Asia Satellite (GHTC-SAS), Trivandrum, India, 2014, pp. 64-71, doi: 10.1109/GHTC-SAS.2014.6967560.

Walker WE, Haasnoot M et Kwakkel JH., *Adapt or perish: a review of planning approaches for adaptation under deep uncertainty*. *Sustainability* 5, 2013, pages 955–979, DOI : 10.3390/su5030955.

Woods Ballard, B. et al., *The SuDS Manual* (2015). The SUDS manual. Chap. 17, p. 313-330. London: Ciria. Disponible sur : https://www.ciria.org/Memberships/The_SuDs_Manual_C753_Chapters.aspx (19/01/2023)

Yaella Depietri et Timon Mcphearson, *Integrating the Grey, Green, and Blue in Cities: Nature-Based Solutions for Climate Change Adaptation and Risk Reduction*. In N. Kabisch et al. (eds.), *Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas, Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*, 2017, DOI 10.1007/978-3-319-56091-5_6

Yves Le Bissonnais, Véronique Lecomte, Olivier Cerdan. Grass strip effects on runoff and soil loss. *Agronomie*, 2004, 24 (3), pp.129-136. (10.1051/agro:2004010). (hal-00886045)

UICN, 2016, *Nature-based Solutions to address global societal challenges*, [en ligne] disponible sur : <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf>

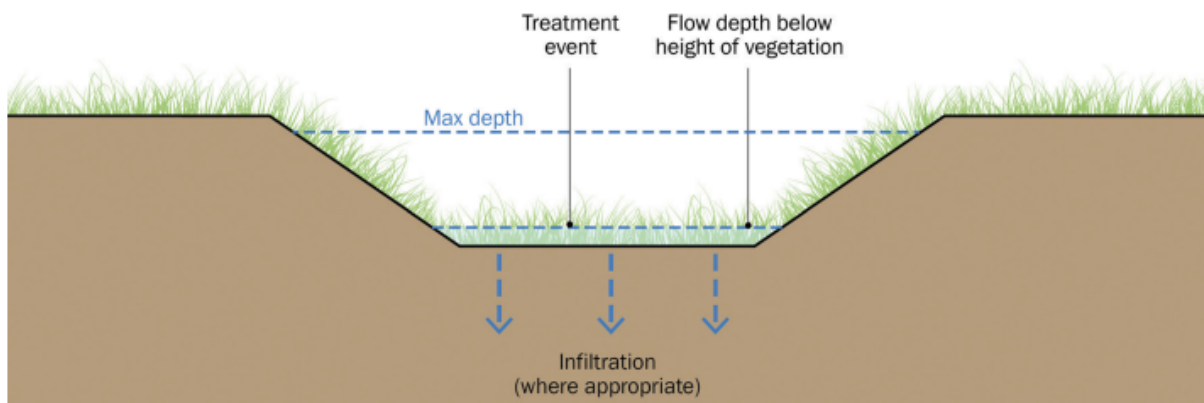
Le site du CNRS [en ligne], disponible sur :

<https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/mesurer-la-pollution-des-villes-pour-mieux-orienter-leurs-politiques> consulté le 02/03/2022

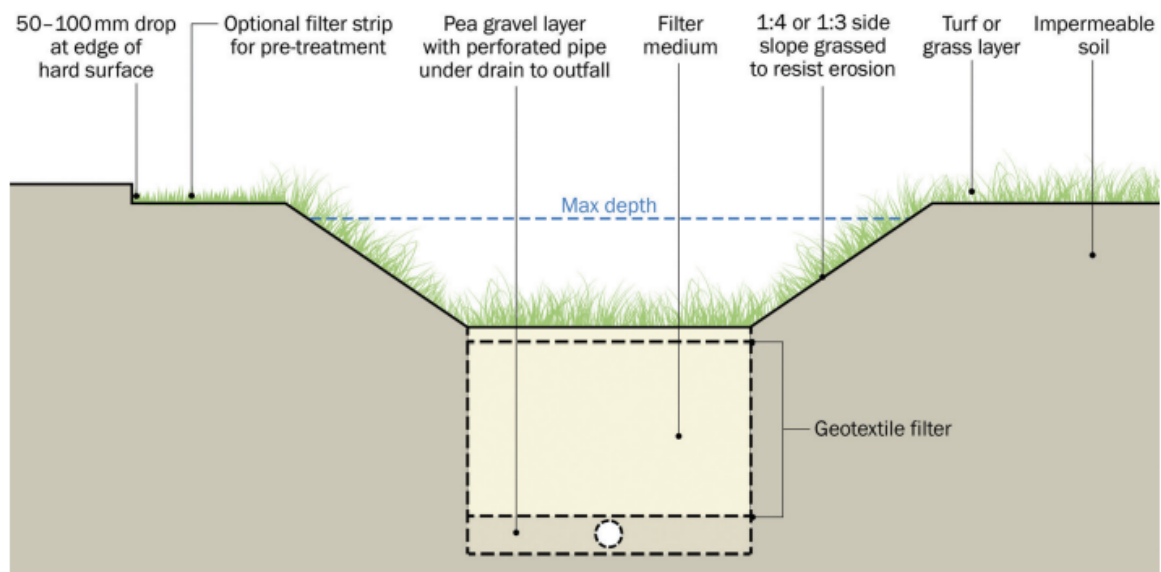
Le site du ministère de l'agriculture et de l'environnement [en ligne] disponible sur :

L'agroforesterie, comment ça marche ? | Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation consulté le 01/04/2022

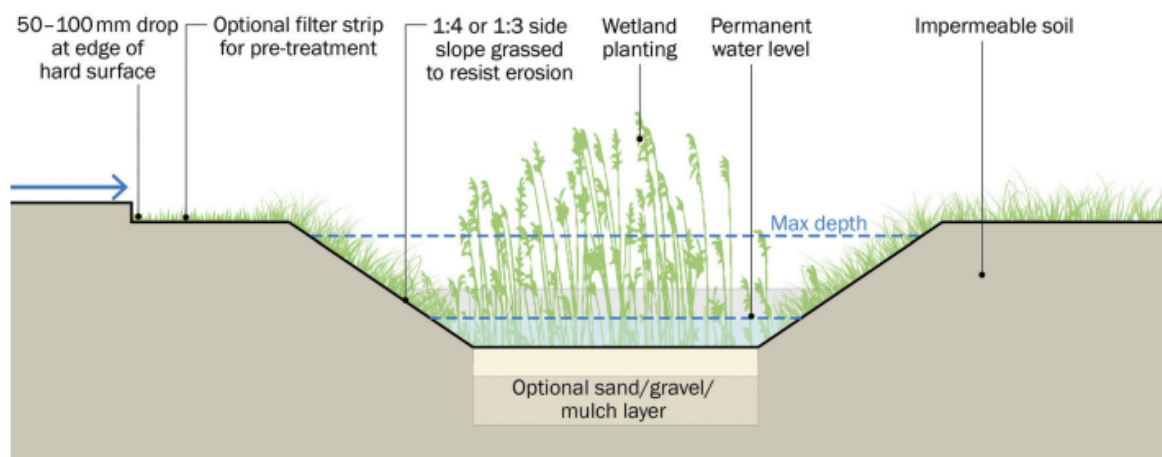
Annexes



Annexe 1 : Exemple de noue de transport



Annexe 2 : Exemple de noue sèche



Annexe 3 : Exemple de noue humide

Directeur.rice de recherche :
Vincent Rotgé

Maxence Paris et Nathan Requillart
PFE/DAE5
IMA
2022-2023

L'adaptation au risque climatique en ville grâce aux NBS : La gestion de l'eau et le risque inondation

Résumé :

Le terme NBS est un terme récent qui a été introduit dans les années 2000. Ce terme est dit « parapluie » car il comprend un grand nombre d'infrastructures. Ces dernières vont tirer profits des avantages qu'offre la nature pour rendre des services écosystémiques (SE). Les SE peuvent être de l'ordre sanitaire, environnemental, de la santé etc... Les NBS vont être utiles pour lutter face aux risques que nous offre le changement climatique. Elles vont pouvoir l'atténuer, en diminuant les gaz à effet de serre par exemple, ou s'adapter face aux risques qui découlent du changement climatique. Elles vont notamment être utiles dans la gestion de l'eau en ville pour faire face aux inondations. Néanmoins les NBS ne se suffisent pas à elles seules et sont souvent associées aux infrastructures conventionnelles (dites « grises »). De plus, les choix d'utiliser tel NBS et pas une autre peut s'avérer important en fonction de l'enjeu et du contexte de son utilisation. C'est pourquoi plusieurs méthodes de planification adaptatives existent. La méthode du Cerema va évaluer les SE rendus par les infrastructures vertes et est adaptée au contexte local. La cartographie, elle, évalue les SE sur une échelle plus large et permet une planification. Enfin la méthode ATP/AP ajoute l'échelle du temps dans la planification afin de s'adapter sur le long terme et permet d'être durable. Cette méthode s'inspire d'autres outils de planification comme la robustesse dynamique qui ont permis aux méthodes de l'APB et de l'APM d'introduire les types d'actions à mettre en place ainsi que la gestion de l'eau.

Mots clés : adaptation, risque, eau, ville, nature