
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Mitiger les risques par les Solutions Basées sur la Nature

Antea Group -
Ghent Office
Buchtenstraat 9,
9051 Gent, Belgique



Tuteur entreprise :
Tom D'Haeyer
Manager développement
commercial international

Pierre Trillaud

Tuteur académique :
Vincent Rotgé

IMA
2022-2023

Remerciements

Je souhaite tout d'abord et avant toute chose remercier Mme Marisa Di Marcantonio ainsi que Mr Tom D'Haeyer d'avoir été mes premiers interlocuteurs, d'avoir prêté attention à mon dossier et enfin de m'avoir accepté au sein d'Antea Group Belgium pour ce stage, et cela dans la permanente bienveillance. Votre écoute, vos conseils tout au long du stage ainsi que les diverses missions qu'ils m'ont confiées, non pas des plus simples mais c'est également ce qui les a rendues si intéressantes.

Ce stage n'aurait pas non plus été possible sans l'aide de Marie Mahieu, Charles Mahieu et Bram Vandekerckhove, qui m'ont mis en contact avec Mr D'Haeyer et Mme Di Marcantonio, et à qui j'adresse aussi mes remerciements.

Je remercie également tous les membres d'Antea Group Belgium, pour leur aide ainsi que leur bienveillance.

Il me tient tout particulièrement à cœur de remercier mon ami et collègue Pedro, pour ces quelques déjeuners en tête à tête à parler de nos projets lorsque le bureau était peu occupé, pour tous les conseils apportés et enfin pour toutes les choses que j'ai pu découvrir ainsi. Mes pensées me ramènent évidemment à ces inoubliables soirées du « Gentse feesten » qui resteront de très bons souvenirs « For sure ».

Je n'oublie pas de remercier Khouloud, Edith, Tanguy, Alexander, Augustin, Martinus et Steven pour les bons moments passés ensemble, les astuces communiquées, l'aide apportée et de m'avoir initié à certains dossiers pour ma connaissance personnelle.

Mes remerciements s'adressent également à Rediet, collègue stagiaire également, avec qui nous avons pu échanger sur de nombreux sujets et rendre tous les problèmes de fonctionnement du logiciel Lisem moins pesants.

Je remercie la « Surface Water Team » pour avoir organisé ces réunions bimensuelles, avoir présenté des projets relativement diversifiés et d'avoir pu « brainstormer » sur des potentielles solutions à certains problèmes, envisagé des suites de projet alternatives, etc.

Mes remerciements vont aussi à ma famille, dont le soutien ne faiblissait pas malgré l'éloignement. Leur aide et leurs conseils m'ont aussi guidé dans certains choix ainsi plus avisés.

Enfin, je porte une attention toute particulière à ces derniers remerciements, et non pas des moindres, à la personne qui est toujours restée à mes côtés aussi bien avant que pendant ce stage. Celle-ci même qui m'a apporté un soutien moral très important, m'exhortant à ne pas baisser les bras et à rester motivé, et ce, aussi ardue que fut la tâche. Je me devais d'avoir confiance en mon travail. Elle a également représenté une aide très précieuse dans la correction de certaines erreurs ou le développement de certaines informations par des savoirs complémentaires.

Liste des sigles

DRM	:	Gestion des Risques de Catastrophe/ Disaster Risk Management
GIEC	:	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICF	:	International Climate Finance
MNT	:	Modèle Numérique de Terrain
NAP	:	Plan d'Adaptation National
NBS	:	Nature-based solutions ; solutions basées sur la nature
NDC	:	Nationally Determined Contribution
ODA	:	Official Development Assistance
ODD	:	Objectifs de Développement Durable
ONG	:	Orga non gouvernementale
UA	:	Unité Arbitraire
URL	:	Uniform Resource Locator

Glossaire

Parties prenantes / décisionnaires : acteur, individuel ou collectif, activement ou passivement concerné par une décision ou un projet ; c'est-à-dire dont les intérêts peuvent être affectés positivement ou négativement à la suite de son exécution.

Tampon : zone définie par une distance à un objet constante.

Table des matières

1. Table des matières

Liste des sigles	ii
Glossaire.....	ii
Table des matières	iii
1. Table des matières	iii
Table des figures	v
Table des tableaux	v
2. Préambule.....	0
2.1. Introduction	0
2.2. Présentation d'Antea Group Belgium	0
3. Mitiger les risques par la nature.	2
3.1. Le risque, une notion plurielle.....	2
3.2. Des solutions s'inspirant de processus naturels.....	3
3.2.1. Que sont les NBS ?.....	3
3.2.2. Différencier les solutions fondées sur la nature	5
3.2.3. Une utilisation justifiée.....	6
4. Lier « risques » et « solutions basées sur la nature »	8
4.1. Zones d'études	8
4.1.1. Amélioration de la résilience de 5 municipalités au Cap-Vert	8
4.2. Réduction des risques d'inondation en Ouganda	11
4.3. Rassemblement de données sur les NBS.....	13
4.3.1. Les Nbs, leur implantation, leurs caractéristiques et leurs bénéfices	13
5. Des outils pour implanter des solutions basées sur la nature	14
5.1. Un inventaire des solutions basées sur la nature.....	14
5.1.1. Réduction du risque au Cap-Vert.....	17
5.2. Classification des risques et des bénéfices de NBS	17
5.3. Modules de placement des solution fondées sur la nature.....	19
5.3.1. Implanter des solutions basées sur la nature en zone continentale	20
5.3.2. Analyse du territoire pour implanter de solutions basées sur la nature en Ouganda.	27
5.3.3. Protéger les côtes par les solutions fondées sur la nature	28
6. Conclusion.....	30
7. Bibliographie.....	32
8. Annexes.....	34
8.1. Annexe A : Réponse à l'appel d'offre du gouvernement de Cap-Vert (parties évaluation des risques et proposition de NBS)	0
8.2. Annexe B : Liste des références bibliographiques utilisées pour l'étude des solutions basées sur la nature.	46

8.3.	Annexe C : Inventaire des solutions basées sur la nature	49
8.4.	Annexe D : Manuel d'utilisation de l'inventaire des solutions basées sur la nature 46	
8.5.	Annexe E : code python du modèle de flux gravitaire	61
8.6.	Annexe F : représentations graphiques du modèle de flux directionnel.....	73

Table des figures

Figure 1: Évolution de Oranjewoud vers Antea Group	0
Figure 2: Classification des différents types de solutions basées sur la nature.....	5
Figure 3: Comparaison entre les différentes valeurs associées à des mangroves et un élevage de crevettes dans le village de Tha Po (Ranganathan & World Resources Institute, 2008)	7
Figure 4: Localisation de l'archipel du Cap-Vert	8
Figure 5: Risque d'inondation côtière dans la ville de Praia (2100-1.10m) (Climate central)	9
Figure 6: Zones de Boa Vista impactées par les inondations côtières (2100-1.10m) (Climate central)	9
Figure 7: Zones de Boa Vista impactées par les inondations côtières (2030-0.2m) (Climate central)	9
Figure 8: Précipitations historiques (mm/an) (Worldbank).....	9
Figure 9: Anomalies moyennes des températures prévues (Worldbank)	9
Figure 10: Nombre de jours sec par ans prévus (Worldbank)	9
Figure 11: Légende (LHASA).....	10
Figure 12: Répartition du risque de glissement de terrain à Mosteiros (LHASA)	10
Figure 13: Répartition du risque de glissement de terrain à Ribeira Brava (LHASA)	10
Figure 14: Répartition du risque de glissement de terrain à Brava (LHASA)	10
Figure 15: Simulation de crue à Ribeira Brava pour une crue de retour 25 ans (FastFloods) ..	11
Figure 16: Précipitations et températures moyennes mensuelles en Ouganda de 1991 à 2020 (Worldbank).....	11
Figure 17: Relief du bassin versant et coupes topographiques	12
Figure 18: Bassin versant de la rivière Semliki.....	12
Figure 19: Artéfacts sur le MNT (Terrascope)	12
Figure 20: Représentation graphique du module de plaine alluviale.....	22
Figure 21: Représentation graphique du module de zone humide	24
Figure 22: Représentation graphique du module de diversification des cours d'eau	25
Figure 23: Explication du modèle Modelbuilder pour identifier des zones d'implantation de NBS	27
Figure 24: Différentes couches intermédiaires dans l'application du modèle de NBS continentales dans le bassin versant de la rivière Semliki	28
Figure 25: Boa Vista zones impacted by coastal floods (2030-0.2m)	1
Figure 26: Boa Vista zones impacted by coastal floods (2100-1.10m)	1
Figure 27: Coastal flood risk in the city of Praia	1
Figure 28: Historical rainfalls (mm/year)	2
Figure 29: Dry days number evolution (SSP1-1.9)	2
Figure 30: Temperature anomalies (1951-2100)	3
Figure 31: Landslide susceptibility in Ribeira Brava (and legend).....	3
Figure 32: Landslide susceptibility in Brava	3
Figure 33: Landslide susceptibility in Mosteiros.....	4
Figure 34: Ribeira Brava streams for a 25 years return flood.	4

Table des tableaux

Tableau 1: Typologie des risques, bénéfices et mécanismes associés	18
Tableau 2: Caractéristiques des solutions basées sur la nature visant à réduire l'intensité des vagues de chaleur.....	20

2. Préambule

2.1. Introduction

Dans le cadre de ma deuxième année d'étude en cycle d'ingénieur, je souhaitais réaliser mon stage dans un pays autre que la France, et de préférence au sein d'un bureau d'études. Par l'intermédiaire de connaissances, j'ai ainsi pu entrer en contact et envoyer mon dossier à l'entreprise du pays voisin qu'est la Belgique répondant au nom d'Antea Group Belgium. La pluridisciplinarité, l'étendue de leur réseau professionnel ainsi que l'investissement à l'international dont ce groupe fait preuve m'a motivé à soutenir ma candidature afin de pouvoir accéder à cette opportunité très intéressante.

En rayonnant à l'international, les équipes d'Antea Group ont ainsi la possibilité de traiter de nombreux dossiers, dans des contextes différents, ce qui demande une importante plasticité dans la réalisation des tâches qui leur sont confiées. Antea Group Belgium étant particulièrement concerné par les problèmes environnementaux actuels, et ayant notamment la volonté d'étendre le développement durable à travers le monde, cette plasticité est d'autant plus importante que chaque région du globe est affectée différemment par les changements climatiques. Il est donc nécessaire d'évaluer la vulnérabilité et les risques présents sur les territoires afin de répondre au mieux à la demande du commanditaire.

Au cours de mon stage, j'ai donc pu participer à plusieurs de ces aspects nécessaires à la constitution d'un dossier dont les éléments répondent au cahier des charges.

2.2. Présentation d'Antea Group Belgium

Antea Group Belgium est une filiale nationale d'Antea Group. Il s'agit d'une société d'ingénierie internationale ainsi qu'un cabinet de conseil en environnement. Fondée en 1951, la « maison mère » était alors connue sous le nom d'Oranjewoud, et deviendra la branche nationale pour les Pays-Bas. Le développement de l'activité entraîne par la suite la création de Ingenieursbureau Benelux N.V en Belgique. Celle-ci changera de nom en 1990 pour devenir Soresma. Puis, ces deux entités vont adopter en 2005 le nom d'Oranjewoud N.V.. En 2008 puis 2009 se créent respectivement Delta (États-Unis) et Antea SA (France). Ce n'est qu'en 2011 que tout le réseau ainsi construit décide de s'unifier sous la bannière « Antea Group ». De nouvelles filiales « Antea Group » sont ainsi nées à travers le monde, par exemple en Inde, au Brésil, en Espagne, en Pologne, mais aussi au Mali, au Bénin...

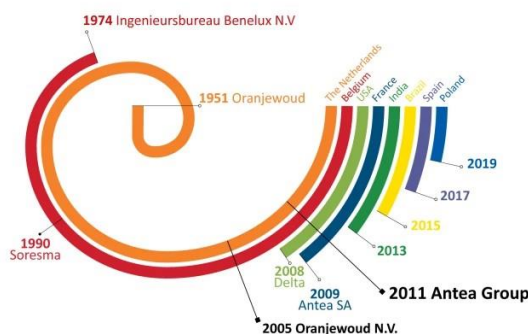


Figure 1: Évolution de Oranjewoud vers Antea Group

Actuellement, l'équipe d'Antea Group Belgium, représentée nationalement par son PDG, Jan Parys, compte plus de 220 spécialistes. Ces derniers sont répartis dans 6 bureaux implantés dans 6 villes belges, qu'elles soient flamandes ou wallonnes (Anvers, Gand, Oostkamp, Hasselt, Louvain et Namur).

Il s'agit d'une compagnie dont l'engagement dans la société traduit les valeurs qui lui sont importantes. En témoignent les mesures soigneusement inscrites dans le manuel de qualité de travail et de vie au travail, les certificats de réduction des émissions de CO₂ ou encore d'entrepreneuriat durable délivrés tous deux par UNITAR conjointement à la Charte Voka.

Les différentes actions que promeut Antea sont également des moyens simples et efficaces permettant aux employé(e)s d'œuvrer pour des causes communes, telles que la réduction des transports individuels, l'utilisation de moyens de transports plus écologiques (favorisation des voitures électriques et déplacements en train, offre de vélos) et de participer à des actions citoyennes pour l'environnement (clean-walk, dé-pavement de zones urbaines).

Antea Group Belgium présente une grande diversité de domaines de compétences regroupés au sein de quatre grands pôles que sont :

- Environnement
- Infrastructure
- Eau
- Gestion des espaces

Ces différents domaines d'expertise sont d'ailleurs assurés par le certificat de conformité à la norme ISO 9001: 2015 que possède Antea Belgium NV.

Le bureau de Gand, situé à dans le bâtiment de coworking au Buchtenstraat 9, est composé de deux salles principales majoritairement dédiées aux sections « Infrastructures » et « Eau ».

L'équipe formant la section « Eau » a cependant élargi son activité à l'évaluation des risques naturels, en plus de ceux que représentent les inondations fluviales et côtières. Ce sont ainsi 10 risques qui sont classiquement évalués par cette section, à savoir : inondation fluviale, inondation côtière, glissement de terrain, vents forts/ tempête, sécheresse météorologique, période de sécheresse (nombre de jours consécutifs), incendie, séisme, augmentation des températures, érosion des terres. Ces évaluations mènent à la conception de plans de prévention nationaux ou territoriaux adaptés à la demande et aux risques présentés. Ils peuvent s'accompagner de la conception de mesures à mettre en place pour réduire ces dits risques, de préconisations et ou de guides visant à former les services à la prévention et la prévoyance de ces risques.

Toutefois, de nombreuses situations se sont révélées très complexes et les infrastructures traditionnelles, autrement appelées « solutions grises » en référence à la couleur grise que l'utilisation du béton leur donne, sont apparues insuffisantes car présentant de nombreuses limites. Avec de nouveaux enjeux sociaux et sociétaux tels que le changement climatique, la prise de conscience de ces limites s'est accrue, tout comme le besoin de trouver des moyens de répondre plus efficacement aux besoins de protection des citoyens.

En parallèle, la connaissance croissante sur la nature et les écosystèmes a révélé les bénéfices dont les sociétés humaines profitent, mais également l'environnement. Ces bénéfices multiples, désignés sous le terme « services écosystémiques » mettent en avant la dichotomie entre solution grise et solution verte, la première ayant une fonction unique tandis que la seconde sert des objectifs multiples. Les pratiques visant à utiliser la nature pour servir des objectifs humains ont donc commencé à être étudiées, y compris dans le but de réduire les risques naturels. Cela a donné lieu aux « solutions basées sur la nature » tiré de l'anglais « nature-based solutions » (NBS). La mission de mon stage a donc été de développer la connaissance de l'entreprise sur ces pratiques et de les rendre applicables en les liant à la pratique d'évaluation des risques. Ce rapport a pour but de présenter « en quoi employer la nature permet la réduction des risques naturels et comment ces actions peuvent être mises en place ».

Après une présentation des notions clés que sont le risque, les solutions basées sur la nature et leur utilité aux sociétés, deux outils développés dans le but de pouvoir rendre ces concepts applicables aux territoires seront présentés avant d'étudier quelles seraient les possibilités d'amélioration de ceux-ci.

3. Mitiger les risques par la nature.

3.1. Le risque, une notion plurielle.

Le risque, et tout particulièrement les risques naturels (séisme, tsunami, inondations, glissements de terrain, sécheresse, ...), sont communément définis par l'intersection de deux composantes : l'aléa et l'enjeu. Cependant, cette notion est très variable puisque ce ne sont que les prémices qui sont étudiés aujourd'hui. Cela est dû à la relative récence de ce terme. Il n'est apparu à l'échelle globale que dans les années 2010. En effet, en 2007, lors de la parution du quatrième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), la notion de risque n'est absolument pas définie dans le glossaire, ni même la gestion du risque. Le terme « risque » est alors simplement usité pour évoquer la potentialité qu'un événement négatif se produise. (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007). Seule la définition de « vulnérabilité » semble se rapprocher du sens de risque, cependant vulnérabilité est un terme apparaissant comme une fatalité, qui ne peut donc être changé et prônant insidieusement l'inaction

Le rapport suivant, paru en 2014, soit sept ans plus tard, revêt en partie la même signification, bien qu'il apporte des éléments de précision sur la définition de « risque ». Il est ainsi défini par le GIEC comme étant les « conséquences éventuelles et incertaines d'un événement sur quelque chose ayant une valeur, compte dûment tenu de la diversité des valeurs. Le risque est souvent représenté comme la probabilité d'occurrence de tendances ou d'événements dangereux que viennent amplifier les conséquences de tels phénomènes ou tendances lorsqu'ils se produisent. » (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2014) Sans nier la définition commune qui est faite du terme risque, le GIEC le conçoit comme l'expression de conséquences, ou d'une éventualité d'occurrence d'effet néfastes plutôt que de probabilités. Le fait de prendre en compte ces deux définitions montre à quel point il peut être ardu de définir ce terme. Trois principaux axes peuvent cependant être dégagés.

« Éventuelles et incertaines d'un événement » font référence à un aléa, dont l'ampleur et la temporalité sont imprévisibles, ou, en tout cas, difficile à déterminer avec précision longtemps à l'avance. « Quelque chose ayant une valeur » renvoie à la notion des enjeux ; un aléa se produisant dans une zone déserte aura un risque moindre s'il est comparé au même aléa dans une ville. À noter que cela met en avant l'anthropocentrisme du terme « risque », fortement lié aux sociétés humaines, mais également la variabilité induite par chacun en fonction de la considération accordée aux différents types de sociétés. C'est d'ailleurs à ce propos que figure l'expression « diversité des valeurs », car la valeur n'est pas appliquée à la société en elle-même mais à de nombreuses variables telles que citées : « les personnes, les modes de subsistance, la santé, les écosystèmes et les espèces, le patrimoine économique, social et culturel, les services (y compris les services environnementaux) et les infrastructures ». Cette « valeur », bien que se voulant la plus intégratrice possible, ne prends pas en compte l'attachement des personnes à leurs terres par exemple, qui peut être relativement variable. Enfin, la vulnérabilité est évoquée mais paraît encore sous-jacente avec la prise en compte de « la probabilité d'occurrence de tendances ou d'événements dangereux » puisqu'un enjeu dans une zone où il est plus fréquent d'observer des phénomènes naturels destructeurs sera plus vulnérable, bien que la vulnérabilité soit fortement dépendante de l'enjeu concerné et de son état. Comme l'a très bien explicité Alexander de Ruijter lors d'une réunion, « Si une crue subite arrive dans un parc par exemple, et qu'une personne en bonne santé s'y trouve, elle peut s'enfuir, et sera donc peu vulnérable. Cependant si cette même personne, se trouve au même endroit, au même instant mais qu'elle est par exemple blessée à la jambe, alors sa vulnérabilité aura augmenté tandis que l'aléa sera resté le même ».

Le dernier rapport publié par le GIEC, en 2023, balaie quant à lui de nombreux termes flous pour se vouloir précis et concis. L'incertitude visible dans la précédente formulation est remplacée par le terme « potentiel ». C'est donc une possibilité, n'étant définie ni dans le temps ni dans l'espace. Le terme « quelque chose ayant une valeur » est remplacé par « systèmes humains ou écologiques » ce qui,

premièrement, apparaît mieux défini, donc plus facilement applicable et plus crédible, et, deuxièmement, évite la notion de « valeur », car ce terme implique qu'il est possible d'associer une valeur numérique à des systèmes. Or cela est très compliqué pour des éléments intangibles tels que des services écosystémiques ou des entités n'ayant pas de valeur marchande. Deux enjeux ont également été ajoutés à la liste précédemment proposée, à savoir la préservation de la qualité de vie en général et le bien-être. Le GIEC réaffirme ainsi son point de vue, en gardant les sociétés humaines et l'environnement au cœur des considérations pour tous les « teneurs d'enjeux » et pose son savoir avec des termes précis pour faciliter la compréhension et l'application des principes. (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2023)

Enfin, le rapport évoque qu'en plus de l'incertitude quant à l'occurrence et l'ampleur des zones de risques, les aléas, l'exposition et la vulnérabilité peuvent évoluer « dans le temps et dans l'espace en raison des changements socio-économiques et de la prise de décision humaine ». Des changements de risques sont donc possibles, ce qui signifie que certaines mesures ou décisions sont à même de pouvoir réduire les risques sur un territoire. Un avertissement est cependant donné, car s'il est possible de réduire un risque, des facteurs tels que l'incertitude de mise en œuvre, une efficacité moindre ou une mauvaise politique climatique peuvent empêcher l'atteinte d'objectif(s) visé(s), ou de compromis potentiels ou même provoquer des effets secondaires négatifs sur d'autres objectifs sociétaux, tels que les objectifs de développement durable (ODD). (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2023)

Il est donc possible de définir le risque comme étant une possibilité qu'un territoire donné subisse un événement (aléa) pouvant causer des dommages ou, en tout cas, avoir des effets négatifs sur le fonctionnement naturel ou normal des écosystèmes et des sociétés humaines respectivement (enjeux) dont l'ampleur des conséquences peut varier selon des paramètres propres aux enjeux (vulnérabilité). Définir le risque permet de créer des procédures plus pertinentes et ainsi améliorer la sécurité, le bien-être et la qualité de vie humaine, ainsi que le développement durable au travers des stratégies de gestion des risques de catastrophes (DRM). À ces fins, le GIEC a également distingué les risques des risques clés. En effet, tous les territoires sont soumis à de nombreux risques, mais seuls certains sont plus susceptibles d'avoir d'importantes conséquences négatives dépendamment du territoire. Des mesures pour réduire ces risques devront donc être implémentées prioritairement.

3.2. Des solutions s'inspirant de processus naturels.

3.2.1. Que sont les NBS ?

Comme présenté en introduction, avec les connaissances grandissantes sur l'environnement mais aussi la prise de conscience que les pratiques modernes peuvent mener à l'effondrement total d'écosystèmes, des pratiques utilisant la nature et les processus naturels en découlant ont été mises au point pour réduire les risques liés à des catastrophes naturelles tout en préservant les écosystèmes et la biodiversité. Elles sont communément appelées « solutions basées sur la nature ».

De plus en plus présentes dans la littérature, malgré leur développement récent, de nombreux concepts peuvent y être associés, et de nombreuses définitions données. De manière générale, l'UICN définit les NBS comme étant les « actions visant à protéger, gérer durablement et restaurer les écosystèmes naturels et modifiés, qui répondent aux défis de la société de manière efficace et adaptative tout en bénéficiant aux personnes et à la nature » (Cohen-Shacham et al., 2016) Les solutions fondées sur la nature découlent d'écosystèmes sains puisqu'elles reposent sur les services écosystémiques. Plus un écosystème est en bonne santé plus il « produit des services », aussi bien en quantité qu'en qualité. Une solution basée sur la nature consiste donc à implanter la nature (des composants particuliers, adaptés au besoin (explicité plus tard) en un site et la faire prospérer pour que, par son fonctionnement naturel elle contribue à la société. Il est donc nécessaire de posséder une bonne connaissance des processus régissant la formation des aléas ainsi que ceux des écosystèmes pour trouver des antagonismes entre ceux-ci et implanter le ou les écosystème(s) correspondant à l'aléa ciblé. Les NBS ne pouvant pas influencer sur les

enjeux et leur valeur, elles peuvent cependant réduire le phénomène naturel en cause (aléa), ce qui, en rendant l'aléa moins violent, peut également réduire la vulnérabilité. C'est pourquoi les NBS sont en mesure de réduire les risques.

Les solutions fondées sur la nature ciblent généralement des défis majeurs où les solutions conventionnelles sont rapidement limitées voire insuffisantes, tels que les changements climatiques, la réduction des risques de catastrophe, la sécurité alimentaire et hydrique, la perte de biodiversité et la santé humaine. Un parallèle pourrait être réalisé entre les solutions fondées sur la nature et la lutte biologique en agriculture ; les risques seraient les « parasites » et les services écosystémiques sont ce que les auxiliaires de culture sont à l'agriculture.

Afin de qualifier une mesure comme une solution basée sur la nature, des règles doivent être respectées. L'UICN a dressé une liste de 8 points, permettant de définir les NBS comme des mesures :

- « Suivant les normes (et principes) de conservation de la nature ;
- Pouvant être mises en œuvre seules ou de manière intégrée avec d'autres solutions aux défis sociétaux (par exemple, des solutions technologiques et d'ingénierie) ;
- Étant déterminées par des contextes naturels et culturels spécifiques au site qui incluent les connaissances traditionnelles, locales et scientifiques ;
- Produisant des avantages sociétaux de manière juste et équitable, d'une manière qui favorise la transparence et une large participation ;
- Maintenant la diversité biologique et culturelle et la capacité des écosystèmes à évoluer dans le temps ;
- Étant appliquées à l'échelle d'un paysage ;
- Reconnaisant et abordant les compromis entre la production de quelques avantages économiques immédiats pour le développement et les options futures pour la production de la totalité des services écosystémiques ;
- Faisant partie intégrante de la conception globale des politiques et des mesures ou actions visant à relever un défi spécifique. » (Cohen-Shacham et al., 2016)

Ces lignes directrices semblent toutefois poser un cadre large car elles définissent les solutions basées sur la nature non pas selon les caractéristiques qu'elles possèdent mais selon les objectifs (administratifs principalement) auxquels elles doivent répondre. D'autres critères ont également pu être déterminés de manière additive à ceux cités, en fonction des études réalisées et des objectifs de celles-ci. Castellar et al. (2021), par l'étude d'une banque de données sur les NBS ainsi que la consultation du public et d'un groupement d'experts, ont révélé plusieurs critères supplémentaires que ne doivent pas présenter les solutions fondées sur la nature pour être considérées comme telles :

- « Être un bénéfice ou une fonction dépendant de la sélection d'espèces (ex : Arbres d'ombrages (exclue les herbacées et arbustifs))
- Être inspiré par la nature mais ne l'employant pas (ex : goudron/béton/pavement perméable)
- Impliquer des procédés intensifs ou n'existant pas à l'état naturel (ex : bétail urbain à petite échelle)
- Être un type de solution fondées sur la nature (ex : traitement naturel des eaux usées)
- Être une méthode de gestion, d'aménagement, un outil pour faciliter l'implantation d'une NBS, ou visant à préserver/gérer/surveiller des écosystèmes naturels ou des solutions fondées sur la nature existantes (ex : usage durable de fertilisants)» (Castellar et al., 2021)

Ces dernières règles sont plus précises quant à la nature que doivent avoir les NBS (ou plutôt ce qu'elles ne doivent pas être), puisqu'elles précisent une approche plus pragmatique, ce qui facilite la conception mentale des NBS auprès des **décisionnaires**. Car au-delà d'être un concept récent, les NBS se

veulent être des mesures applicables aux territoires. Les **parties prenantes** doivent donc comprendre de quoi il retourne pour inclure ces méthodes dans leurs politiques.

3.2.2. Différencier les solutions fondées sur la nature

Une classification des différents types de solutions aide donc à ordonner toutes ces méthodes répondant au grand ensemble des « solutions basées sur la nature ». Deux grandes visions de la répartition des NBS peuvent être appliquées à ce concept parapluie et ne s'excluent pas mutuellement, ce afin de conditionner les entrées pour l'élaboration des politiques par les **parties prenantes** :

- Diviser les solutions en NBS_U et NBS_I, respectivement NBS Unité et NBS Intervention, comme proposé par Castellar et al. (2021). Un deuxième niveau de classification définit le type d'écosystème concerné et la « forme » que prend la solution comme présenté en Figure 2. Cela décrit ainsi le type d'action et certaines conditions d'application, puisque les interventions impliquent d'avoir initialement un écosystème sur lequel agir, et les unités sont des solutions pouvant être développées en tant que telles, ce sont des composants de l'environnement à part entière.

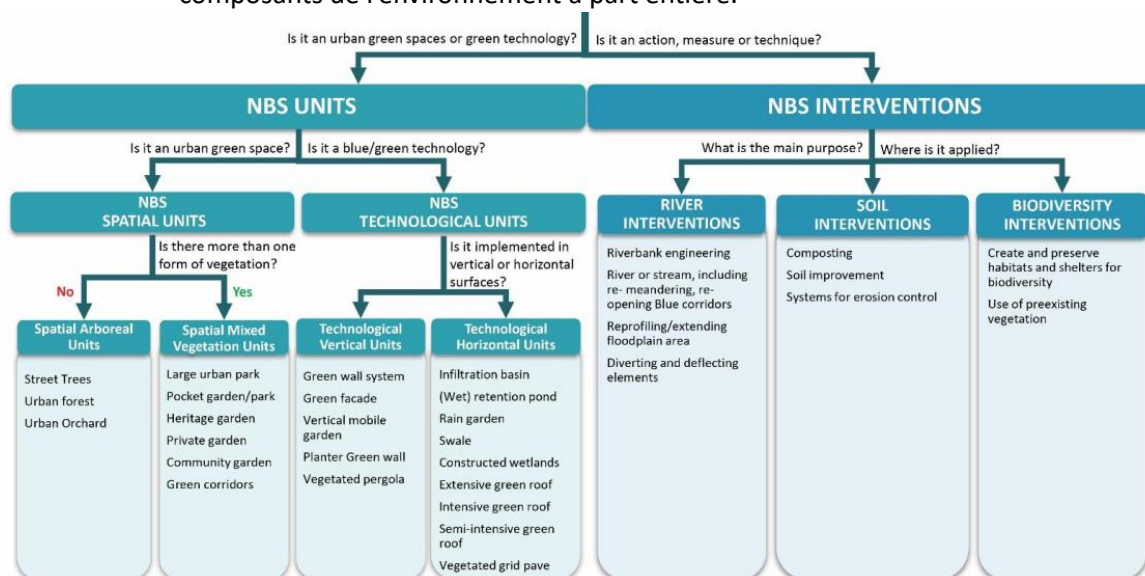


Figure 2: Classification des différents types de solutions basées sur la nature.

- Catégoriser les solutions selon le degré de modification qui est appliqué sur un écosystème, comme le proposent Eggermont et al. (2015). Ces derniers identifient ainsi 4 classes de solutions :
 1. La protection des écosystèmes
 2. La restauration des écosystèmes
 3. La modification des écosystèmes afin d'accroître la quantité, qualité et durabilité de services particuliers fournis
 4. « Construire » de nouveaux écosystèmes fournissant des services écosystémiques qui pourraient autrement être produits via des moyens plus conventionnels tels que de l'ingénierie mais en utilisant des ressources non renouvelables. (Eggermont et al., 2015)

Une compatibilité est identifiable entre les deux premières classifications, et il serait envisageable de considérer que les NBS_U regroupent la classe 4 de Eggermont et al. Les 3 autres classes quant à elles feraient partie des NBS_I. La classe 1 induit le moins de changements sur l'écosystème, puisque la protection réside majoritairement au niveau administratif, qui délimite une zone à activités réglementées

tandis que la classe 4 est celle provoquant des changements drastiques sur le milieu. Des changements fondamentaux sont également synonymes pour les **décisionnaires** de dépenses plus importantes.

3.2.3. Une utilisation justifiée

L'aspect financier est une facette qui explique relativement bien la « popularité » des solutions fondées sur la nature, bien que les gains écologiques soient importants aussi. En effet, si les sociétés connaissent l'importance de la nature dans la Vie (production de nourriture, de dioxygène (O₂), ressources non alimentaires, régulation du climat, ...), il n'est cependant pas aisé d'agir en sa faveur car agir a un coût, alors que les services écosystémiques sont délivrés « gratuitement ». Quoique, cette vision, bien que très répandue, est cependant révolue. En effet, il est plus juste de parler de « sacrifice » ou « d'échange » (Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005), puisque chaque bénéfice, ou chaque service a un coût. Par exemple, un arbre coupé pour produire du bois d'œuvre sera bénéfique monétairement mais induira un arbre de moins, entre autres, capable de stocker du CO₂. La notion d'échange s'illustre parfaitement dans cet exemple, avec une transformation d'une valeur écologique en valeur monétaire. Cela nous rappelle à quelle point la loi de Lavoisier est universelle : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », même en sciences écologiques.

À l'époque où les services écosystémiques étaient supposés gratuits il n'était en effet pas considéré comme une priorité d'investir dans la nature, mais lorsque le principe d'échange est connu, alors ces investissements apparaissent nécessaires. La réciprocité est effectivement valable : de bons investissements monétaires dans les écosystèmes afin de les restaurer induiront une meilleure « santé » et donc plus de services écosystémiques. Il s'agit de la base du principe de solutions basées sur la nature.

Une étude réalisée par un groupement d'experts en écologie lors du programme « Millennium Ecosystem Assessment » confirme ce point et va également plus loin. Celle-ci démontre à quel point il est bénéfique d'implanter des NBS. Ce rapport met au jour les fonctionnements presque antagonistes entre les solutions grises conventionnelles, généralement uni-fonctionnelles, et les solutions vertes multifonctionnelles. En les choisissant bien, les NBS sont à même de traiter des problèmes sociétaux majeurs, notamment les changements climatiques et le déclin de la biodiversité. Parmi les avantages cités au cours de cette étude et d'une complémentaire, deux sont d'importance capitale :

- La pérennité des NBS : contrairement aux solutions grises, qui, étant exposées aux aléas et étant figées et rigides, se dégradent au fil du temps par manque donc d'adaptabilité, les NBS se renforcent au cours du temps grâce à la croissance et la formidable capacité d'accommodation du vivant, tout en sélectionnant les espèces adaptées à la zone et en se régénérant via des populations juvéniles. Les processus naturels se renforcent, se pérennisent et se rapproche d'un écosystème entièrement naturel. Il en résulte des coûts d'entretien faibles et décroissants au fil du temps, contrairement aux méthodes conventionnelles.
- Le rapport investissement-bénéfices : les NBS agissent généralement sur les processus menant à un résultat (l'eau potable par exemple) tandis que les méthodes classiques agissent sur le résultat lui-même (purification de l'eau sortant d'un écosystème dégradé pour suivre l'exemple). Agissant en amont, cela est donc plus efficace et à plus grande échelle, car la nature se répand et répand ses services ; elle est donc aussi plus simple et économique à implanter à grande échelle que des alternatives modernes. Deux exemples très représentatifs peuvent être cités :
 - La dégradation de la qualité de l'eau prélevée pour les besoins d'environ 9 millions de personnes (4,92 milliards de litres d'eau par jour) dans la ville de New-York en 2009. Les solutions étaient :
 - Construire une usine de filtration de l'eau pour 6 milliards de dollars, avec plus de 300 millions de dollars de dépenses d'exploitation annuelles.

- Mettre en place un plan de protection des bassins versants pour sauvegarder la capacité des écosystèmes à fournir les services de filtration de l'eau. La protection signifiait réglementer l'occupation du sol sur environ 240 000 acres, nécessitant environ 2,7 milliards de dollars pour acheter des titres de redevance ou des servitudes. Via des négociations, le coût total de protection du bassin versant a été bien inférieur au coût estimé de la construction d'une installation de filtration (NYC DEP 1993a ; Paden et Shen 1995 in (Ranganathan & World Resources Institute, 2008))).
- Le projet d'implantation d'élevages de crevettes dans le village de Tha Po. Ce dernier impliquait la destruction de forêts de mangroves. L'analyse des rendements économiques des élevages de crevettes a été comparé avec celle des mangroves gérées de manière durable. La prise en compte de la valeur des services écosystémiques non marchands des mangroves (protection du littoral, réduction des inondations, frayère à poissons) met en exergue l'importance des services rendus (Figure 3), et donc la nécessité de les préserver. Leur préservation permet aussi à tous les habitants de profiter des services, tels que la protection contre les inondations côtières, tandis que la ferme ne profite qu'aux exploitants ; il s'agit d'un exemple concret de développement durable. (Ranganathan & World Resources Institute, 2008)



Figure 3: Comparaison entre les différentes valeurs associées à des mangroves et un élevage de crevettes dans le village de Tha Po (Ranganathan & World Resources Institute, 2008)

Les solutions fondées sur la nature utilisent donc des processus se déroulant à l'état naturel dans les écosystèmes dans le but précis de traiter les problèmes sociétaux définis. Ce sont des méthodes variables répondant à un ensemble de règles communes et étant généralement classées soit selon leur degré d'intervention nécessaire sur un écosystème donné, soit selon leurs caractéristiques propres. Toutefois, ces visions ne sont pas adaptées à une mise en œuvre sur un territoire, où il est nécessaire de répondre à des enjeux. Or, d'après l'UICN, les NBS doivent faire « partie intégrante de la conception globale des politiques et des mesures ou actions visant à relever un défi spécifique ». Ce qui signifie qu'il est possible de les relier à des problèmes (d'où le nom de « solution »), ce qui en fait une approche

beaucoup plus pragmatique et pratique à appliquer pour des **parties prenantes**. Pour cette raison, ce rapport se focalisera particulièrement sur le sous-ensemble des solutions basées sur la nature qui, parmi d'autres bénéfices, contribuent à la résilience et l'adaptation climatique.

4. Lier « risques » et « solutions basées sur la nature »

Associer les 2 comme un seul outil dans la méthode

4.1. Zones d'études

Les sites d'études ont été séparés en 2 cas, aussi bien dans le temps que l'espace. Le premier concerne l'archipel du Cap-Vert, tandis que le second cas d'étude est situé en Afrique de l'Est, en Ouganda. À chaque cas d'étude sont associés des enjeux propres.

4.1.1. Amélioration de la résilience de 5 municipalités au Cap-Vert

L'étude de la résilience du Cap-Vert est une réponse à l'appel d'offre lancé par le gouvernement du Cap-Vert, en coopération avec les filiales luxembourgeoises de Official Development Assistance (ODA) et International Climate Finance (ICF), vise à augmenter la résilience écologique et sociale du Cap-Vert dans le cadre du Programme d'Action Climatique et de la mise en place de nouvelles politiques de climat. Celles-ci sont matérialisées au Cap-Vert par les Contributions déterminées au niveau national (Nationally Determined Contribution (NDC)) provenant de l'Accord de Paris et le Plan d'Adaptation National (National Adaptation Plan (NAP)) de ces cinq municipalités dans un contexte de changement climatique important. En effet, cet archipel est touché de manière importante par ce phénomène ce qui oblige sa population à faire face de plus en plus fréquemment à des périodes de sécheresses, impliquant des famines et la dégradation des terres, se faisant déjà rares à cause de l'urbanisation croissante. L'appel d'offre stipulait



Figure 4: Localisation de l'archipel du Cap-Vert

que l'étude devait comporter une identification et une analyse d'options pour l'implantation de solutions basées sur la nature et, dans la mesure du possible, favoriser la restauration des écosystèmes dans les cinq municipalités, réparties sur 5 îles comme le montre la Figure 4, concernées par l'offre à savoir :

- Boa Vista, sur l'île éponyme, d'une superficie de 5 687 km²
- Brava, sur l'île éponyme, d'une superficie de 258 km²
- Mosteiros, sur l'île Fogo, d'une superficie de 85 km²
- Praia, sur l'île Santiago, d'une superficie de 258 km²
- Ribeira Brava, sur l'île São Nicolau, d'une superficie de 65,10 km²

Une étude des conditions climatiques actuelles ainsi que des futures du Cap-Vert permet de révéler les points clés sur lesquels il est nécessaire d'agir, autrement dit, quels aléas sont présents et doivent être mitigés parmi une sélection de 10 aléas, correspondant à ceux pour lesquels Antea Group est qualifié. Les risques les plus pertinents sont donc les inondations fluviales et surtout côtières, les îles étant particulièrement à risque puisqu'elles sont entourées par l'océan, les glissements de terrain, l'érosion, les sécheresses (températures et jours consécutifs) et enfin les tempêtes. Le choix d'étudier ces

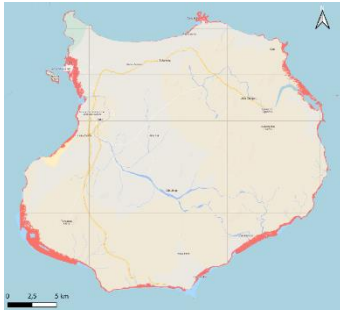


Figure 7: Zones de Boa Vista impactées par les inondations côtières (2030-0.2m) (Climate central)



Figure 6: Zones de Boa Vista impactées par les inondations côtières (2100-1.10m) (Climate central)



Figure 5: Risque d'inondation côtière dans la ville de Praia (2100-1.10m) (Climate central)

risques a également été réalisé en fonction de la possibilité de les réduire en utilisant la nature. (Van Zanten et al., 2023)

Les îles capverdiennes sont volcaniques, ce qui signifie que leurs pentes sont fortes. Cependant, certaines parties sont plus plates et plus vulnérables aux inondations côtières (rouge), comme le montrent ces cartes pour la municipalité de Boa Vista, respectivement pour les projections à 2030 (Figure 7) et 2100 (Figure 6) avec des scénarios d'élévation du niveau de la mer de 0,2 m et 1,10 m (Beaumont et al., 2018). La commune de Boa Vista est la plus impactée par les inondations côtières sur les 5 communes. Cependant, la ville de Praia est également très concernée en raison de sa proximité avec la mer. Comme le montre la Figure 5, plusieurs zones urbanisées seront impactées d'ici 2100 par des inondations côtières, entraînant des coûts économiques et sociaux élevés. Les inondations fluviales, quant à elles, ne sont pas apparues comme représentant un risque majeur, et ce même avec des événements exceptionnels (T25 et T100 respectivement 32.93 et 81.24 mm). (World Bank Climate Change Knowledge Portal, s. d.)

Toutefois, comme les habitants l'ont constaté au fil des ans, les chaleurs et les sécheresses ont bel et bien été plus fréquentes au fil du temps. L'examen des données historiques et les projections confirment ces tendances.

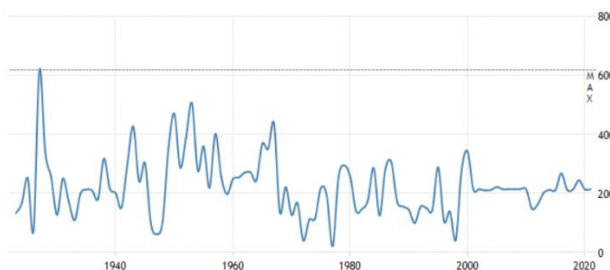


Figure 8: Précipitations historiques (mm/an) (Worldbank)

Les précipitations historiques (Figure 8) montrent que la forte variabilité des précipitations a été lentement remplacée par des précipitations plus régulières, ce qui pourrait également signifier que la quantité d'eau disponible ne peut pas être reconstituée avec des précipitations exceptionnelles. Cette analyse peut être complétée par l'estimation des jours secs par an pour les prochaines décennies (Figure

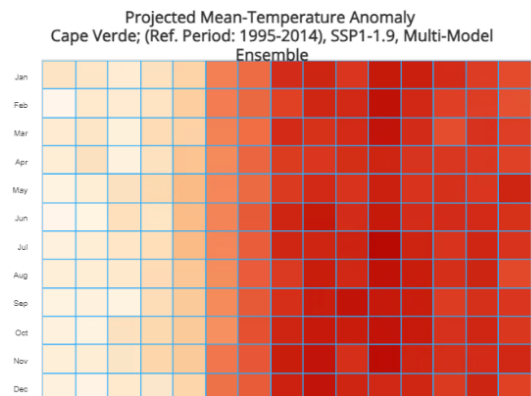


Figure 9: Anomalies moyennes des températures prévues (Worldbank)

		2020-2029				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	Units: Days	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
SSP1-1.9	Country: Cape Verde	89.35 (84.02,90.20)	91.82 (77.16,92.00)	80.82 (60.17,91.24)	77.51 (36.33,88.08)	89.76 (83.97,90.20)	91.79 (79.89,92.00)	81.33 (63.89,91.21)	78.55 (40.09,88.28)	89.69 (83.74,90.20)	91.76 (80.25,92.00)	82.94 (62.41,91.54)	78.26 (45.58,88.84)	89.88 (82.72,90.20)	91.60 (80.21,92.00)	80.70 (57.94,91.72)	80.92 (45.21,89.05)
	Highest: Sal	89.65 (87.85,90.20)	91.90 (78.05,92.00)	83.25 (69.25,92.00)	80.85 (41.45,89.10)	89.70 (85.30,90.20)	92.00 (82.50,92.00)	81.95 (75.85,91.20)	81.35 (44.70,90.00)	89.45 (87.80,90.20)	91.65 (82.00,92.00)	83.20 (74.85,92.00)	82.10 (51.65,89.55)	90.15 (87.05,90.20)	91.85 (81.55,92.00)	81.10 (71.60,92.00)	82.35 (51.40,89.70)
	Lowest: Brava	89.00 (86.00,90.20)	92.00 (71.85,92.00)	76.50 (52.85,87.70)	64.25 (26.80,85.50)	89.35 (87.05,90.20)	91.95 (72.60,92.00)	79.75 (56.90,88.45)	61.20 (30.10,84.40)	89.40 (85.45,90.20)	91.75 (75.50,92.00)	78.30 (61.75,90.00)	72.70 (33.95,86.75)	89.40 (85.60,90.20)	91.90 (73.55,92.00)	77.40 (56.00,88.15)	72.10 (35.50,84.55)

Figure 10: Nombre de jours sec par ans prévus (Worldbank)

10). Même si Brava est la moins impactée, dans le scénario de projection le moins pire, cette commune devra affronter des périodes de journées sèches plus longues, et très rapides puisqu'on l'estime, pour l'hiver par exemple, à une augmentation de 0,35% entre 2040 et 2059, ce qui signifie qu'en moyenne un tiers de jour est ajouté par rapport à 2020-2039. En réalité, ce phénomène s'accélérera à la fin de la période, aggravant les sécheresses. Tout le pays du Cap-Vert sera au moins soumis à cette augmentation, si ce n'est plus. A cette analyse alarmante s'ajoute le fait que les températures vont sensiblement augmenter dans les décennies à venir (Figure 9), selon les projections du GIEC, ce qui signifie que les périodes chaudes seront plus intenses, aggravant l'effet de sécheresse.

Un autre risque qui peut être traité directement est le risque de glissement de terrain, affectant particulièrement les municipalités de Ribeira Brava et Brava, comme indiqué ci-dessous (Figure 13 et Figure 14). Ce risque est principalement déterminé par de grands changements dans l'utilisation des terres, notamment en ce qui concerne les zones déboisées pour créer des routes ou pour être utilisées à des fins agricoles. Une étude plus approfondie sera nécessaire pour mieux comprendre l'utilisation des terres et les pratiques locales afin d'avoir une vision plus précise de la répartition des risques entre les municipalités.

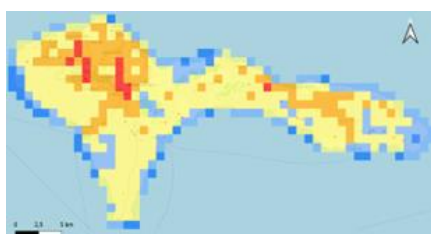


Figure 13: Répartition du risque de glissement de terrain à Ribeira Brava (LHASA)

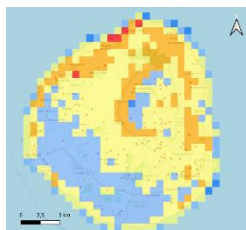


Figure 14: Répartition du risque de glissement de terrain à Brava (LHASA)

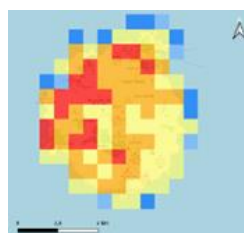


Figure 12: Répartition du risque de glissement de terrain à Mosteiros (LHASA)

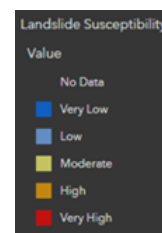


Figure 11: Légende (LHASA)

La municipalité de Mosteiros est plus légèrement affectée par le risque de glissement de terrain (Figure 12), et l'analyse des autres risques n'a pas montré d'éléments clés. Les modèles globaux sont des outils performants mais peuvent ne pas donner de résultats clairs concernant les aléas climatiques sur la résolution de cette zone, ou ne pas être suffisamment représentatifs de la réalité. L'évaluation locale aidera à identifier les types de dangers auxquels les gens doivent faire face et comment ils pourraient être traités en fonction des capacités locales. De cela dépend quel NBS pourrait être sélectionné et mis en œuvre.

Comme présenté plus tôt, il y a des pentes importantes sur les îles capverdiennes. Si le substrat n'est pas perméable, ce qui est fortement probable en certains points étant donné la nature volcanique des îles, il en résultera une forte densité de drainage, comme le montre la carte (Figure 15). Cela va induire un ruissellement important sur les sols, ce qui signifie un important phénomène d'érosion in situ si le sol est érodable ou en aval. L'érosion est connue pour déconnecter les cours d'eau de leurs eaux souterraines alluviales, impactant la croissance de la végétation riveraine et l'évapotranspiration.



Figure 15: Simulation de crue à Ribeira Brava pour une crue de retour 25 ans (FastFloods)

Les risques retenus pour faire l'analyse des possibilités d'implantation des NBS au Cap-Vert sont donc la sécheresse, l'érosion, les inondations côtières et les glissements de terrain. Les tempêtes et les inondations fluviales ne se sont pas révélées être des risques majeurs.

La réponse d'origine à l'appel d'offre, en ce qui concerne la partie d'évaluation des risques ainsi que les possibilités d'application de solutions basées sur la nature, est consultable en **Annexe A**.

4.2. Réduction des risques d'inondation en Ouganda

Le deuxième lieu d'étude est situé en Ouganda. L'étude est réalisée pour le compte de l'Organisation Non Gouvernementale (ONG) Join For Water, agissant pour améliorer l'accès à l'eau des populations et une gestion plus durable de cette ressource dans les pays en développement. Les pays d'Afrique ont des difficultés supplémentaires étant donné leurs climats chauds. La température moyenne en Ouganda était de 23,22°C en 2021, pour des précipitations de 1381,35 mm la même année.

Monthly Climatology of Min-Temperature, Mean-Temperature, Max-Temperature & Precipitation 1991-2020 Uganda

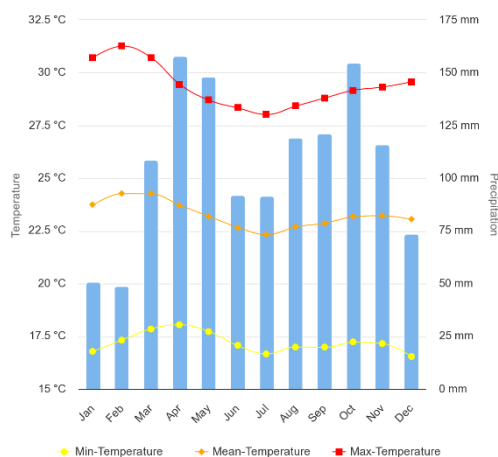


Figure 16: Précipitations et températures moyennes mensuelles en Ouganda de 1991 à 2020 (Worldbank)

Comme le montre la Figure 16, le climat en Ouganda des 3 dernières décennies est caractérisé par un profil de régime hydrologique tropical, avec deux pics caractéristiques en (mars) avril-mai ainsi que d'août à septembre. Une saison plus sèche est visible entre ces deux périodes, ce qui correspond aux mois de juin et juillet, également associés à une baisse de la température moyenne. La période de décembre à février est également une période sèche.

Les risques d'inondations seront donc plutôt concentrés durant les deux saisons humides. Il est également important de considérer qu'en plus des inondations, l'Ouganda peut être en proie à des sécheresses étant donné que la température est plus élevée pendant les saisons sèches, ce qui les favorise.

Le cas d'étude concerne une zone centrée sur la rivière Semliki, faisant le lien entre le lac Édouard (amont) et le lac Albert (aval), où les risques fluviaux sont importants (érosion des berges, inondations fréquentes). Le débit de cette rivière est estimé à $158 \text{ m}^3/\text{s}$ par l'Atlas des Ressources en Eau du Bassin du Nil à sa confluence avec le lac Albert. La zone d'étude ainsi que le bassin versant correspondant sont présentés en Figure 18. Le bassin versant mesure $34\,883,055 \text{ km}^2$ et chevauche trois pays, à savoir l'Ouganda, le Rwanda et la République Démocratique du Congo, séparés par la rivière Semliki qui matérialise en partie leur frontière.

Le bassin versant est caractérisé par un coefficient de Gravelius relativement bas, puisque son K_G est de 0.02. Cela signifie que le temps de parcours du bassin versant est relativement élevé, induisant des crues débits de pointe plus faibles que sur des bassins versant plus « compactes ». Toutefois, son réseau hydrographique n'est que modérément développé puisqu'il présente une densité de drainage (Horton) d'environ 1.913 km/km^2 , ce qui correspond à un réseau d'environ $66\,751,130 \text{ km}$ de cours d'eau. Ce bassin versant a la particularité d'être contenu dans une vallée, comme le montre la Figure 17. Figure 19, entre deux zones de hautes altitudes, notamment pour sa partie amont. L'espace de proximité directe à la rivière est relativement plan, et s'étend même plus loin formant une grande plaine dans la partie aval, bien qu'il y ait un pic contenu dans le bassin versant. À l'amont, plusieurs artéfacts créés lors de l'acquisition des données d'élévation sont visibles (Figure 19). Ils ont possiblement été générés par la présence d'oiseaux, de nuages ou bien tout élément se trouvant entre le sol et le capteur (satellite) au moment de l'enregistrement. Il est possible que ces artéfacts perturbent la génération du bassin versant étant donné qu'ils peuvent

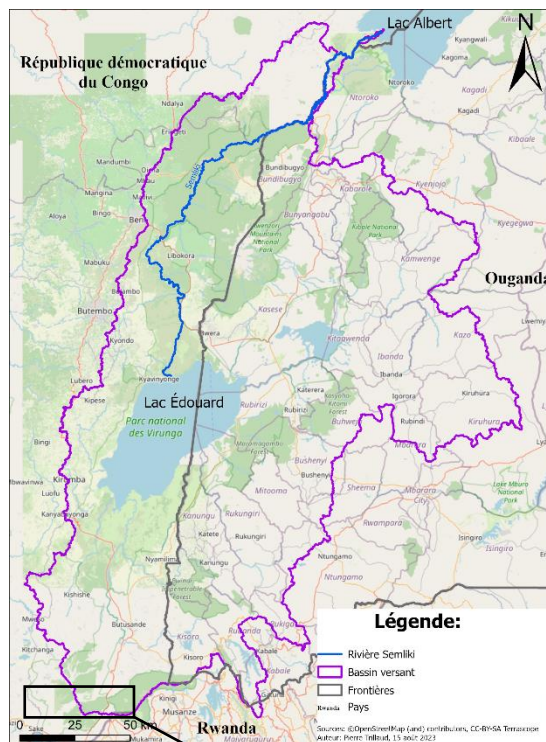


Figure 18:
Bassin versant
de la rivière
Semliki

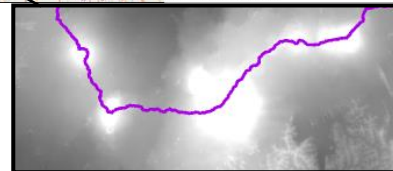


Figure 19: Artéfacts sur le MNT
(TerraScribe)

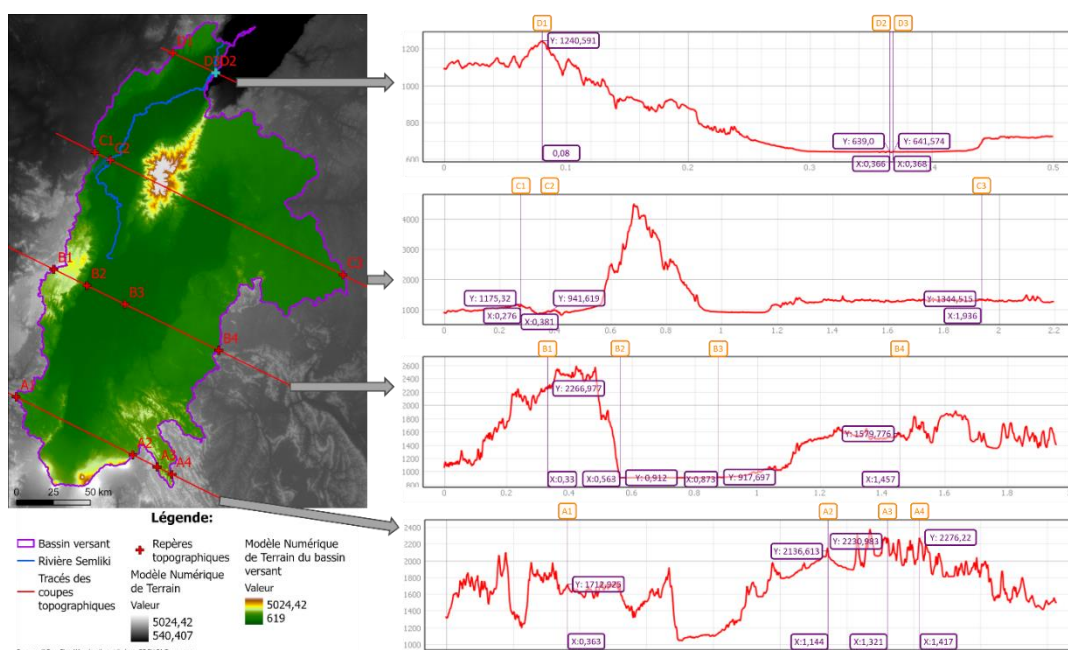


Figure 17: Relief du bassin versant et coupes topographiques

être assimilés à des crêtes. Il est probable que la vallée définisse le lit majeur de la rivière Semliki pour des crues aux périodes de retour importantes.

4.3. Rassemblement de données sur les NBS

4.3.1. Les NbS, leur implantation, leurs caractéristiques et leurs bénéfices

Afin de mener à bien l'étude des possibilités d'implantation de solutions fondées sur la nature au Cap-Vert, il a été nécessaire de définir des critères de pertinence, d'efficacité, mais également déterminer quel(s) bénéfice(s) est(sont) apporté(s) par chaque méthode. Ce travail a été effectué au travers d'un état de l'art constitué de nombreuses références. Ces dernières ont été acquises à partir de recherches en lignes sur le navigateur Google Scholar ainsi que Google Chrome. Certaines références ont également été ajoutées par l'utilisation de la bibliographie de documents déjà lus. Dans ce dernier cas, lors de la lecture du document porteur de la bibliographie, l'évocation d'un argument d'intérêt avec le lien de la référence motivait la consultation de ce document référence. Après consultation, le document pouvait être ajouté ou non en fonction de sa pertinence. Dans les autres cas, les ouvrages ont été sélectionnés :

- Par la pertinence de leur titre, via le moteur de recherche, lors de l'emploi des termes « nature-based solution » et « nature-based solution inventory »
- Lecture de leur résumé
- Consultation rapide de leur structure ainsi que du contenu : étaient sélectionnés les ouvrages contenant plusieurs solutions basées sur la nature avec des détails de leurs bénéfices ainsi que des informations concernant leur implantation.

Ont ainsi été sélectionnés 11 ouvrages afin de constituer la base de la recherche, présentés ci-dessous :

- Bridges et al.. 2021. International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management.
- Brill et al.. 2021. Benefit Accounting of Nature-Based Solutions for Watersheds: Guide United Nations CEO Water Mandate and Pacific Institute
- EEA. 2021. Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction
- Nature-based solutions in the urban context: terminology, classification and scoring for urban challenges and ecosystem services
- Nature-based Solutions to address global societal challenges 2016-036.pdf (iucn.org)
- NSW Department of Land and Water Conservation 2001, Coastal Dune Management: A Manual of Coastal Dune Management and Rehabilitation Techniques
- Oppla Case studies atlas
- Politecnico de Milano. 2019. Catalogue of Nature-based solutions for urban regeneration.
- R. Moraes et al. 2022. Nature-Based Solutions in Coastal and Estuarine Areas of Europe, Table 1
- Urban Nature Atlas (una.city)
- Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions

World Bank. 2021. A Catalogue of Nature-based Solutions for Urban Resilience. Les références, provenant de plusieurs pays et types de supports, ne pouvaient pas être répertoriées dans un logiciel de bibliographie classique. Lorsque cela était permis, les documents ont donc été téléchargés et regroupés dans un dossier afin de faciliter leur consultation, si celle-ci est nécessaire ultérieurement. Lorsque le téléchargement n'était pas possible, un document texte répertorie les sites par leur URL, auquel est joint le nom du site ainsi que celui de l'élément consulté.

Toutefois, dans un second temps, il a été nécessaire d'effectuer des recherches plus appliquées sur quelques aspects des solutions, dans le but de caractériser des facteurs d'implantation des NBS. Cet état de l'art a la particularité de ne pas être fixé sur un thème mais d'évoluer au fil des recherches. Le but de cet état de l'art était donc de caractériser les éléments les plus récurrents ou principaux formant les solutions basées sur la nature pour ensuite définir des paramètres :

- Soit limitant leurs possibilités d'implantation (définition d'un substrat adéquat, pente adaptée, ...)
- Soit étant bénéfique au vu de l'aléa, ou, de manière générale, au problème qui doit être résolu ou réduit (zone **tampon** pour une crue, zone de forte érosion, ...)

La définition des mécanismes de réduction des aléas réalisés par les NBS s'est imposé comme une notion essentielle afin de lier pertinemment l'implantation des NBS et leurs effets sur les aléas. Il a donc été nécessaire de construire une base à partir de cela, ayant également nécessité des références bibliographiques.

Pour chacun des cas, la méthode appliquée nécessitait la lecture rapide du résumé ou de l'article afin de déterminer l'utilité de ce dernier. Lors de la recherche de notions précises, la fonction de recherche dans le document était utilisée afin d'accélérer la recherche mais également ne pas rater d'information qui aurait pu être noyée dans le texte. La liste des documents de référence utilisés pour cette étude est présentée en **Annexe B**.

5. Des outils pour implanter des solutions basées sur la nature

5.1. Un inventaire des solutions basées sur la nature

Afin qu'Antea ait une banque de données concernant les solutions basées sur la nature, la compilation des documents source présentés précédemment a donné lieu à la création d'un inventaire, sous la forme d'un classeur Excel. Ce classeur vise à être utilisé par les **parties prenantes** ainsi que les membres d'Antea afin de déterminer, après avoir défini les problèmes concernant un territoire, quelles solutions sont les plus adaptées pour potentiellement pouvoir les implanter par la suite. Cela a pour but de centraliser les connaissances afin de faciliter l'implantation de NBS dans un seul document au lieu de naviguer entre plusieurs sources, n'ayant pas des informations harmonisées.

Cet inventaire, présenté en **Annexe C** comporte 145 méthodes de solutions basées sur la nature. Chaque entité (méthode) possède plusieurs attributs la caractérisant, regroupés par sections :

- Caractérisation
 - Famille : classe les solutions basées sur la nature en 16 mégatypes répertoriés ci-dessous :

Forêts	Agriculture urbaine
Agriculture	Zones humides continentales naturelles
Terrasses et Pentes	Zones humides continentales construites
Renaturation de rivières et ruisseaux	Plaines alluviales
Solutions construites	Structures submergées
Espaces verts ouverts	Marais Salants
Corridors écologiques	Côtes de sable
Zones de bio rétention	Gestion de l'eau
 - L'utilisateur peut ainsi avoir des indications sur où une technique peut être mise en œuvre, à quelle échelle, dans quel contexte et une idée de ce en quoi consistera la technique. Plusieurs techniques d'une même famille auront très probablement plusieurs points communs.
 - Technique : nom de la solution basée sur la nature

- Échelle : précise dans quelle mesure une solution peut être mise en œuvre. Il s'agit généralement de l'échelle la plus grande possible ou celle la plus pertinente. Elle fournit également une information de localisation (plutôt en campagne (parcelle agricole) ou en milieu urbain (ville, quartier)). Il y a quatre possibilités d'échelle :
 - Parcelle agricole
 - Ville
 - Quartier
 - Bassin versant
- Fonctions et bénéfices : comportent 19 attributs différents, listés ci-dessous, visant à définir à quel aspect social, environnemental ou économique chaque solution peut répondre. Les attributs ont été définis en fonction des aléas et des enjeux les plus courants, mais étant aussi traités par Antea Group Belgium :

Réduction des risques d'inondation côtière	Régulation de la pollution de l'air
Réduction du risque d'inondation pluviale	Stockage et séquestration du carbone
Réduction des risques d'inondation fluviale	Biodiversité
Régulation de la pollution de l'eau	Production de ressources
Régulation de la chaleur	Tourisme et loisirs
Régulation de la sécheresse	Stimuler les économies locales et la création d'emplois
Gestion de l'érosion et des sédiments	Santé humaine
Régulation des glissements de terrain	Éducation
Régulation de la pollution des sols	Culturel
	Interaction sociale

- Pour chaque critère, une solution ne peut avoir qu'une seule valeur, destinée à représenter l'effet (ou non) de la solution sur un attribut. Elles varient par incrément de 1 de 0 à 3, 0 étant nul (aucun effet sur le paramètre, ou négligeable), 1 pour « Faible », 2 pour « Moyen » et 3 pour « Élevé ». Ces valeurs sont pour la plupart extraites du document de référence associé à chaque technique. Ces valeurs sont arbitraires, donc sans dimension et sont simplement destinées à classer la capacité d'une solution à affecter un paramètre. Cependant, ce n'est pas une valeur qui représente l'intensité de chaque cas car de nombreux facteurs peuvent modifier l'efficacité de la solution basée sur la nature. Des différences de valeurs d'indices entre plusieurs références peuvent être notées du fait du manque de standardisation entre elles vu qu'elles proviennent d'études différentes.
- Indice : cet attribut vise à synthétiser les bénéfices et fonction en une seule valeur, permettant ainsi de les trier plus aisément mais selon un critère « objectif ». Il est basé sur une variation de l'indice de Shannon. Ce dernier est très utilisé en écologie car il représente efficacement en une seule valeur des populations complexes. C'est également ce qui est souhaité ici ; représenter un ensemble de valeurs associées à des principes écologiques. La formule se compose comme suit :

$$ID = - \sum_{c=1}^{19} W * F_i * \ln(W * F_i)$$

- Où :
 - ID est l'indice
 - c est le numéro du critère (attribut), variant de 1 à 19 ;

- F_i est la fréquence du « ième » attribut criteria

$$\left(\frac{\text{ième Valeur}}{\text{Somme des valeurs maximales possibles d'une ligne}} \right);$$
- $\ln$ est le logarithme népérien ;
- W est un facteur de pondération déterminé par l'utilisateur de l'inventaire. Il peut ainsi pondérer tous les attributs de « Fonctions et Bénéfices » de manière individuelle, y compris par 0 (valeurs négatives exclues car les solutions sont supposées amélioratives). Cela a pour effet de changer la valeur d'indice des solutions pour fournir un nouveau classement plus adapté aux priorités de chacun. Les valeurs d'affinité restent cependant inchangées.
 - L'indice ne fournit pas de valeur « seuil » définissant une bonne ou mauvaise solution ou une valeur dont il faut être proche. En effet, toutes les solutions peuvent être positives selon l'étude de cas. Au lieu de cela, il classe les solutions en fonction de la distribution et de l'intensité des valeurs. Ainsi, plus l'indice est élevé, plus les valeurs des critères sont élevées avec une distribution homogène. Il aide simplement l'utilisateur à choisir entre plusieurs possibilités, en donnant la solution la plus adaptée à un cas, en fonction des avantages et des priorités fixées. D'autres paramètres doivent cependant être pris en compte, tels que l'échelle, la pertinence et les coûts, qui n'ont pour l'instant pas pu être pris en compte dans le calcul de l'indice.
- Pertinence/adaptabilité : la pente est plus un facteur d'implantation qu'un facteur d'affinité comme les attributs, cela ne paraît donc pas pertinent de le compter dans l'indice, d'autant qu'il existe de nombreuses variations possibles de la pente, ce qui serait compliqué à traduire en une sélection de valeurs. Il en est de même pour « l'avis », qui est un attribut de texte visant à conseiller l'utilisateur plus qu'à effectuer un tri.
 - Pente : donne des intervalles de valeurs de pentes étant généralement utilisés pour chaque technique et la raison de ces classes (propriétés du sol, nécessité d'écoulement, ...)
 - Avis : attribut textuel regroupant des informations nécessaires ou importantes à connaître avant la mise en œuvre de la solution
- Coûts : cette section précise des coûts afin de donner une approximation des sources de dépenses nécessaires à la mise en place et l'entretien des solutions. Les coûts sont seulement indicatifs car ils peuvent très fortement varier selon le pays, le contexte et les variations ou adaptations envisagées. Des éléments pouvant générer ces coûts sont aussi précisés.
 - Terrain : dépenses découlant de l'acquisition de terrain et le dédommagement des anciens propriétaires, ...
 - Implantation : coûts de construction de la solution (préparation du terrain, paiement des travailleurs, équipement, ...)
 - Maintenance : coûts possibles sur le long terme (taille des végétaux, entretien du matériel, remplacement, ...)
- Sources : document de référence documentant la technique.

Cet inventaire vise donc à simplifier les travaux liés aux solutions basées sur la nature, en offrant un outil dynamique, afin d'adapter au mieux les réponses aux besoins, mais également en permettant de sélectionner soit quelques solutions à implanter, soit un panel plus large pour, par exemple, faire des propositions lors de réponses à des appels d'offres. Il pourra également être complété par la suite avec de nouvelles solutions et des attributs supplémentaires. Un manuel a également été rédigé (**Annexe D**)

afin de présenter son fonctionnement détaillé pour permettre une meilleure utilisation et future amélioration.

5.1.1. Réduction du risque au Cap-Vert

La réalisation de cet inventaire a permis d'identifier plusieurs possibilités d'implantation des solutions basées sur la nature au Cap-Vert. Plusieurs éléments peuvent être considérés pour réduire les conséquences des inondations côtières, tels que le transport des sédiments et l'intensité des vagues. La mise en place de forêts de mangroves dans les zones impactées pourrait être une solution à celles-ci puisque la croissance d'un peigne végétal dense réduit l'intensité des vagues sur les côtes en brisant la trajectoire. Cet "effet peigne" fixe le substrat et provoque en même temps de la sédimentation, évitant la fuite des sédiments. Il en résulte un niveau de sol plus élevé, réduisant le risque d'inondation. Cependant, il pourrait être compliqué de mettre en œuvre une telle solution dans la municipalité de Praia. En effet, étant donné la forme de la crique et de la ville, il y a très probablement du commerce et des activités ludiques réalisées en ce lieu. Planter des mangroves par exemple serait contraignant. C'est pourquoi la mise en place de structures submergées, telles que des récifs de coraux, ou bien des « champs sous-marins d'algues », apparaît comme étant un meilleur choix.

Pour réduire le stress thermique dû aux sécheresses et aux températures élevées, de nombreuses solutions peuvent être mises en place, notamment dans les villes. Le but de ces solutions est de réduire la surface des surfaces artificielles exposées telles que le béton ou le tarmac. Les techniques les plus utilisées consistent à créer des espaces verts dans les villes, comme des parcs urbains ou des auvents d'arbres de rue, à ombrager des allées et des rues pour réduire la température urbaine. Les solutions bleues, notamment le stockage de l'eau sur les toits ou dans des zones humides artificielles, doivent être envisagées car elles sont connues pour rafraîchir l'air en plus d'améliorer la qualité et la gestion de l'eau, mais leur mise en œuvre est plus difficile à cause de l'évaporation.

A plus grande échelle, comme par exemple sur l'île de Boa Vista, où les contraintes sont plus faibles car l'île est peu urbanisée, des forêts complètes peuvent être plantées. Elles ont une grande action climatique, parmi d'autres bénéfices, pour la biodiversité par exemple, notamment sur la température puisque les arbres ont un métabolisme provoquant l'évapotranspiration, consistant à aspirer l'eau du sol pour compenser l'eau qui a été transpirée sous l'action de la chaleur. En devenant humide, la température de l'air diminue. Si les forêts sont suffisamment grandes et proches des villes, l'effet peut se faire sentir de manière intéressante, et même sinon, cela contribue à la résilience climatique du pays. Des espèces d'arbres particulières doivent être choisies, en particulier celles locales qui peuvent résister à la sécheresse ou à des conditions difficiles pour être plus résistantes, et qui ont une grande canopée lors de la croissance. Les arbres sont plus efficaces en évapotranspiration lorsqu'ils sont assez vieux pour avoir une large canopée, produisant plus d'évapotranspiration. La gestion durable de ces forêts est efficace pour la résilience climatique, car elle implique également la plantation de jeunes arbres, plus efficaces pour le stockage et la séquestration du carbone afin de réduire l'effet de serre.

Enfin, en ce qui concerne le risque de glissement de terrain, celui-ci est principalement déterminé par de grands changements dans l'utilisation des terres, notamment en ce qui concerne les zones déboisées pour créer des routes ou pour être utilisées à des fins agricoles. Sensibiliser les habitants à de nouvelles pratiques agricoles, telles que les cultures en terrasses ou les « living smiles » permettraient de réduire ce risque mais aussi d'offrir des possibilités de cultiver d'autres terres qui n'étaient pas forcément exploitées à cause de pentes trop fortes par exemple et ainsi répartir la pression sur le territoire plutôt que la concentrer en certains points.

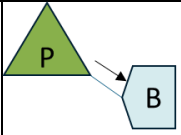
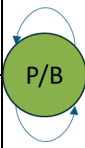
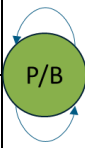
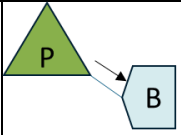
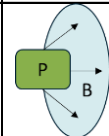
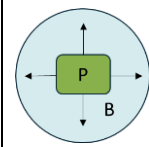
5.2. Classification des risques et des bénéfices de NBS

L'inventaire des solutions basées sur la nature est relativement exhaustif, ce qui en fait un outil utile pour créer des scénarios ou des propositions. Il permet également une première connexion entre

des solutions basées sur la nature et la notion de risque au travers des aléas. Cependant, la distribution des risques dans un territoire n'est pas homogène. Il est donc nécessaire de rendre la notion de solution basées sur la nature pertinente spatialement en plus d'être pertinente thématiquement.

Le travail précédent de constitution de l'inventaire liste les aléas pouvant être traités par les NBS, sélectionnant ainsi les éléments sur lesquels l'étude doit se centrer. À partir de cette liste d'aléas, la recherche bibliographique visait à associer des schémas de fonctionnement spatial aux aléas afin de déterminer où implanter des solutions basées sur la nature pour qu'elles soient efficaces sur les aléas d'intérêt. Un exemple particulièrement vrai concerne les inondations fluviales : une ville touchée par des inondations régulière ne devrait pas mettre en œuvre une NBS au sein de la ville, mais plutôt à l'amont pour réduire la crue avant son arrivée dans la ville. Partant de ce constat, de la liste d'aléas traités par la nature et enfin à l'aide de l'étude « Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions » (Vrebos et al., 2015), une première classification a pu être établie, comme le montre le Tableau 1:

Tableau 1: Typologie des risques, bénéfices et mécanismes associés

Quantification method	Benefit	Mechanism
Quantifiable	Water pollution regulation	 Gravitational Flow
	Soil pollution regulation Air pollution regulation Carbon storage and sequestration	 In situ
Risk related	Drought regulation Erosion and sediment management Landslide regulation	 In situ
	Riverine flood risk reduction Pluvial flood risk reduction	 Gravitational Flow
	Coastal flood risk reduction	 Directional Flow
	Heat regulation	 Omnidirectional Flow
Demand dependent	Tourism and recreation Stimulate local economies and job creation Cultural Education Social interaction Human health Resources production	
"Nature needs"	Biodiversity	

Ce tableau exprime le lien entre les bénéfices donnés par les solutions fondées sur la nature (P), (donc nous connaissons aussi l'aléa concerné au travers du nom du bénéfice), une variable pouvant les définir et les quantifier et enfin le mécanisme de fonctionnement de l'aléa et du bénéfice (B). Il est ainsi possible de lire que la pollution de l'eau est une variable quantifiable (en mg/L par exemple), qu'il est nécessaire d'avoir un bénéfice de régulation pour la traiter et que cette pollution est généralement portée d'amont en aval par l'écoulement des eaux, ce qui est associé à un « flux gravitaire ». Les glissements de

terrain, eux par contre, sont liés à un risque, ce dernier pouvant être évalué en télédétection. Les solutions basées sur la nature doivent présenter un bénéfice de réduction ou régulation des glissements de terrain. La solution doit permettre de fixer le sol pour réduire cet aléa, comme par l'utilisation de racines par exemple, d'où un effet « in situ » puisque les racines maintiennent le sol en place où la solution est implantée.

Les aléas figurant en gras sont les aléas majeurs traités par Antea Group, et également les seuls pouvant être quantifiés sur une échelle de risque et dont l'intensité varie de manière non négligeable sur un territoire. À des fins de simplicité pour la construction d'un premier modèle, le choix a été fait de n'associer chaque bénéfice qu'à une seule méthode de quantification ainsi qu'un mécanisme, et de coupler les inondations pluviales aux inondations fluviales. Les éléments tels que la pollution de l'eau, du sol ou de l'air sont difficilement déterminables en télédétection, bien que ces variables soient quantifiables, car elles sont généralement spécifiques à un site et une période donnée, notamment pour des pollutions ponctuelles. Le stockage du carbone n'est pas étudié en fonction d'où des solutions peuvent être implantées. En effet, le carbone est contenu dans l'atmosphère, celle-ci étant généralement considérée comme homogène à l'échelle planétaire (loi de diffusion ou loi de Fick). De ce constat découle le fait que chaque territoire est exposé de manière égale au dioxyde de carbone. Cela couplé au fait que les solutions basées sur la nature utilisent majoritairement des végétaux, dont la grande partie capte le CO₂, il n'a pas semblé pertinent de l'étudier en priorité. Il en va de même pour le bénéfice « biodiversité ».

Enfin, les besoins de bénéfices dépendant de la demande, ou plutôt co-bénéfices, peuvent être évalués de la même manière que Vrebos et al. (2015) le proposaient dans leur étude. Il s'agit cependant rarement de la première raison de l'implantation de solutions basées sur la nature, d'où une étude moins approfondie.

Les principaux risques étudiés et dont les solutions correspondantes feront l'objet de modélisation approfondies seront : sécheresse, érosion, glissements de terrain, vagues de chaleur et enfin inondations côtières et fluviales. Les mécanismes associés sont ainsi la distribution gravitaire, in situ, directionnel et omnidirectionnel. Ce choix a été réalisé car il correspond à certains domaines déjà réalisées par Antea Group Belgium, ce qui permettra d'approfondir les analyses de ces domaines.

5.3. Modules de placement des solution fondées sur la nature dans un territoire

Comme présenté précédemment, les solutions basées sur la nature doivent être rendue pertinentes spatialement. C'est dans ce but qu'a été réalisé la typologie précédente, car elle va permettre d'associer une solution basée sur la nature, qui « produit » (P) un phénomène permettant de mitiger un risque dont les personnes vont pouvoir bénéficier (B). Des zones peuvent ainsi être définies (P et B) mais également situées l'une en fonction de l'autre. Les analyses de risques tels que les font déjà les équipes d'Antea identifie les zones nécessitant des actions. Il est donc nécessaire que les zones de bénéfices (B) se superposent aux zones de risque, généralement dont l'intensité est la plus forte, afin de réduire les risques.

Antea réalisant généralement des études de risques au niveau national, il a été nécessaire de rechercher une autre échelle, plus cohérente avec la possibilité d'implémenter des solutions basées sur la nature (l'échelle nationale est beaucoup trop large). Vrebos et al. (2015), dans leur étude de distribution des services écosystémiques, proposaient une méthode consistant à attribuer à chaque tronçon hydrologique la valeur des écosystèmes présents dans le bassin versant drainé par ce tronçon. Cette méthode a été vérifiée par les paires ce qui en fait une base adéquate. Toutefois, au fil des analyses bibliographiques, telles qu'elles vont être décrites par la suite, cette méthode va se révéler insuffisante. En effet, certains critères d'implantation des solutions basées sur la nature sont pertinents à une grande échelle, tandis que leur variabilité n'est pas possible ou peu pertinente à l'échelle des tronçons hydrauliques. Afin de conserver une certaine pertinence dans la démarche, l'étude à l'échelle du bassin versant a semblé être une alternative plus adaptée. Il est ainsi aussi possible de faire varier la taille des

bassins versant, tout en restant à une échelle raisonnable par rapport aux critères d'implantation des solutions, afin d'adapter l'étude des possibilités de mise en œuvre de NBS, pour correspondre au mieux à la zone d'étude prospectée ainsi qu'à la résolution de l'étude souhaitée.

La méthode est basée sur l'utilisation de Système d'Information Géographique (SIG) et consiste ainsi à effectuer une analyse de chaque risque (sécheresse, érosion, glissements de terrain, vagues de chaleur et enfin inondations côtières et fluviales) à l'échelle de la zone d'étude complète (pays par exemple). Les valeurs de ceux-ci sont ensuite sommées spatialement ce qui donne la répartition spatiale des risques totaux sur le territoire d'étude. À cela est appliqué la délimitation des différents bassins versants. Une moyenne de risque par unité surfacique (UA/m² par exemple ; UA : Unité arbitraire) est ensuite déterminée à partir des surfaces respectives des bassins versants. Il est à noter que pour des bassins versants se prolongeant hors de la zone d'étude, il sera nécessaire de ne pas prendre en compte cette partie extérieure, que ce soit pour le calcul du risque ou le calcul de la superficie concernée, ce qui pourrait autrement mener à une sous-estimation du risque moyen sur le bassin versant. À la suite de cette opération, un nombre défini de bassin versant peut être sélectionné en fonction de la nécessité d'agir ; il est généralement entendu par là le bassin versant avec le risque moyen le plus élevé. En effet la notion de risque présente l'avantage de tenir compte à la fois de l'intensité de l'aléa, mais également la vulnérabilité des biens et des personnes, ce qui est plus cohérent pour effectuer le choix des zones d'intervention que de simplement étudier l'aléa, celui-ci pouvant se dérouler dans des lieux où peu d'enjeux sont présents, ce qui résulterait donc plutôt en un risque faible.

L'analyse pour l'implantation de NBS se fait ensuite par étude de bassin versant, alternativement pour chaque risque. La première partie se concentre sur les risques continentaux tandis que la seconde se focalise sur les risques côtiers, notamment les inondations côtières.

5.3.1. Planter des solutions basées sur la nature en zone continentale

Le premier risque à faire l'objet d'une étude de placement a été celui des glissements de terrain. Le mécanisme associé étant « in situ » (tout comme érosion et sécheresse), cela signifie qu'il est préférable d'implanter dans le bassin versant sélectionné les solutions basées sur la nature répondant à la fonction « régulation des glissements de terrain » citées dans l'inventaire sur le site même où le risque de glissement de terrain est le plus élevé. Les modules d'évaluation de glissements de terrain prennent notamment en compte les pentes locales ainsi que les caractéristiques du sol (Varnes, 1978), ce qui en fait la nécessité d'implanter les NBS directement sur site, et dans une mesure recouvrant au moins toute la zone concernée par le risque élevé de glissement de terrain

La seconde étude réalisée concerne les solutions basées sur la nature associées aux risques et mécanismes omnidirectionnels, à savoir les vagues de chaleur. La modélisation des effets sur logiciels de SIG associée à ces solutions est la distance **tampon**. Parmi ces NBS, deux grands types peuvent être distingués : les solutions dites « vertes » et celles « bleues ». Ces termes définissent les composants principaux des solutions. Les vertes présenteront donc plutôt des structures végétales tandis que les bleues utiliseront plutôt les propriétés découlant des points d'eau et des milieux humides. Pour chaque type de solution, il a été nécessaire de définir des paramètres afin de rendre la modélisation possible, et notamment une surface de fonctionnement minimale pour que l'effet de réduction de la température puisse être ressenti ainsi qu'une distance jusqu'à laquelle l'effet pouvait être ressenti. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2: Caractéristiques des solutions basées sur la nature visant à réduire l'intensité des vagues de chaleur

Techniques	Taille minimale effective	Rayon d'effet	Évolution
Solutions bleues	120m ² (120 à 1600m ³ pour au moins 0.5m de profondeur) pour des petits points d'eau	Petits points d'eau : jusqu'à 300m Zones majeures (mers, grands lacs) : jusqu'à 800m	Dans le rayon : médiane de 0.5°C, avec un maximum à 1.6°C pour les petits points d'eau, et jusqu'à 3.3°C pour des grands volumes
Solutions vertes	Couverture végétale de la zone > 35% de la surface	200m maximum en été (250m en hiver mais généralement inadéquat)	+10% de couverture végétale cause une réduction de : 0.16–0.55 °C (la nuit) 0.05–0.15 °C (le jour)

(Fan et al., 2022; Gupta et al., 2019; Jacobs et al., 2020; Wu & Zhang, 2019; Yan et al., 2020)

Il apparaît que les solutions basées sur la nature visant à mitiger les vagues de chaleurs ont une efficacité limitée. Ces valeurs sont toutefois des valeurs physiques ; il serait intéressant d'approfondir l'étude en menant une comparaison avec les températures dites biologiques ou ressenties car ces solutions sont aussi et avant tout destinées aux personnes et doivent donc leur être adaptées. Cependant, ces effets peuvent être cumulatifs étant donné que les solutions basées sur la nature peuvent être combinées au sein d'une même zone. Les solutions bleues, utilisant donc beaucoup d'eau, ne sont pour certaines pas adaptées à des climats très chauds qui causeraient l'évaporation de quantités importantes d'eau, ce qui n'est pas durable pour des points d'eau artificiels, mais également des problèmes de qualité d'eau à cause du réchauffement de celle-ci et le développement excessif d'organismes, dont potentiellement des pathogènes. Ces solutions ont toutefois des portées plus importantes.

Le dernier modèle abordé concerne les inondations pluviales et fluviales, associées au mécanisme de flux gravitaire. Trois composantes majeures peuvent être identifiées : les solutions concernant les plaines alluviales, celles concernant les milieux humides et enfin la restauration de la diversité d'écoulement et structurelle des cours d'eau (Guerrero et al., 2018). Ce module a fait l'objet de plus amples recherches du fait de la pluralité de solutions possibles et la complexité du fonctionnement fluvial. Ces recherches ont également donné lieu à la création d'un modèle QGis puis ArcGis (modèle builder) afin de profiter des fonctions d'hydrologie dans l'ensemble Spatial Analyst.

Chaque composante citée plus haut s'est vue attribuer plusieurs critères constitutifs permettant d'identifier, via des données caractérisant le terrain, des sites propices à l'implantation de ces solutions basées sur la nature. Ces critères sont divisés en plusieurs classes en fonction de leur correspondance aux besoins des solutions pour être efficaces et pérennes. La recherche bibliographique consistait ici à identifier des facteurs conditionnant l'implantation des NBS mais également définir les valeurs que devaient prendre ces facteurs pour être favorables ou non. La répartition est idéalement réalisée entre 3 classes pour chaque facteur, notées de 1 à 3, la 4^{ème} classe (non précisée) comportant toutes les autres valeurs de facteurs n'étant pas adaptées. Cependant certains ne pouvaient se voir appliquer cette règle. Les critères et la notation étaient alors adaptés.

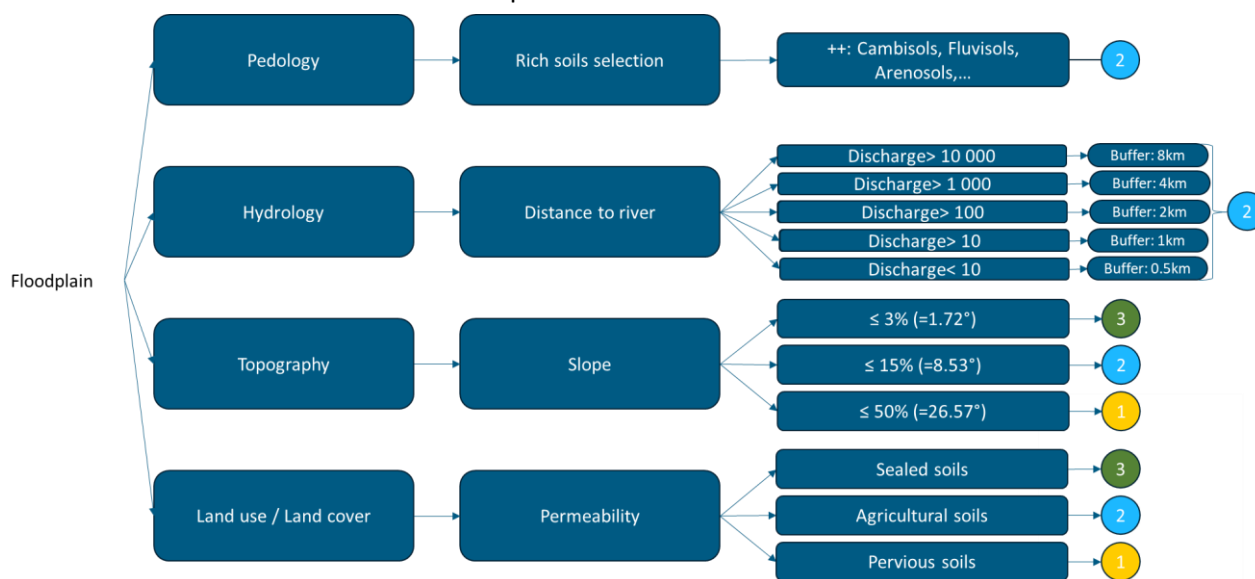


Figure 20: Représentation graphique du module de plaine alluviale

Pour les forêts alluviales, présentées en Figure 20, 4 paramètres (blocs de gauche) sont pris en compte : la pédologie, l'hydrologie, la topographie et l'occupation/la couverture des sols. Le bloc du milieu correspond à la variable du paramètre. Enfin à droite les blocs représentent les classes utilisées dans le modèle Qgis. Afin d'établir un premier modèle, toutes les variables ont été harmonisées sur une échelle de 0 à 3 pour être plus faciles à construire (nulle, faible, moyenne, élevée), hormis pour la distance à la rivière et les sols. Des recherches plus approfondies ou un examen par les pairs pourraient conduire à affiner ces classes ou en inclure de nouvelles. Pour développer davantage :

- La pédologie : sélection des sols correspondant à des sols organiques et alluviaux (Dunn & Stearns, 1987; Guerrero et al., 2018; Sheil et al., 2021) soient : Cambisols (B), Fluvisols (J), Arenosols (Q), Mollisols (M,...m), Acrisols (A) et Nitosols (N) selon la classification de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Une seule valeur est possible car aucune étude ne proposait de comparaison sur les fréquences d'occurrence des différents types de sols sous les plaines alluviales.
- L'hydrologie : la distance à la rivière s'appuie sur plusieurs études prenant en compte la proximité dans l'évaluation des risques d'inondation (Ahmadlou et al., 2021; Al-Hinai & Abdalla, 2021; Tehrany & Kumar, 2018). Les différentes classes ont été déterminées en fonction de l'ensemble de données déjà utilisé pour le modèle afin de réduire les entrées nécessaires. L'ensemble de données sur les rivières provient de Hydorivers et fournit une estimation du débit pour chaque tronçon du monde (extrait de modèle numérique de terrain (MNT)). Le champ « ORD_FLOW » des données citées précédemment est un indicateur d'ordre fluvial utilisant le débit estimé pour distinguer des classes de taille

logarithmiques : l'ordre 1 représente les tronçons fluviaux avec un débit moyen à long terme $\geq 100\,000\text{ m}^3/\text{s}$; l'ordre 2 représente les tronçons fluviaux avec un débit moyen à long terme $\geq 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ et $< 100\,000\text{ m}^3/\text{s}$; ... et l'ordre 10 représente les tronçons fluviaux avec un débit moyen à long terme $< 0,001\text{ m}^3/\text{s}$. L'utilisation d'une zone **tampon** au lieu d'une couche correspondant aux zones inondées pour chaque rivière est un moyen d'éviter l'obstruction causée par des digues ou des obstacles et également d'envisager les inondations pouvant se produire à beaucoup plus long terme, comme l'ont démontré Guerrero et al., 2018 en prévoyant plus loin qu'une crue de retour 200 ans par cette méthode. Pour traduire l'augmentation rapide de la surface inondée à mesure que le débit augmente, un doublement des distances **tampon** a été appliqué entre chaque classe. Cela permet également de distinguer clairement le réseau hydrologique à une plus grande échelle. Les classes attribuent donc à une rivière dont le débit est supérieur à $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ un **tampon** de 8km, un **tampon** de 4 km aux rivières de plus de $1000\text{ m}^3/\text{s}$... La notation de 2 a été appliquée sur le même principe que pour la pédologie, puisqu'il n'y a qu'une seule possibilité pour chaque tronçon ; un **tampon** de 2 km n'est pas mieux qu'un de 8 ou inversement, il s'adapte juste à la capacité de la rivière.

- La topographie : les forêts se développent préférentiellement sur des pentes faibles (Lundbäck et al., 2021) notamment car cela permet un ruissellement ralenti de l'eau, lors de pluies par exemple, facilitant la percolation dans le sol ce qui est donc favorable pour la croissance des arbres. Les classes ont été déterminées en fonction de la préférence biologique telle qu'expliquée précédemment mais aussi selon les capacités des équipements forestiers (devant opérer à des pentes inférieures à 50%) dans le cas où des opérations de maintenance pourraient être envisagées dans la plaine alluviale ou bien pour de la valorisation raisonnée de la ressource bois. La classe inférieure à 3% est une classe de pentes très faibles, proches des pentes naturelles de rivières de plaines et permettant ainsi une expansion plus facile des crues.
- L'occupation/la couverture des sols : lorsque tous les autres paramètres sont vérifiés, alors cela signifie que les zones identifiées correspondent théoriquement à des emplacements de forêts alluviales. Cependant, si l'occupation du sol ne correspond pas à une occupation de forêt alluviale, ou un équivalent (donc présentant un sol perméable), alors cela signifie qu'il est nécessaire d'agir pour restaurer cette perméabilité. C'est pourquoi les sols imperméables ont la note de 3 et les semi perméables (les sols agricoles présentent très généralement un tassement du sol, causé par le poids des engins agricoles, sous la profondeur atteignable par une charrue, appelé semelle) la note de 2, car ce sont ces zones là sur lesquels il est important d'agir. Les zones ayant une notation de 1 peuvent être améliorées mais leur fonctionnement est déjà proche de l'état naturel.

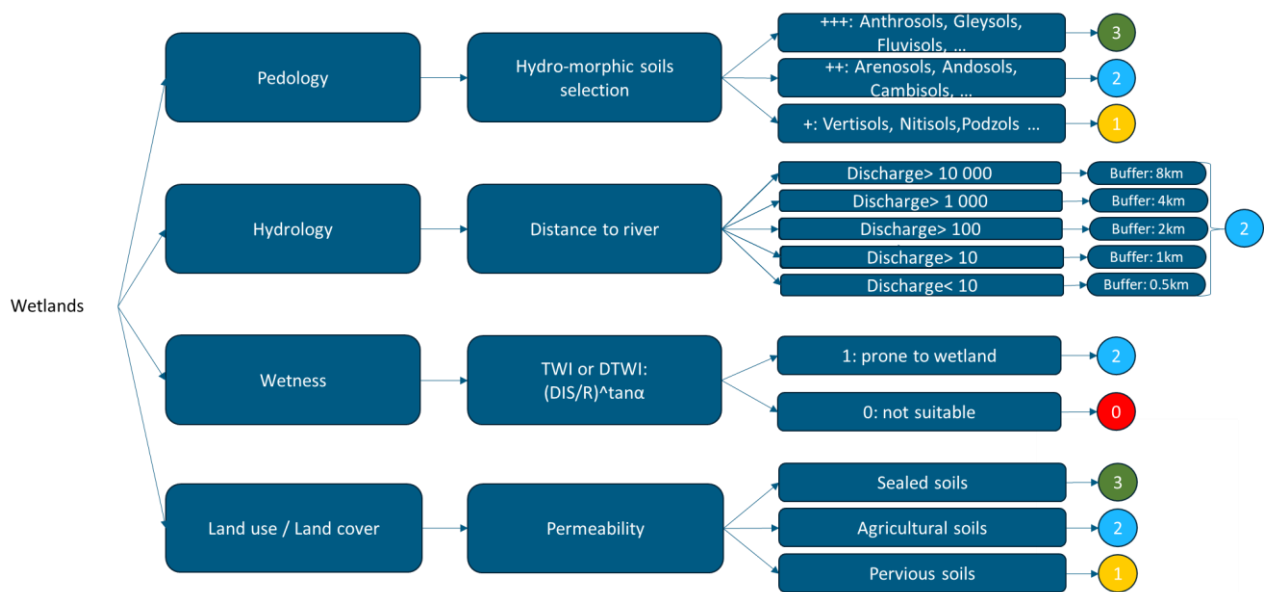


Figure 21: Représentation graphique du module de zone humide

Pareillement aux forêts alluviales, présentées en Figure 21, les zones humides sont définies par 4 paramètres : la pédologie, l'hydrologie, l'humidité et l'occupation/la couverture des sols. Les blocs représentent respectivement de gauche à droite le paramètre étudié, la variable concernée, les différentes classes au sein de cette variable et enfin la notation attribuée à chaque classe. Dans ce cas aussi un essai d'harmoniser les variables sur une échelle de 0 à 3 a été mené, cependant certaines variables ne le permettent pas (humidité et distance à la rivière). Des recherches plus approfondies ou un examen par les pairs pourraient conduire à affiner ces classes ou en inclure de nouvelles. Pour développer davantage :

- Les aptitudes hydro-morphiques des sols ont été déterminées lors de l'état de l'art, et ont mis en avant :
 - Une majeure part des zones humides est portée par des Anthrosols, Gleysols, Fluvisols, Planosols, Plinthosols, et Histosols ;
 - Une part moins importante réside sur les unités pédologiques gleyiques des Arenosols, Andosols, Cambisols, Solonetz, Solonchaks, Luvisols, Lixisols, Acrisols, et Alisols ;
 - Enfin, les Vertisols, Nitisols, et Ferralsols n'ont pas d'unités pédologiques gleyiques mais ils peuvent être artificiellement inondés. (Witt & Haefele, 2005)
 - Si l'on considère l'occurrence de ces sols identique à travers le monde, alors cela signifie que lorsque l'on étudie leur association à des zones humides, une plus grande proportion d'un sol par rapport à un autre sous des zones humides indique que ce sol est plus propice par ses caractéristiques à les porter. Cela explique pourquoi les sols les plus fréquents sous ces milieux sont associés à la note de 3 et les moins fréquents à 1. Les sols non pertinents ne sont pas sélectionnés.
- Le paramètre de distance à la rivière utilise les mêmes arguments que ceux présentés dans la section sur les forêts alluviales. En effet, pour former des zones humides il faut que le terrain présente des dépressions (voir la section DTWI) mais également que celles-ci soient dans l'aire d'atteinte par la rivière, pour permettre dans le même temps une réduction de la violence des crues. C'est pourquoi ce **tampon** est appliqué. Des zones

humides peuvent être créées en dehors de ces **tampons** ; elles agiront moins directement sur les crues mais toujours sur le captage des eaux météoriques.

- Le DTWI, soit « Deterministic Topographic Wetland Index » ou encore « indice topographique déterministe des zones humides » est une version « corrigée » du « Topographic Wetness Index » (TWI, Indice d'humidité topographique) car il évite certaines erreurs obtenues par le TWI en comparant le MNT brut à celui rempli (Bian et al., 2021) au lieu de n'utiliser que le rempli et l'accumulation de flux. Il est censé donner des valeurs de 0 ou 1 selon que la zone est susceptible de devenir humide ou non. Cependant, les premiers essais pour l'utiliser n'ont pas été couronnés de succès, donc un premier modèle utilisant simplement le TWI peut également être possible. Le DTWI est calculé par la différence entre le DEM rempli et le brut, ce qui donne la profondeur de dépression (« Depth In Sink », DIS), divisé par la résolution (en m) du MNT, le tout élevé à la puissance de tangente de la pente locale, la pente étant en degrés. L'attribution de valeurs binaires correspond bien avec le fait qu'une zone est apte à être humide ou non, il n'y a pas de demi-mesure.

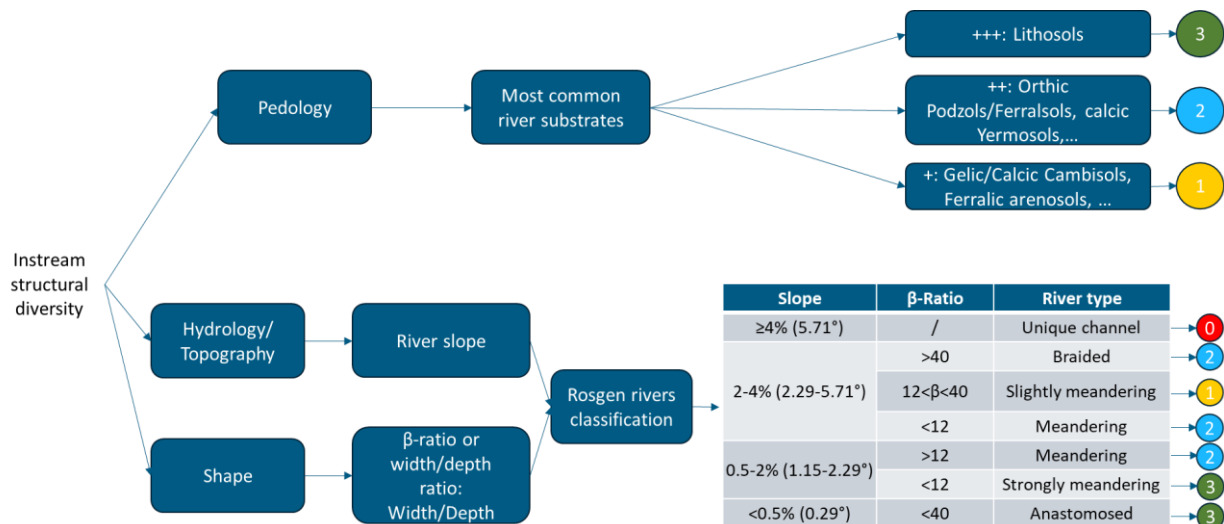


Figure 22: Représentation graphique du module de diversification des cours d'eau

Enfin, la restauration de la diversité d'écoulement et structurelle des cours d'eau, présentée en Figure 22, est composée de 3 paramètres étudiés : la pédologie, l'hydrologie/topographie et enfin la section du cours d'eau. Pour expliquer davantage :

- La pédologie : les sols supposés les plus aptes à recevoir des cours d'eau ont été déterminés par une analyse à l'échelle mondiale. À l'aide des jeux de données fournies par Hydrorivers (rivières du monde) ainsi que la FAO (« Digital Soil Map of the World » soit la carte numérique mondiale des sols), la longueur de rivières présente sur chaque substrat a pu être déterminée, ce qui a ensuite permis de calculer la proportion de rivière contenue dans chaque substrat par rapport au réseau hydrographique mondial. Les résultats ont révélé que :
 - Les substrats les plus courants sous les rivières du monde sont les Lithosols ;
 - Les seconds plus courants sont les Podzols orthiques, Ferralsols orthiques, Yermosols calciques, Arénosols cambiques, YERMOSOLS, Acrisols orthiques, Eaux intérieures ou océaniques, Dunes ou sables mouvants, Ferralsols xanthiques ;

- Enfin les troisièmes plus répandus sont les Cambisols géliques, Cambisols dystriques, Arénosols ferraliques, Xérosols calciques, Yermosols luviques, Régosols calcaires, Régosols géliques, Cambisols eutriques, Luvisols ferriques, Fluvisols eutriques, Luvisols orthiques, Vertisols chromiques, Kastanozems luviques, Gleysols eutriques, Podzoluvisols eutriques, Luvisols chromiques, Haplic Kastanozems, Histosols dystriques, Gleysols géliques, Yermosols hapliques, Gleysols dystriques.

Ces classes ont été définies à l'aide de la fonction de répartition en classes naturels (seuils de Jenks) sur ArcGis, avec une division en 5 classes. La troisième classe possède un nombre beaucoup plus important de substrats, cependant leurs proportions étaient relativement proches ce qui aurait été étrange de les séparer. La division en 7 classes de Jenks permet d'attribuer 5 substrats à la classe 3 mais cela la rend très sélective et pas représentative de la diversité possible.

- L'hydrologie/topographie et la section du cours d'eau sont liées afin de correspondre à la classification de Rosgen (Rosgen, 1994), qui établit une typologie des cours d'eau simplifiée, en ne se basant que sur 2 variables d'ajustement : la pente locale et le β -ratio, également appelé ratio de forme. Ce dernier se définit comme le rapport de la largeur de la rivière que divise la hauteur en eau. Ces données sont obtenues à partir des jeux de données de Hydorivers et de calculs développés dans l'étude menée par Andreadis et al. (2013). La base de données créée à la suite de cette étude, et disponible en ligne, a donc été utilisée pour l'application de la classification de Rosgen dans le programme SIG. La pente locale est extraite du MNT. L'attribution de notes à ce paramètre a été réalisée par la mesure arbitraire du risque que le tronçon concerné ait été anthropisé. Il est entendu par-là que les rivières très méandriformes et en anastomosées sont les plus souvent anthropisées car elles ont été contraintes dans des chenaux uniques ou presque, afin de récupérer des terres prospères. Ce sont donc celles qui sont le plus souvent modifiées et qui devraient être restaurées dans leur état naturel en priorité (d'où la note de 3), si cela est encore adapté au contexte actuel. Ce module ne donne en effet qu'une proposition, et ne doit en aucun cas remplacer une étude approfondie des conséquences qu'engendreraient de tels changements. Sur ce même principe, les rivières méandriformes et en tresses ont reçu la note de 2 car souvent anthropisées mais de manière moindre que les précédentes. Enfin les rivières implantées sur des pentes fortes ne sont généralement pas ou peu anthropisées étant donné que la pente ne permet pas beaucoup d'usages anthropiques des territoires à proximité mais également qu'il est compliqué de réduire davantage la taille du lit.

Ces trois composantes ont été rassemblées afin de former un modèle, comme le montre la Figure 23, pouvant être utilisé dans des logiciels de SIG tels que Arcgis, afin d'obtenir une analyse rapide et uniformisée entre plusieurs territoires. Cela a permis la constitution d'un dossier comportant le « matériel nécessaire » et pouvant être renouvelé pour chaque étude. Ce dossier comporte :

- Les entrées communes à tous les cas du monde : les couches de rivières mondiales possédant les données de débit, de largeur et de profondeur, la carte des sols du monde
- Les fichiers nécessaires au fonctionnement de l'algorithme : les fichiers textes de reclassification pour attribuer les valeurs adéquates aux différentes classes

- Les dossiers devant recevoir les couches propres à chaque étude : le bassin versant étudié, le MNT, le raster d'occupation des sols.

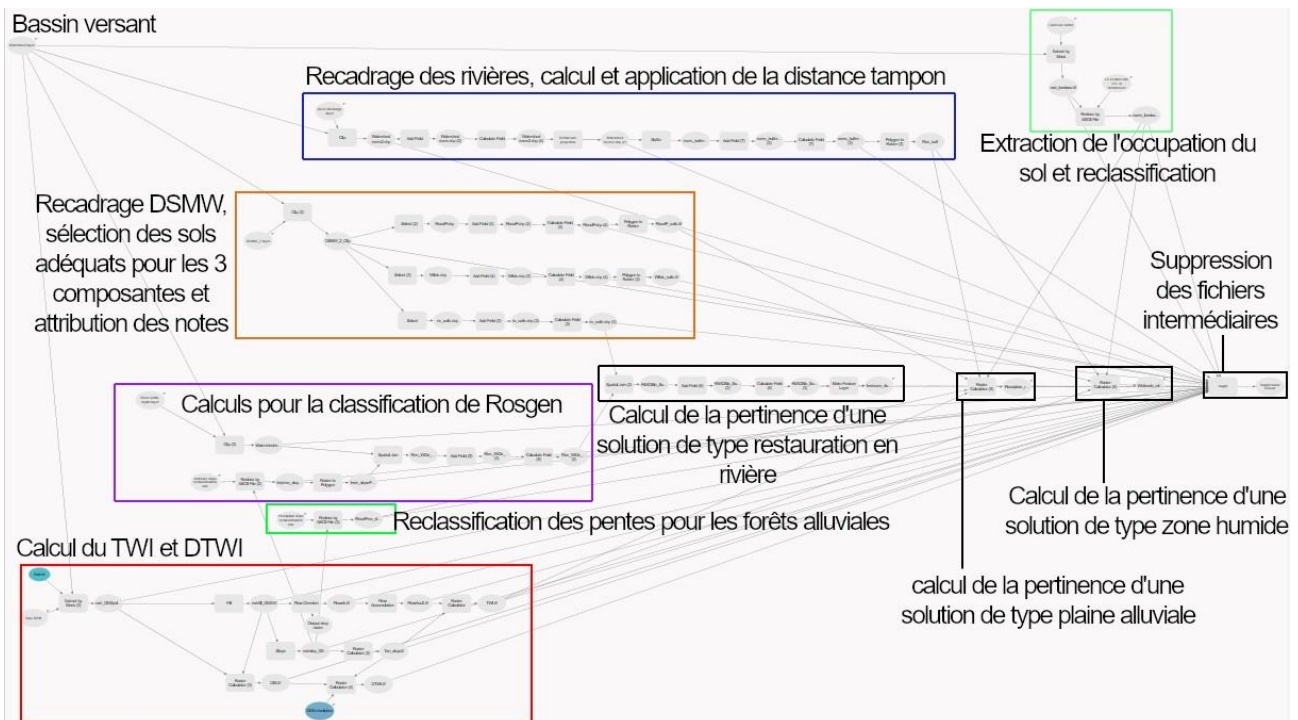


Figure 23: Explication du modèle Modelbuilder pour identifier des zones d'implantation de NBS

Le modèle est organisé par sections, de manière à éviter le recouplement d'un trop grand nombre de lignes et permettre un fonctionnement en parallèle et linéaire. Les sections identifient des thèmes et sont regroupées autour d'une entrée spécifique (sol, occupation des sols, ...). Le code Python associé à ce modèle est fourni en **Annexe E**. La Figure 23 montre que le modèle aboutit à 3 livrables sous forme de couches cartographiques. La pertinence des solutions de type zone humide et plaine alluviale est donnée sous forme de polygones dont la valeur varie de 1 à 10, tandis que la pertinence pour des NBS en rivière est symbolisée le long des tronçons hydrologiques avec des valeurs variant de 0 à 6. Un score élevé signifie une aptitude et une priorité plus importante pour l'implantation d'une solution basée sur la nature.

Ainsi, l'utilisateur du modèle souhaitant effectuer une analyse doit seulement joindre les couches de bassin versant souhaité, de MNT et d'occupation des sols afin que son étude soit réalisée. Cela fait de ce modèle un modèle relativement universel car il ne nécessite pas de données spécifiques et difficiles à obtenir. Cet outil théorique est donc utilisable même dans des régions où peu de données sont disponibles.

5.3.2. Analyse du territoire pour implanter de solutions basées sur la nature en Ouganda.

L'analyse porte sur le bassin versant de la rivière Semliki, présentée précédemment. Aucune évaluation précise de risque n'a été faite avant l'analyse des possibilités d'implantation des solutions, donc les conclusions pouvant être tirées resteront incomplètes. Comme il n'y a pas d'interface avec le milieu marin, et que le modèle côtier n'est pas fonctionnel, il n'y aura pas d'analyse de ce point-ci.

Le modèle n'est pas encore en mesure d'être utilisé complètement, certaines fonctions n'étant pas encore opérationnelles en étant associées aux autres dans Arcgis. Seulement quelques cartes contenant des données intermédiaires pourront être présentées ici. La fonction de calcul puis de reclassification des pentes du territoire est notamment un élément bloquant de manière importante la

production de livrables, car cela empêche de produire les dernières couches utilisant les informations de pente pour la pertinence des zones humides, des plaines alluviales et des rivières.

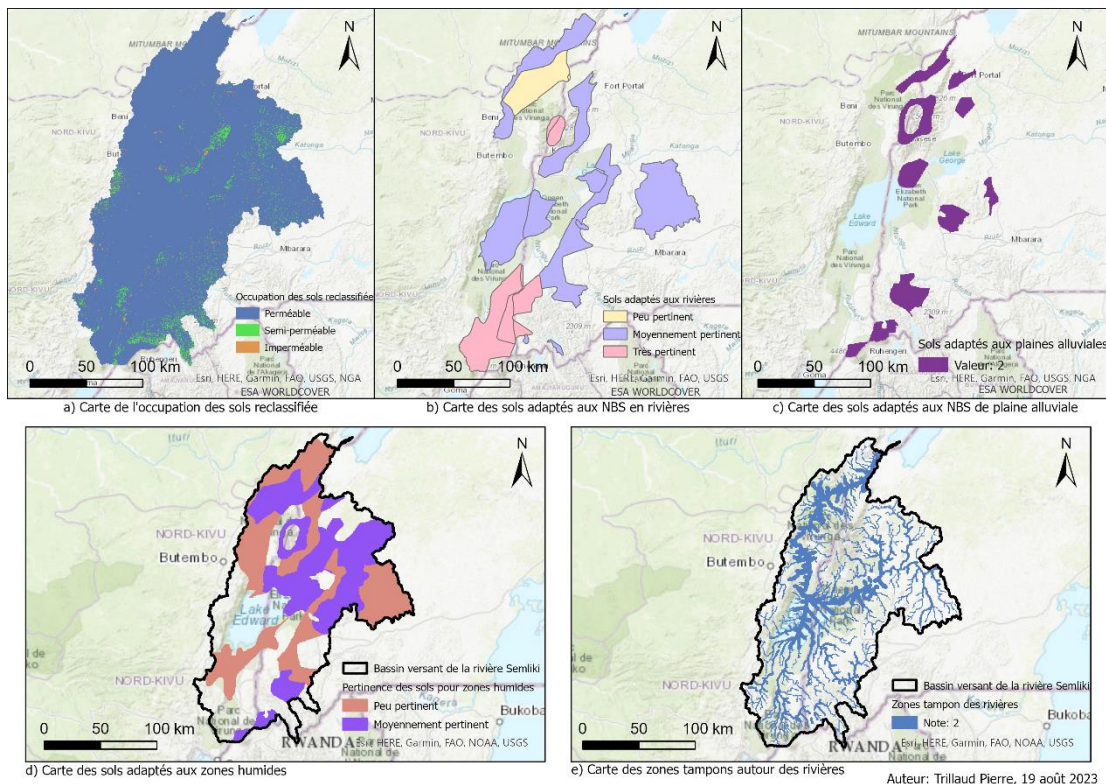


Figure 24: Différentes couches intermédiaires dans l'application du modèle de NBS continentales dans le bassin versant de la rivière Semliki

Il est cependant possible de présenter l'occupation des sols reclassifiée, les sols sélectionnés car répondant aux critères pour des NBS contenues dans les composantes de plaine alluviale, zone humide et rivières, et enfin les zones tampons ajoutant un « bonus » aux zones à proximité directe des rivières. Toutes ces cartes sont présentées dans la Figure 24. La carte d'occupation des sols reclassifiée met en avant la faible présence de zones imperméables, généralement correspondant aux zones urbanisées, et une dominance nette de zones naturelles, ou, en tout cas, perméables. En ce qui concerne les zones ayant été sélectionnées pour l'implantation de solutions fondées sur la nature, il est à noter qu'une importante superficie semble adéquate. Pour les plaines alluviales et l'application de NBS en rivières, ces zones sont réparties à travers le bassin versant, tandis que pour l'implantation de zones humides, ces sites préférentiels sont plutôt accumulés à proximité de l'aval, où les sols sont relativement plans. La nature du sol a certainement été influencée par l'accumulation d'eau étant donné que ces zones sont à l'aval. Enfin, les zones tampons permettent d'identifier aisément le réseau hydrographique et distinguer les cours d'eau majeurs du bassin versant. Il résulte de ces cartes le constat que le bassin versant semble présenter de nombreuses zones potentielles pour l'implantation de solutions basées sur la nature, ce qui ouvre des possibilités d'études et d'amélioration de la qualité de vie des citoyens en réduisant les risques sur ce territoire.

5.3.3. Protéger les côtes par les solutions fondées sur la nature

Cette étude concerne les solutions basées sur la nature associées aux risques et mécanismes directionnels, donc généralement les protections côtières contre les inondations. De la même manière que pour les flux gravitaires, ce module possède 3 composantes caractéristiques, à savoir : les zones humides côtières, les structures immergées et enfin les dunes et côtes.

Ce modèle se base sur les mêmes principes que le modèle gravitaire et fonctionnera pour les bassins versants ayant une zone de contact avec le milieu marin. Les représentations graphiques de ce modèle sont présentées en **Annexe F** car celui-ci n'est pas encore terminé et de nombreuses variables n'ont pas encore de classes qui ont pu être définies, ce qui ne permet pas de déterminer des zones de plus ou moins grande pertinence. Cependant quelques critères sont tout de même complets :

Pour les zones humides côtières, il est avant tout primordial d'identifier les zones qui vont être atteintes par la montée des eaux causée par le réchauffement climatique ou bien des événements climatiques tels que des tempêtes. Contrairement aux rivières, où il est nécessaire d'appliquer une zone **tampon** ou bien de simuler des inondations, l'étude des inondations côtières peut se faire simplement à partir du MNT. En effet, il suffit de sélectionner les zones dont l'altitude est inférieure à l'augmentation du niveau des mers que présente le scénario choisi (généralement des scénarios du GIEC) pour identifier les zones pouvant être atteintes par les inondations. Les hauteurs sélectionnées doivent cependant être en accord avec les prévisions du GIEC car toutes les côtes ne sont pas exposées à la même montée des eaux. Tout comme les zones humides continentales, il est nécessaire de s'intéresser aux substrats devant être présents sous les zones humides. En effet, ils conditionnent la formation ou non de zones humides. Des sols trop perméables pourraient être néfastes car ils mèneraient à des intrusions salines dans les aquifères, dégradant leur qualité et réduisant les usages possibles. Il est donc doublement important que les sols soient hydromorphes pour conserver une saturation en eau et permettre le développement de la biodiversité associée aux milieux humides marins. Cette biodiversité permet de lutter à la fois contre la hausse du niveau de la mer, mais également contre les vagues et l'érosion côtière.

En ce qui concerne les solutions considérées comme immergées, elles se différencient des autres solutions car elles comportent deux grands types de solutions possibles, à savoir les mangroves (leurs pieds sont immergés) ainsi que les constructions « autres » implantées plus au large, et complètement submergées visant à ralentir l'arrivée des vagues, le transport sédimentaire, ... Il est donc nécessaire d'effectuer des classes cohérentes pour ces 2 types. Cependant, parfois les variables ne permettent pas cette dualité. Cela est notamment le cas pour les variables de profondeur en eau et de distance à la côte. En effet, les mangroves apprécient plutôt les espaces intertidaux plats (hauteur d'eau d'environ 1.4 m) tandis que les autres solutions seront immergées plus loin de la côte, aux environs de 100 m, ce qui induit des profondeurs généralement plus importantes. L'implantation de ce type de NBS dépend surtout de la hauteur de la construction et la hauteur d'eau, dont le rapport du premier sur le second doit rester inférieur à 1.25 (Lalaut, 1984) et placé à une distance de 1 (J. Chapon, 1978 in Lalaut, 1984) à 2.5 longueurs d'ondes de la côte. En effet :

① $L_1/L = 5/4$ (L_1 : longueur du brise lame, L : longueur d'onde de la houle) (Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique (1956) in Lalaut, 1984)

② $L_2 < 2L_1$ (L_2 : distance à la côte, L_1 : longueur du brise-lames) (Laboratoire National d'Hydraulique (1972) in Lalaut, 1984)

Donc ① et ② donne : $L_2 < \frac{5}{2}L \Leftrightarrow L_2 < 2.5L$

La longueur d'onde n'est cependant pas facilement déterminable, et les données sont peu nombreuses à ce sujet. Néanmoins, certains rasters disponibles en ligne sur le site du « Copernicus marine service », site européen de données sur les océans, permettent d'accéder aux périodes moyennes des vagues en tout point des côtes marines mondiales. Comme toute ondulation, une équation relie la longueur d'onde des vagues à leur période. Cette équation est : $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$ avec λ la longueur d'onde, g la valeur du champ de pesanteur et T la période des vagues (« Lab 6.3 », 2021). Les zones d'implantation optimales de chaque type peuvent ainsi être identifiées.

Il subsiste un problème au niveau de l'implantation des NBS sous le niveau de la mer car celles-ci nécessitent des substrats particuliers, comme par exemple des substrats fins pour les mangroves (World Bank, 2021), mais il n'existe actuellement pas de carte en libre accès présentant les substrats sous-marins, limitant ainsi fortement la pertinence des zones identifiées étant donné qu'un facteur important est négligé.

L'exposition, qui vaut également pour les dunes, permet, à l'aide d'un jeu de données issu du « Copernicus marine service » et de la détermination de l'exposition des côtes, de savoir si les vagues percutent perpendiculairement les côtes, ce qui entraîne une érosion maximale, de manière oblique (érosion plus lente) ou encore de manière latérale. Ce paramètre vaut aussi pour les mangroves puisqu'elles supportent mal l'exposition directe aux vagues, surtout lors de leur phase juvénile.

Enfin, les dunes sont définies par leur lithologie, conditionnant l'érodibilité de la côte et donc la nécessité ou non de la protéger. Trois classes d'érodibilité ont pu être identifiées, auxquelles ont été associées des notes de priorité ; 3 représente les roches très facilement érodables (évacuoirs par exemple) tandis que les roches en 1 ne le sont que peu. Figurent dans les classes :

- Classe érodibilité 3 : Évaporites ;
- Classe érodibilité 2 : Sédiments non consolidés, Roches sédimentaires siliciclastiques, Roches sédimentaires mixtes, Pyroclastiques, Roches sédimentaires carbonatées ;
- Classe érodibilité 1 : Roches Volcaniques Acides, Roches Volcaniques Intermédiaires, Roches Volcaniques Basiques, Roches Métamorphiques.

Les pentes spécifiées proviennent de la capacité limite des substrats trouvés généralement en milieu côtier, le 35% faisant référence aux matériaux sableux majoritairement et 50% plutôt à des roches. Cela correspond également à la pente maximale pour l'implantation d'arbres tel qu'expliqué précédemment.

Enfin la hauteur des vagues est un facteur conditionnant fortement l'érosion côtière (Huppert et al., 2020), puisque de grosses vagues fréquentes sont très érosives, bien plus que des petites car elles sont moins énergétiques. Cependant, au stade actuel, l'étude n'a pas permis de développer de classes de valeurs, d'autant que les hauteurs de vagues varient très fortement à l'échelle mondiale. Il serait donc mieux d'adopter une approche relative, par rapport à la moyenne des vagues ou la médiane.

Comme le module de flux gravitaire, celui-ci aboutit à la création de 3 cartes indiquant les zones favorables, s'il y en a sur le territoire d'étude, à l'implantation de solutions basées sur la nature, conformément aux besoins de chaque composante. Un dossier est également créé pour contenir tous les composants essentiels qui peuvent être fournis à l'échelle mondiale, de sorte que l'utilisateur ait le moins d'informations supplémentaires à acquérir. Ces modules représentent une aide à la décision en identifiant de potentielles zones d'implantations, mais des études complémentaires sont nécessaires afin de cerner l'entiereté des enjeux de restauration.

6. Conclusion

Les solutions basées sur la nature, bien que relativement récentes, sont toutefois très présentes dans la littérature. Les informations y étant contenues offrent ainsi la possibilité de mettre en avant le lien existant entre les sociétés humaines et la nature, ainsi que la façon dont les premières peuvent employer la seconde afin d'atteindre leurs buts. Le lien étroit que la nature possède avec la gestion du risque est d'autant plus mise en avant que des décennies de dégradation de ces écosystèmes a généré une diminution de l'efficacité de leurs processus de vie et donc une augmentation des risques naturels, ce qui

a amené ces derniers à devenir un problème majeur des sociétés modernes. Restaurer les écosystèmes pour accroître la protection contre les risques est une tâche ardue à réaliser car la nature est très difficilement imitable. La mise en place de principes pour une bonne application des solutions basées sur la nature réduit les possibilités de « dysfonctionnement » des NBS. Cependant, cela reste un concept relativement compliqué à lier au risque dans la réalité et à appliquer à grande échelle. La réalisation de modules de placement, bien que très simplistes pour l'instant, pose cependant les bases pour l'étude des possibilités d'implantation de solution basées sur la nature à une échelle relativement intéressante du point de vue écologique.

Des points d'améliorations à envisager pour les outils présentés dans ce rapport pourraient avant tout d'être complétés car de nombreuses données sont encore manquantes, comme par exemple dans l'inventaire ou bien le module de placement côtier. Suite à cela, une vérification par les paires semble être un passage nécessaire pour approuver à la fois la méthode et les valeurs implémentées dans les outils. Corriger les problèmes liés à l'utilisation du DTWI, qui est encore méconnu, est également un point important qui aiderait à l'obtention de résultats pertinents. Enrichir les paramètres constituant les modèles est également une voie à explorer bien qu'elle mobilise des ressources en quantité (temps, personnes, ressources numériques, ...). L'inventaire pourrait également être amélioré en ajoutant dans l'inventaire des NBS un champ permettant de différencier les NBS unités des NBS interventions.

Enfin, Il pourrait être relativement intéressant pour Antea group de pouvoir créer des liens entre tous les outils que sont ceux permettant l'évaluation des risques présents sur un territoire, le module de placement des solutions et l'inventaire. Il est ainsi aisément imaginable de procéder à l'évaluation des risques sur une zone définie, qui va identifier les zones à risque(s), avant de faire une analyse des possibilités d'implantation de NBS. L'utilisateur pourra alors choisir d'appliquer dans les zones identifiées des solutions présentes dans l'inventaire. Le logiciel pourra alors, à partir des valeurs d'affinité contenues dans l'inventaire, effectuer une nouvelle analyse de risque et évaluer les différences avant/après implantation pour déterminer, avec plusieurs scénarios de solutions, la meilleure option de réduction des risques pour la société.

Ce stage a développé mon esprit de recherche des informations dans de nombreux ouvrages et m'a permis d'acquérir de l'aisance à l'oral, pour effectuer des présentations, des transferts de connaissances et chercher des solutions au sein d'une équipe. L'importante part de travail en autonomie a très vite nécessité la mise en place d'une méthodologie de recherche, la définition d'objectifs et une conscience de chaque tâche afin d'éviter de trop s'éloigner de l'axe principal de recherche, sans également sombrer dans une étude focalisée sur un domaine, trop théorique ou trop pratique. Développer un modèle de cartographie permet d'explorer de nombreuses fonctions de ces logiciels, mais également d'en observer leurs limites, notamment avec le travail sur des jeux de données très volumineux. Ce stage au sein du bureau Antea Group Belgium, antenne de Gand, a été très enrichissant et formateur.

7. Bibliographie.

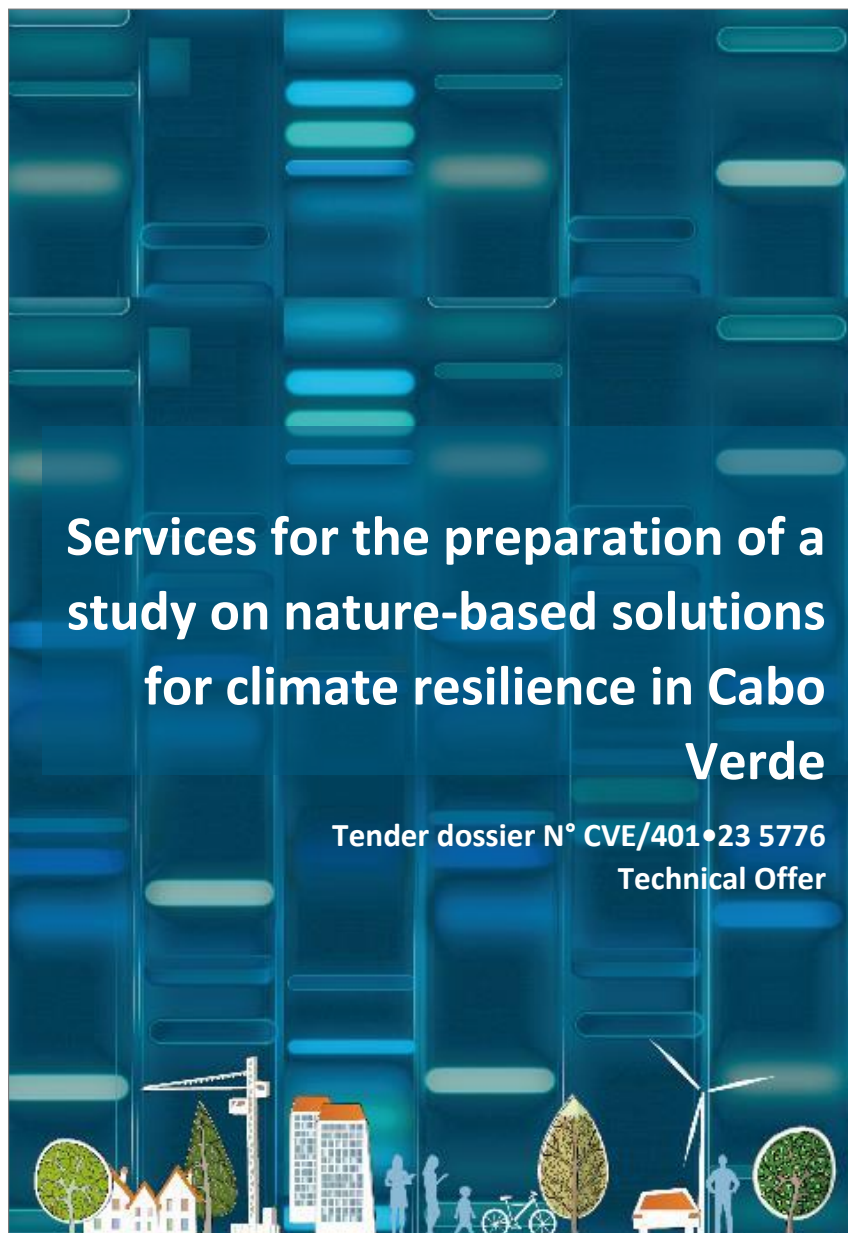
- Ahmadlou, M., Al-Fugara, A., Al-Shabeeb, A. R., Arora, A., Al-Adamat, R., Pham, Q. B., Al-Ansari, N., Linh, N. T. T., & Sajedi, H. (2021). Flood susceptibility mapping and assessment using a novel deep learning model combining multilayer perceptron and autoencoder neural networks. *Journal of Flood Risk Management*, 14(1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12683>
- Al-Hinai, H., & Abdalla, R. (2021). Mapping Coastal Flood Susceptible Areas Using Shannon's Entropy Model : The Case of Muscat Governorate, Oman. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 252. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040252>
- Andreadis, K. M., Schumann, G. J.-P., & Pavelsky, T. (2013). A simple global river bankfull width and depth database : Data and Analysis Note. *Water Resources Research*, 49(10), 7164-7168. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20440>
- Beaumont, P., Braithwaite, R., Drewery, D. J., Gornitz, V., Grove, J. M., Haeberli, W., Higashi, A., Leiva, J. C., Lingle, C. S., Lorus, C., Raper, S. C. B., Wold, B., & Woodworth, P. (2018). *Far climate change : Scientific assessment of climate change : Sea level rise*.
- Bian, L., Melesse, A. M., Leon, A. S., Verma, V., & Yin, Z. (2021). A Deterministic Topographic Wetland Index Based on LiDAR-Derived DEM for Delineating Open-Water Wetlands. *Water*, 13(18), 2487. <https://doi.org/10.3390/w13182487>
- Castellar, J. A. C., Popartan, L. A., Pueyo-Ros, J., Atanasova, N., Langergraber, G., Säumel, I., Corominas, L., Comas, J., & Acuña, V. (2021). Nature-based solutions in the urban context : Terminology, classification and scoring for urban challenges and ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 779, 146237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146237>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (Éds.). (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Dunn, C. P., & Stearns, F. (1987). A Comparison of Vegetation and Soils in Floodplain and Basin Forested Wetlands of Southeastern Wisconsin. *American Midland Naturalist*, 118(2), 375. <https://doi.org/10.2307/2425794>
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., Lamarque, P., Reuter, K., Smith, M., Van Ham, C., Weisser, W. W., & Le Roux, X. (2015). Nature-based Solutions : New Influence for Environmental Management and Research in Europe. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4), 243-248. <https://doi.org/10.14512/gaia.24.4.9>
- Fan, S., Li, Y., Zhang, M., Li, K., Xie, Y., & Dong, L. (2022). Spatial differentiation of neighborhood climates and their response to surrounding land cover composition : A case study in Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 826, 154001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154001>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2007). *Changements Climatiques 2007 : Rapport de synthèse*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_fr.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2014). *Changements Climatiques 2014 ANNEXE I Guide de consultation*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/AR5_SYR_Glossary_fr.pdf

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2023). *Synthesis report of the ipcc sixth assessment report (AR6) Annex I - Glossary*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_Annex-I.pdf
- Guerrero, P., Haase, D., & Albert, C. (2018). Locating Spatial Opportunities for Nature-Based Solutions : A River Landscape Application. *Water*, 10(12), 1869. <https://doi.org/10.3390/w10121869>
- Gupta, N., Mathew, A., & Khandelwal, S. (2019). Analysis of cooling effect of water bodies on land surface temperature in nearby region : A case study of Ahmedabad and Chandigarh cities in India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.007>
- Huppert, K. L., Perron, J. T., & Ashton, A. D. (2020). The influence of wave power on bedrock sea-cliff erosion in the Hawaiian Islands. *Geology*, 48(5), 499-503. <https://doi.org/10.1130/G47113.1>
- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesão, J., Lenzholzer, S., & Kluck, J. (2020). Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate*, 32, 100607. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100607>
- Lab 6.3. (2021, juin 28). *Ocean Data Lab*. <https://datalab.marine.rutgers.edu/ooi-lab-exercises/lab-6-ocean-waves-linking-the-marine-atmosphere-and-the-ocean-surface/lab-6-3/>
- Lalaut, Y. (1984). Rapport III. 3 utilisation des brise-lames immergés en mer à marée. *L'hydraulique et la maitrise du littoral. Problèmes côtiers posés par le mouvement des sédiments et la pollution. Dix-huitièmes journées de l'hydraulique. Marseille, 11-13 septembre 1984. Tome 3, 1984*. https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1984_act_18_3_4893
- Lundbäck, M., Persson, H., Häggström, C., & Nordfjell, T. (2021). Global analysis of the slope of forest land. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(1), 54-69. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa021>
- Millennium Ecosystem Assessment (Program) (Éd.). (2005). *Ecosystems and human well-being : Synthesis*. Island Press.
- Ranganathan, J., & World Resources Institute (Éds.). (2008). *Ecosystem services : A guide for decision makers*. World Resources Institute.
- Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *CATENA*, 22(3), 169-199. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9)
- Sheil, D., Boissière, M., Van Heist, M., Rachman, I., Basuki, I., Wan, M., & Watopa, Y. (2021). The Floodplain Forests of the Mamberamo Basin, Papua, Indonesia (Western New Guinea) : Vegetation, Soils, and Local Use. *Forests*, 12(12), 1790. <https://doi.org/10.3390/f12121790>
- Tehrany, M. S., & Kumar, L. (2018). The application of a Dempster–Shafer-based evidential belief function in flood susceptibility mapping and comparison with frequency ratio and logistic regression methods. *Environmental Earth Sciences*, 77(13), 490. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7667-0>
- Van Zanten, B. T., Gutierrez Goizueta, G., Brander, L. M., Gonzalez Reguero, B., Griffin, R., Macleod, K. K., Alves Belouqui, A. I., Midgley, A., Herrera Garcia, L. D., & Jongman, B. (2023). *Assessing the Benefits and Costs of Nature-Based Solutions for Climate Resilience : A Guideline for Project Developers*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/39811>
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement, types and processes.pdf*.
- Vrebos, D., Staes, J., Vandenbroucke, T., D'Haeyer, T., Johnston, R., Muhumuza, M., Kasabeke, C., & Meire, P. (2015). Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions. *Ecosystem Services*, 13, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.11.005>

- Witt, C., & Haefele, S. M. (2005). PADDY SOILS. In D. Hillel (Éd.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (p. 141-150). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00286-1>
- World Bank. (2021). *A Catalogue of Nature-Based Solutions for Urban Resilience*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/36507>
- World Bank Climate Change Knowledge Portal. (s. d.). Consulté 13 août 2023, à l'adresse <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>
- Wu, Z., & Zhang, Y. (2019). Water Bodies' Cooling Effects on Urban Land Daytime Surface Temperature : Ecosystem Service Reducing Heat Island Effect. *Sustainability*, 11(3), 787. <https://doi.org/10.3390/su11030787>
- Yan, C., Guo, Q., Li, H., Li, L., & Qiu, G. Y. (2020). Quantifying the cooling effect of urban vegetation by mobile traverse method : A local-scale urban heat island study in a subtropical megacity. *Building and Environment*, 169, 106541. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106541>

8. Annexes

8.1. **Annexe A : Réponse à l'appel d'offre du gouvernement de Cap-Vert (parties évaluation des risques et proposition de NBS)**



Antea Group

Understanding today.
Improving tomorrow.

Colophon

Assignment

Services for the preparation of a study on nature-based solutions for climate resilience in Cabo Verde.[Locatie]

Client

Program CVE/401
c/o Lux-Development
Carla Santos
Carla.santos@luxdev.lu
[Adresregel 2]

Applicant – registered office

Antea Belgium nv
Roderveldlaan 1
2600 Antwerp
T: +32(0)3 221 55 00
<http://www.anteagroup.be/en-be/>
Antea Group is ISO9001 certified

Contact

Antea Group
Tom D'Haeyer
International Business Development Manager
M: +32494533187
E: tom.dhaeyer@anteagroup.be

Document

4806332003_Antea Group Technical offer.docx

Offer staff/authors

Ivo Van de Moortel, project manager
Alexander De Ruijter, project leader
Mahugnon Serge Djohy, Senior Climate Risk and Vulnerability Assessment Expert

Date	Statut/revision	Release
21 augustus 2023	1.0	Tom D'Haeyer, International Business Development Manager

Table of contents

1	STATEMENT OF GOOD STANDING	1
2	Methodological note	3
2.1	INTERPRETATION AND ANALYSIS OF THE TOR	3
2.1.1	Context and aim of the study	3
2.2	METHOD	4
2.2.1	TEAM	Erreur ! Signet non défini.
2.2.1.1	Principal experts	Erreur ! Signet non défini.
2.2.1.2	Back-up team	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2	OVERALL APPROACH	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3	IMPLEMENTATION	4
2.2.3.1	Inception meeting	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3.2	Literature review: Baseline assessment, identification of needs and criteria	4
2.2.3.3	Screening and pre-selection of existing methods	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3.4	Comparison of vulnerability assessment methods and selection approach	Erreur !
	Signet non défini.	
2.2.3.5	Comparison of vulnerability indices for Cape Verde	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3.6	Presentation of selected methods	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3.7	Capitalization	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3.8	Project management & support tasks	Erreur ! Signet non défini.

1 STATEMENT OF GOOD STANDING

To the attention of: Climate Action Programme (CVE/401) c/o Lux-Development

Subject: Tender No: CVE/401•23 5776

Contract title: Services for the preparation of a study on nature-based solutions for climate resilience

I (We), the undersigned, (Surname, first name), in my (our) capacity as (position), for the company (name of the company), established in, certify that the company that I (we) represent:

1. Is not bankrupt, insolvency, is not being wound up, has not ceased operations, is not having its affairs administered by the courts, has not entered into an arrangement with creditors and is not in any analogous situation arising from a similar procedure provided for in national legislation or regulations;
2. Is not the subject of proceedings for a declaration of bankruptcy, of administration by the court, of winding up, of an arrangement with creditors or of any other proceedings of that nature in national legislation and regulations;

3. Has not been convicted of an offence concerning professional conduct by a judgment that has the force of res judicata;
4. Has not been convicted of an offence concerning environmental crimes and actions contrary to environmental regulations (regardless of the country) by a judgment that has the force of res judicata;
5. Has fulfilled its obligations relating to the payment of social security contributions in accordance with the legal provisions of the country in which it is established or with those of the country of awarding authority;
6. Has fulfilled its obligations relating to the payment of taxes in accordance with the legal provisions of the country in which it is established or with those of the country of the awarding authority;
7. Has not been guilty of serious misrepresentation in supplying information in a tender procedure;
8. Has not been declared in breach of its contractual obligations in the performance of another contract with the same contracting authority and/or another contract financed by the donor in the country of the contracting authority and/or any other country;
9. Is not banned from participating in calls for tenders issued by other donors or is not excluded from public procurement in the country of the contracting authority and/or any other country;
10. Has not been the subject of a final judgment or a final administrative decision for conducts related to a criminal organisation;
11. Has not been the subject of a final judgment or a final administrative decision concerning the establishment of an entity with the intention of tax evasion, social or other legal obligations applicable according to the legal provisions of the country where it is established or those of the country of the contracting authority.

I (We) am (are) aware that the authority awarding the contract is entitled to request proof that the company which I (we) represent is not in any of the situations referred to above before it awards the contract.

Done in (place) on (date)

The tenderer

Signature and stamp

2 Methodological note

2.1 INTERPRETATION AND ANALYSIS OF THE TOR

2.1.1 Context and aim of the study

The Government of Luxembourg has a long standing cooperation relationship with Cabo Verde, going back to the 1980s, with the signing in 1993 of a first general cooperation agreement defining the general framework for cooperation activity between the two countries in the cultural, scientific, technical, financial and economic fields.

The new Indicative Cooperation Program (PIC) for 2021-2025 funded with Luxembourg's International Climate Finance in addition to the Official Development Assistance is intervening along the Development-Climate-Energy Nexus. The aim of the new Climate Action Program is to achieve a paradigm shift, combining emission reductions with socio-economic resilience and ecological resilience of citizens, ecosystems, and assets, in the face of climate change.

The intervention logic of the Climate Action Program is defined according to two outcome areas, which aim firstly to strengthen the upcoming climate governance, especially the implementation of the updated Nationally Determined Contribution (NDC) and the National Adaptation Plan (NAP), and secondly to increase the national resilience in order to face increasing natural hazards related to climate change in Cabo Verde.

The climate challenges which Cabo Verde needs to respond to require great changes in terms of development to become a sustainable and resilient country. The second Strategic Plan for Sustainable Development (PEDS), will guide these transformations related to its climate pillar through key sectors.

To implement a climate governance focusing on resilience, a particular study effort will be made regarding strategic and innovative approaches, such as nature-based solutions. With highly diversified landscapes, fauna and flora, Cabo Verde possess well suited assets to establish nature-based projects. Many socio-ecological issues can be tackled this way, such as Disaster Risk Reduction, climate adaptation and mitigation actions, or combine thriving and ecosystems management.

The program intends to support research efforts for investigation activities and studies on subjects – amongst others, and in line with measures included in the National Adaptation Plan – related to: climate scenario's, natural carbon sinks, disaster risk management, water management, biodiversity, marine and coastal subjects, health, agriculture, etc. It aims to build a strong national climate governance system relying on rigorous scientific knowledge to ensure climate actions efficiency.

The aim of this study is to assist the Government of Cabo Verde, through the Climate Action Programme in the identification of adequate nature-based solutions and their analysis, specifically their suitability for five Cabo Verdean municipalities context (Boa Vista, Brava, Praia, Mosteiros and Ribeira Brava). Their suitability is mainly defined by their climate resilience ability relevance seen the local risks, but also the possibility to restore ecosystems in the meantime.

This study will result in:

- Climate responsibility, technology, science, and knowledge supported
- Increased knowledge of NbS in Cabo Verde to promote climate resilience and sustainable development

- Matched proposals on NbS to specific locations

The aim of this study is to assist the Climate Action Programme in the identification of an adequate methodology to assess the climate vulnerability in Cabo Verde and of an associated index that is suitable for Cabo Verde, taking the high diversity among urban and rural, or coastal and interior areas into consideration.

To develop a complete study about potential nature-based solutions for Cabo Verde, the consultant will:

- Perform a state of art, in order to conceptualize nature-based solutions, supported by an inventory of NbS best practices, and their suitability to the Cape Verdean context
- Analyse the main Cabo Verdean climate risks, identify the involvement capacity of local communities and civil society organizations in the five municipalities to validate climate risk assessment and determine the most suited NbS for climate resilience
- Recommend improvements in local climate risks analysis and applicable method to define climate change adaptation options, namely NbS, and mainstream it in the main sectoral policy instruments
- Organize and facilitate a one-day workshop to share findings and results, including its evaluation.

The consultant will work in close cooperation with the Programme coordination, key stakeholders, local communities and civil society organizations

2.2 METHOD

2.2.1 IMPLEMENTATION

2.2.1.1 Literature review: Baseline assessment, identification of needs and criteria

The concept of nature-based solution (NBS) is, according to UICN, defined as “actions to protect, sustainably manage, and restore natural and modified ecosystems that address societal challenges effectively and adaptively, simultaneously benefiting people and nature” (IUCN 2016). NBS are thus a possible way to tackle many societal issues, dividing them into several groups depending on which issue they deal with.

Nature-based solutions (NBS) for climate resilience are one of these subsets that, alongside other benefits, contribute to climate resilience and adaptation by reducing climate and disaster risk. Specific types of NBS can increase resilience as climate change is increasing the exposure of people to natural hazards—such as flooding, extreme heat, droughts, and landslides—around the globe. (Boris van Zanten et al., 2023)

NBS are being more and more implemented worldwide, as they are an efficient way to fight against decreasing ecosystem services. This analysis was performed after finding out that nature was providing services to societies without them noticing, until they started being degraded by human activities and

climate change. As nature is a really complex system, “conceiving” ecosystem services is a hard work, but they can be mimicked with techniques such as NBS to benefit from them. This technique differs from traditional methods since it uses natural components to treat economic, social, societal and ecological issues. Most of the nature-based solutions already existing relies on using natural functioning because of the several actions it can have at the same time. It implies to have a holistic view considering all the benefits that human and nature can have from their implementation, to adapt NBS so they meet the needs the best possible way.

A first literature review revealed that NBS are a widely submitted to studies and implementations. Since NBS mainly tends to be adapted to the local land context and the risks it is designed for, there is a great variability in possibilities, even if patterns or concepts can be identified, such as the ones shown in Table1. Inventorying NBS helps determine which risk can be tackled and what main benefits can be interesting.

Table 1: Inventory of the main NBS found in literature review and their benefits.

NbS family	NbS technique	Benefits								
		Water pollution regulation	Coastal flood risk reduction	Pluvial flood risk reduction	Riverine flood risk reduction	Erosion and sediment management	Heat stress reduction	Carbon storage and sequestration	Biodiversity	Landslide risk reduction
Bioretention Areas	Bioswales and rain gardens	x		x		x	x	x	x	
	Detention pond	x		x		x	x	x	x	
	Retention pond	x		x		x	x	x	x	
	Permeable pavements	x		x		x	x	x	x	
	Extensive green roofs	x		x		x	x		x	
Building solutions	Intensive green roofs	x		x		x	x		x	
	Ground-based green facades	x		x		x	x		x	
	Facade-bounded greening	x		x		x	x		x	
	Green urban furniture						x	x	x	
	Rainwater harvesting	x		x		x				
	Blue roofs	x		x		x	x		x	
	Wetland Roof	x		x			x	x	x	
	Compartmentalisation (urban scale)			x						

Constructed Inland Wetlands	Cons	Surface constructed wetlands	x		x		x	x	x	x
		Subsurface gravel wetlands	x		x		x	x	x	x
		Floating wetlands	x		x		x	x	x	x
Green corridors		Street tree canopies	x		x		x	x	x	x
		Green avenues	x		x		x	x	x	x
		Urban green corridors	x		x		x	x	x	x
Managed Forests		Hedge Biotopes	x		x		x	x	x	x
		Restore hydrology	x	x			x	x	x	x
		Permeable structures	x	x			x	x	x	x
Natural Inland Wetlands		Planting or sowing	x	x			x	x	x	x
		Drainage reduction	x		x	x	x	x	x	x
		Improving lateral connectivity	x		x	x	x	x	x	x
Open Green Spaces		Maintenance and cleaning	x		x	x	x	x	x	x
		Pocket parks	x		x		x	x	x	x
		Natural playgrounds	x		x		x	x	x	x
		Climate-proof residential gardens	x		x		x	x	x	x
		Islands of Coolness						x		x
		Car Parks with Green Areas	x		x		x	x	x	x

	Intentionally unmanaged areas (green growth)	x		x	x	x	x	x	x	x
	Green school grounds			x			x	x	x	
	Floodables green zones			x	x	x	x	x	x	
River and Stream Renaturation	Bank and bed renaturation	x		x	x	x	x	x	x	
	Stream daylighting	x		x	x	x	x	x	x	
	Bioengineering techniques	x		x	x	x	x	x	x	
	Helophyte Filters	x				x		x	x	
River Floodplains	Setting levees back	x			x	x	x	x	x	
	River bypass or Oxbow	x			x	x	x	x	x	
	Re-activating the floodplain	x			x	x	x	x	x	
	Creation of floodplains and riparian forests	x		x	x	x	x	x	x	x
Salt Marshes	Restore hydrology	x	x			x	x	x	x	
	Mud Motor	x	x			x	x	x	x	
	Planting mats	x	x			x	x	x	x	
	Salt march restoration			x		x	x	x	x	
Sandy Shores	Beach nourishment and dune restoration			x		x		x	x	

		Artificial reefs and submerged structures	x			x		x		x		x
		Connectivity and multiple lines of defense	x			x		x		x		x
		Depoldering	x									x
		Dune restoration	x									x
ces Slopes	Terra and	Living smiles	x		x		x		x		x	x
		Wattle fences	x		x		x		x		x	x
		Vegetated gabions	x		x		x		x		x	x
n Farming	Urba	Raised beds			x				x		x	
		Amphibious farming			x				x		x	
		Floating farming			x				x		x	
		The Living Garden Concept			x		x		x		x	
		Algae Production System									x	
		Community Gardens	x		x		x		x		x	
		Phytoremediation forest	x		x		x		x		x	
n Forests	Urba	Ecological forest corridors	x		x		x		x		x	
		Agroforestry	x		x		x		x		x	

United Nations Environment Programme and International Union for Conservation of Nature (2021). Nature-based solutions for climate change mitigation.

Nairobi and Gland, Boris van Zanten, Gonzalo Gutierrez Goizueta, Luke Brander, Borja Gonzalez Reguero, Robert Griffin, Kavita Kapur Macleod, Alida Alves, Amelia Midgley, Luis Diego Herrera, and Brenden Jongman. 2023. Assessing the Benefits and Costs of Nature-Based Solutions for Climate Resilience: A Guideline for Project Developers. World Bank, Washington, DC. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO



World Bank. 2021. A Catalogue of Nature-based Solutions for Urban Resilience. Washington, D.C. World Bank Group

World Bank. 2016. Managing Coasts with Natural Solutions: Guidelines for Measuring and Valuing the Coastal Protection Services of Mangroves and Coral Reefs. M. W. Beck and G-M. Lange, editors. Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services Partnership (WAVES), World Bank, Washington, DC

Politecnico de Milano. 2019. Catalogue of Nature-based solutions for urban regeneration.

The 9 main benefits taken into account in this chart are not the only ones but they are the most important regarding local context and NBS functioning. Some of these benefits are a direct answer to issues, such as flood regulation, heat stress reduction, landslide risk reduction and carbon storage.

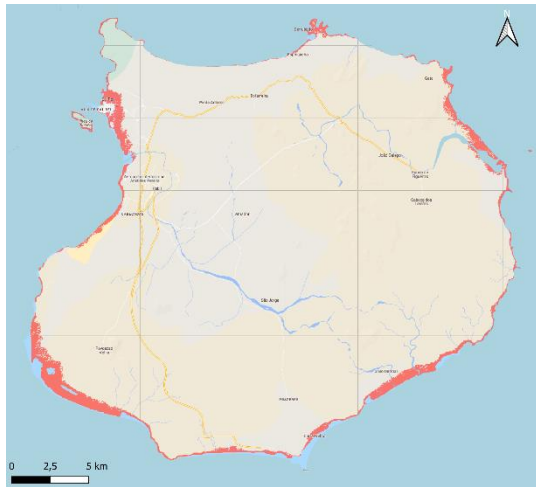


Figure 25: Boa Vista zones impacted by coastal floods (2030-0.2m)



Figure 26: Boa Vista zones impacted by coastal floods (2100-1.10m)

Coastal, pluvial, and riverine flood risk reduction are particularly adapted to the Cape Verdean context, as islands have a major area at the interface with sea. Cape Verdean islands are volcanic, which means that their slopes are important. However, some parts are flatter and more vulnerable to coastal flooding (red), such as these maps show for the Boa Vista municipality, respectively for projections to 2030 (Figure 1) and 2100 (Figure 2) with scenarios of 0.2m and 1.10m sea level rise (IPCC, 2018). The municipality of Boa Vista is the most impacted by coastal floods over the 5 municipalities. However, the city of Praia is really concerned too because of its proximity to sea. As the following map shows (Figure 3), several urbanised zones will be impacted by 2100 by coastal floods, resulting in high economic and social costs.



Figure 27: Coastal flood risk in the city of Praia

Several factors can be considered to reduce this impact, such as sediment transport and waves intensity. Implementing mangrove forests in the impacted zones could be a solution to these since the growth of a dense vegetal comb reduces waves intensity on coasts since it will break the movement. This “comb effect” fixes substratum and produces sedimentation in the meantime, avoiding to sediments leak. It results in a higher ground level, reducing the flood risk. However, it could be complicated to implement such solution in the municipality of Praia. That is why setting up submerged structure appear as a better choice.

As it has been seen by locals over the years, heats and droughts were more frequent as the time goes. Historical data review and projections give the same picture.

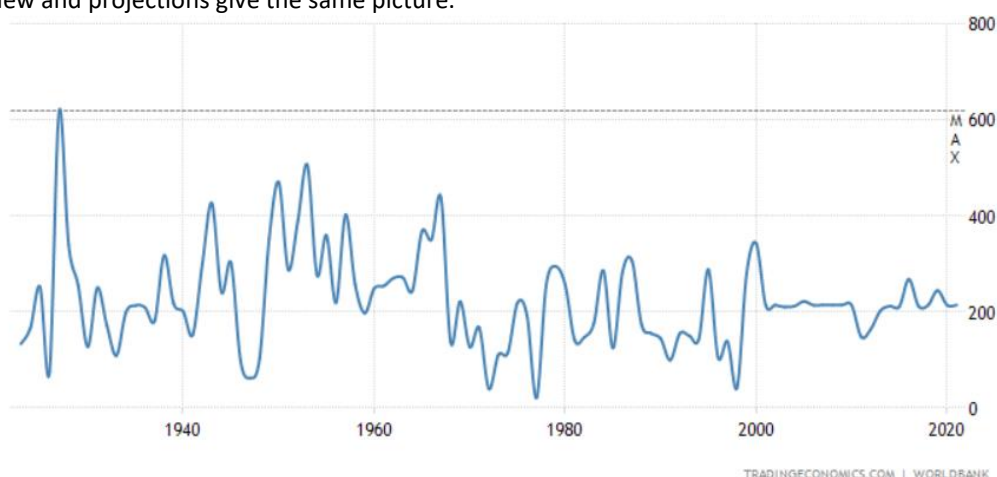


Figure 28: Historical rainfalls (mm/year)

Historical rainfalls (Figure 28) show that the high variability in rainfalls was slowly replaced by more regular ones, which could also mean that the available amount of water cannot be replenished with exceptional rainfalls. This analysis can be completed with the estimated dry days per year for the next decades (Figure 5). Even if Brava is the least impacted, in the least worst projection scenario, this municipality will have longer periods of dry days to face, and really quick since it is estimated, for winter as example, as an increase of 0.35% between 2040 and 2059, which means an average of one third of a day is added compared to 2020-2039, but in reality it will be increasing more rapidly at the end, making droughts worst. All the country of Cape Verde will be submitted to this increase.

		2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	Units: Days	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
SSP1-1.9	Country: Cape Verde	89.35 (84.02,90.20)	91.82 (77.16,92.00)	80.82 (60.17,91.24)	77.51 (36.33,88.08)	89.76 (83.97,90.20)	91.79 (79.89,92.00)	81.33 (63.89,91.21)	78.55 (40.09,88.28)	89.69 (83.74,90.20)	91.76 (80.25,92.00)	82.94 (62.41,91.54)	78.26 (45.56,88.84)	89.88 (82.72,90.20)	91.60 (80.21,92.00)	80.70 (57.94,91.72)	80.92 (45.21,89.05)
	Highest: Sal	89.65 (87.85,90.20)	91.90 (78.05,92.00)	83.25 (69.25,92.00)	80.85 (41.45,89.10)	89.70 (85.30,90.20)	92.00 (82.50,92.00)	81.95 (75.85,91.20)	81.35 (44.70,90.00)	89.45 (87.80,90.20)	91.65 (82.00,92.00)	83.20 (74.65,92.00)	82.10 (51.65,89.55)	90.15 (87.05,90.20)	91.85 (81.55,92.00)	81.10 (71.60,92.00)	82.35 (51.40,89.70)
	Lowest: Brava	89.00 (86.00,90.20)	92.00 (71.85,92.00)	76.50 (52.85,87.70)	64.25 (26.80,85.50)	89.35 (87.05,90.20)	91.95 (72.60,92.00)	79.75 (56.90,88.45)	61.20 (30.10,84.40)	89.40 (85.45,90.20)	91.75 (75.50,92.00)	78.30 (61.75,90.00)	72.70 (33.95,86.75)	89.40 (85.60,90.20)	91.90 (73.55,92.00)	77.40 (56.00,88.15)	72.10 (35.50,84.55)

Figure 29: Dry days number evolution (SSP1-1.9)

With this alarming analysis goes the fact that temperatures will significantly increase in the upcoming decades (Figure 6), according to IPCC projections, which means that hot periods will be more intense, aggravating the drought effect. It is accepted that heatwaves are more intense in cities compared to countryside. A consideration of two families of nature based solution is a good way to adapt to the context, and priority should go where the risk for people is the most important ; in cities.

To reduce heat stress due to droughts and elevated temperatures, many solutions can be implemented, especially in cities. The purpose of these solutions is to reduce the area of exposed artificial surfaces such as concrete or tarmac. The most used techniques consist of creating green spaces in cities, like urban parks or street tree canopies, shading pathways, and streets to reduce urban temperature. Blue solutions, including water storage on roofs or in constructed wetlands, should be considered because they are known to refresh air in addition to improve water quality and management, but implementing is harder because of evaporation.

On a greater scale, solutions can be applied in countryside and will mostly consist in planting forests. They have a great climate action, alongside other benefits for biodiversity for example, especially on temperature since trees have an evapotranspiration functioning, consisting in sucking water from the ground to compensate for water that has been sweat under the heat action. By becoming wet, the air temperature decreases. If forests are big enough and close to cities, the effect can be felt in an interesting way, and even otherwise it contributes to the climate resilience of the country. Particular tree species need to be chosen, especially locals ones which can withstand droughts or harsh conditions to be more resilient, and which have a large canopy when growing. Trees are most efficient in evapotranspiration when they are old enough to have a broad canopy, producing more

evapotranspiration. Managing sustainably these forests is efficient for climate resilience, since it also implies planting young trees, which are more efficient for carbon storage and sequestration to reduce greenhouse effect.

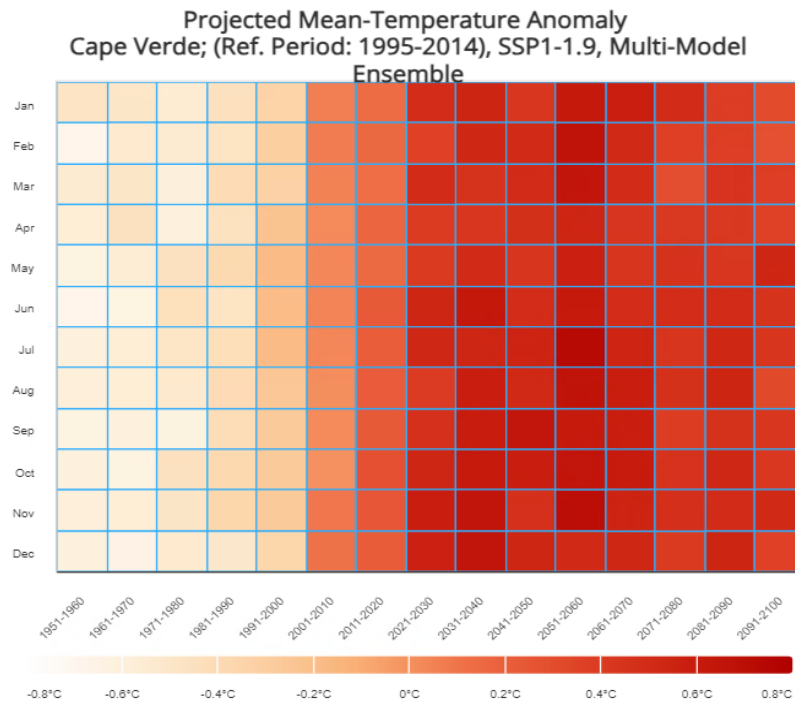


Figure 30: Temperature anomalies (1951-2100)

Another risk which can be directly tackled is the landslide risk, affecting particularly Brava and Ribeira Brava municipalities as shown below (Figure 32 and Figure 31). This risk is mainly determined by great changes in land use, especially regarding deforested zones to create roads or to be used for agricultural purposes. Further study will be needed to understand better land use and local practices to have a more precise view of risk distribution across municipalities. This way, new agricultural methods can be proposed, such as terraces ones, which are appropriated to great slope zones, such as volcanic islands. Forests can also be used as a mean to stabilise ground thanks to roots network, especially species which have a deep anchoring and expanded network.

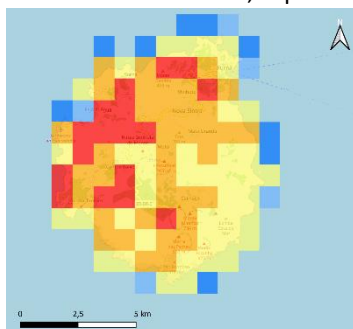


Figure 32: Landslide susceptibility in Brava

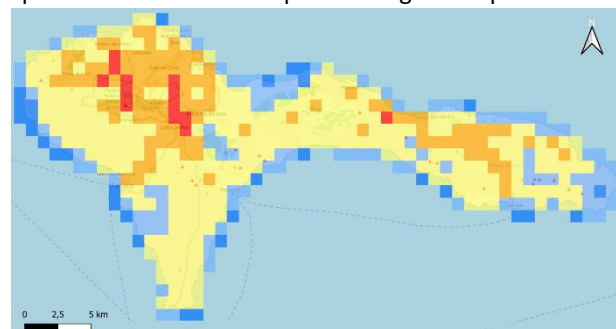


Figure 31: Landslide susceptibility in Ribeira Brava (and legend)

Mosteiros municipality is more lightly affected by landslide risk (Figure 33), and the analysis of other risks did not show key elements. Global models are performant tools but might not give clear results regarding climate hazards on the resolution of that area, or not representative enough of the reality. Local assessment will aid in identifying what types of hazards people have to deal with and how these could be tackled based on local capacity. From this depends which NBS might be selected and implemented.

The other benefits, or co-benefits support systems in their functioning, which means that restoring or increasing their efficacy will increase the “value” of benefits.

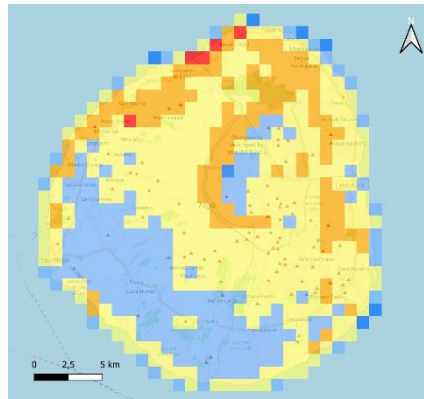


Figure 33: Landslide susceptibility in Mosteiros

The water pollution regulation is at the base of nature-based solution since they are using living components. If poisoned, ecosystem services which can be taken from NBS might decrease. Furthermore, some benefits are related to food production, but if these are impacted, food shortages risk may be high.

As it was said, there are important slopes on Cape Verdean islands. If the substratum is not permeable, it will result in a high drainage density, as the map shows (Figure 34). This will induce an important runoff on soils, which means an important erosion phenomenon. Erosion is known to disconnect streams from their alluvial groundwater, impacting riverine vegetation growth and evapotranspiration. Erosion and sediment management can be tackled by reducing runoff, whether natural or urbanisation caused. Instead of flowing quickly to streams and sea, water will remain in the ground, being available for vegetation, but also help support droughts and low-water levels in streams.



Figure 34: Ribeira Brava streams for a 25 years return flood.

Biodiversity benefits are mostly meant to restore ecosystems variability in order to increase their resilience in case of extreme events, for them to keep a beneficial action on climate. Biodiversity support activities such as food providing or natural ecosystem management.

2. Assessment methods and selection approach

The method that will be used for this study is similar to the one used for the analysis of Turin city (Biasin et al., 2023). It will consist in a further assessment of Cape Verde vulnerabilities and risks to identify more precisely the purposes that NBS will be designed to answer, and where they really need to be implemented. This step will be followed by several scenarios modeling, taking into account different climate projections, solutions implementation and purposes by using InVEST models. Some of these variables will be defined with local stakeholders, depending on their priorities (economic, social, environmental). For the most relevant scenarios, an economic valuation of costs and benefits from implementing NBS to select the most adapted one.

8.2. Annexe B : Liste des références bibliographiques utilisées pour l'étude des solutions basées sur la nature.

- Ahmadlou, M., Al-Fugara, A., Al-Shabeeb, A. R., Arora, A., Al-Adamat, R., Pham, Q. B., Al-Ansari, N., Linh, N. T. T., & Sajedi, H. (2021). Flood susceptibility mapping and assessment using a novel deep learning model combining multilayer perceptron and autoencoder neural networks. *Journal of Flood Risk Management*, 14(1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12683>
- Albert, C., Brillinger, M., Guerrero, P., Gottwald, S., Henze, J., Schmidt, S., Ott, E., & Schröter, B. (2021). Planning nature-based solutions: Principles, steps, and insights. *Ambio*, 50(8), 1446-1461. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01365-1>
- Al-Hinai, H., & Abdalla, R. (2021). Mapping Coastal Flood Susceptible Areas Using Shannon's Entropy Model : The Case of Muscat Governorate, Oman. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 252. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040252>
- Andreadis, K. M., Schumann, G. J.-P., & Pavelsky, T. (2013). A simple global river bankfull width and depth database : Data and Analysis Note. *Water Resources Research*, 49(10), 7164-7168. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20440>
- Bian, L., Melesse, A. M., Leon, A. S., Verma, V., & Yin, Z. (2021). A Deterministic Topographic Wetland Index Based on LiDAR-Derived DEM for Delineating Open-Water Wetlands. *Water*, 13(18), 2487. <https://doi.org/10.3390/w13182487>
- Bridges, T., King, J., Simm, J., Beck, M., Collins, G., Lodder, Q., & Mohan, R. (2021a). *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management*. Engineer Research and Development Center (U.S.). <https://doi.org/10.21079/11681/41946>
- Bridges, T., King, J., Simm, J., Beck, M., Collins, G., Lodder, Q., & Mohan, R. (2021b). *Overview : International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management*. Engineer Research and Development Center (U.S.). <https://doi.org/10.21079/11681/41945>
- Brill, Gregg, Tien Shiao, & Cora Kammeyer. (2021). *Benefit Accounting of Nature Based Solutions for Watersheds Guide.pdf*. Pacific Institute, The Nature Conservancy.
- Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S., & Müller, F. (2012). Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 21, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>
- Castellar, J. A. C., Popartan, L. A., Pueyo-Ros, J., Atanasova, N., Langergraber, G., Säumel, I., Corominas, L., Comas, J., & Acuña, V. (2021). Nature-based solutions in the urban context : Terminology, classification and scoring for urban challenges and ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 779, 146237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146237>
- Chen, C., Zhang, C., Tian, B., Wu, W., & Zhou, Y. (2023). Tide2Topo : A new method for mapping intertidal topography accurately in complex estuaries and bays with time-series Sentinel-2 images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 200, 55-72. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.05.004>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (Éds.). (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Communauté de communes de l'île de Noirmoutier. (2001). *Solutions_protection_côtière.pdf*.
- Croce, S., & Vettorato, D. (2021). Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities : A catalogue of solutions. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103313. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103313>
- Dunn, C. P., & Stearns, F. (1987). A Comparison of Vegetation and Soils in Floodplain and Basin Forested Wetlands of Southeastern Wisconsin. *American Midland Naturalist*, 118(2), 375. <https://doi.org/10.2307/2425794>

- European Commission. Directorate General for Research and Innovation. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities : Final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature based solutions and re naturing cities' : (full version)*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/765301>
- European Commission. Directorate General for Research and Innovation. (2021). *Evaluating the impact of nature-based solutions : A handbook for practitioners*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/244577>
- Fan, S., Li, Y., Zhang, M., Li, K., Xie, Y., & Dong, L. (2022). Spatial differentiation of neighborhood climates and their response to surrounding land cover composition : A case study in Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 826, 154001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154001>
- Guerrero, P., Haase, D., & Albert, C. (2018a). Locating Spatial Opportunities for Nature-Based Solutions : A River Landscape Application. *Water*, 10(12), 1869. <https://doi.org/10.3390/w10121869>
- Guerrero, P., Haase, D., & Albert, C. (2018b). Locating Spatial Opportunities for Nature-Based Solutions : A River Landscape Application. *Water*, 10(12), 1869. <https://doi.org/10.3390/w10121869>
- Gupta, N., Mathew, A., & Khandelwal, S. (2019). Analysis of cooling effect of water bodies on land surface temperature in nearby region : A case study of Ahmedabad and Chandigarh cities in India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.007>
- Hossain, M. D., & Nuruddin, A. A. (2016). Soil and Mangrove : A Review. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9(2), 198-207. <https://doi.org/10.3923/jest.2016.198.207>
- Huppert, K. L., Perron, J. T., & Ashton, A. D. (2020). The influence of wave power on bedrock sea-cliff erosion in the Hawaiian Islands. *Geology*, 48(5), 499-503. <https://doi.org/10.1130/G47113.1>
- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesão, J., Lenzholzer, S., & Kluck, J. (2020). Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate*, 32, 100607. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100607>
- Jongman, B., Jordy, D. J.-J., & Van Zanten, B. (2018). *Nature-based solutions for disaster risk management.pdf*. GFDRR, World Bank Group.
- Kidd, R. (2001). *Coastal dune management : A manual of coastal dune management and rehabilitation techniques* ([Rev. ed.]). The Dept.
- Lab 6.3. (2021, juin 28). *Ocean Data Lab*. <https://datalab.marine.rutgers.edu/ooi-lab-exercises/lab-6-ocean-waves-linking-the-marine-atmosphere-and-the-ocean-surface/lab-6-3/>
- Lalaut, Y. (1984). Rapport III. 3 utilisation des brise-lames immergés en mer à marée. *L'hydraulique et la maîtrise du littoral. Problèmes côtiers posés par le mouvement des sédiments et la pollution. Dix-huitièmes journées de l'hydraulique. Marseille, 11-13 septembre 1984. Tome 3, 1984*. https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1984_act_18_3_4893
- Lappe, R., Ullmann, T., & Bachofer, F. (2022). State of the Vietnamese Coast—Assessing Three Decades (1986 to 2021) of Coastline Dynamics Using the Landsat Archive. *Remote Sensing*, 14(10), 2476. <https://doi.org/10.3390/rs14102476>
- Lundbäck, M., Persson, H., Häggström, C., & Nordfjell, T. (2021). Global analysis of the slope of forest land. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(1), 54-69. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa021>
- Miles, L., Agra, R., Sengupta, S., Vidal, A., & Dickson, B. (2021). *Nature-based solutions for climate change mitigation.pdf*. UNEP, IUCN, Gland.
- Nature-based solutions in Europe : Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction*. (s. d.). [jeu de données]. https://doi.org/10.1163/9789004322714_cclc_2021-0190-608

- Pricope, N., & Shivers, G. (2022). Wetland Vulnerability Metrics as a Rapid Indicator in Identifying Nature-Based Solutions to Mitigate Coastal Flooding. *Hydrology*, 9(12), 218. <https://doi.org/10.3390/hydrology9120218>
- Prybutok, S., Newman, G., Atoba, K., Sansom, G., & Tao, Z. (2021). Combining Co\$ting Nature and Suitability Modeling to Identify High Flood Risk Areas in Need of Nature-Based Services. *Land*, 10(8), 853. <https://doi.org/10.3390/land10080853>
- Ranganathan, J., & World Resources Institute (Éds.). (2008). *Ecosystem services : A guide for decision makers*. World Resources Institute.
- Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *CATENA*, 22(3), 169-199. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9)
- Rueda, A., Vitousek, S., Camus, P., Tomás, A., Espejo, A., Losada, I. J., Barnard, P. L., Erikson, L. H., Ruggiero, P., Reguero, B. G., & Mendez, F. J. (2017). A global classification of coastal flood hazard climates associated with large-scale oceanographic forcing. *Scientific Reports*, 7(1), 5038. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05090-w>
- Sheil, D., Boissière, M., Van Heist, M., Rachman, I., Basuki, I., Wan, M., & Watopa, Y. (2021). The Floodplain Forests of the Mamberamo Basin, Papua, Indonesia (Western New Guinea) : Vegetation, Soils, and Local Use. *Forests*, 12(12), 1790. <https://doi.org/10.3390/f12121790>
- Slinger, J. (s. d.). *Building with Nature & Beyond*.
- Tehrany, M. S., & Kumar, L. (2018). The application of a Dempster–Shafer-based evidential belief function in flood susceptibility mapping and comparison with frequency ratio and logistic regression methods. *Environmental Earth Sciences*, 77(13), 490. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7667-0>
- Turner, B., Devisscher, T., Chabaneix, N., Woroniecki, S., Messier, C., & Seddon, N. (2022). The Role of Nature-Based Solutions in Supporting Social-Ecological Resilience for Climate Change Adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 123-148. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-010017>
- Van Zanten, B. T., Gutierrez Goizueta, G., Brander, L. M., Gonzalez Reguero, B., Griffin, R., Macleod, K. K., Alves Beloqui, A. I., Midgley, A., Herrera Garcia, L. D., & Jongman, B. (2023). *Assessing the Benefits and Costs of Nature-Based Solutions for Climate Resilience : A Guideline for Project Developers*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/39811>
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement, types and processes.pdf*.
- Veerkamp, C., Emiliano, R., Romanovska, L., Zandersen, M., Förster, J., Rogger, M., & Martinsen, L. (2021). *Assessment Frameworks of Nature-based Solutions for Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction*. https://doi.org/10.25424/CMCC/NBS_ASSESSMENT_APPROACHES
- Vrebo, D., Staes, J., Vandenbroucke, T., D’Haeyer, T., Johnston, R., Muhumuza, M., Kasabeke, C., & Meire, P. (2015). Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions. *Ecosystem Services*, 13, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.11.005>
- Wang, Y., Fang, Z., Hong, H., Costache, R., & Tang, X. (2021). Flood susceptibility mapping by integrating frequency ratio and index of entropy with multilayer perceptron and classification and regression tree. *Journal of Environmental Management*, 289, 112449. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112449>
- Wesenbeeck, B. K. van, IJff, S., Jongman, B., Balog, S., Kaupa, S., Bosche, L., Lange, G.-M., Holm-Nielsen, N., Nieboer, H., Taishi, Y., Kurukulasuriya, P., & Meliane, I. (2017). *Implementing-nature-based-flood-protection-principles-and-implementation-guidance.pdf*. World Bank Group, Deltares, UNDP, Ecoshape, GFDRR.
- Witt, C., & Haefele, S. M. (2005). PADDY SOILS. In D. Hillel (Éd.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (p. 141-150). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00286-1>

- World Bank. (2021). *A Catalogue of Nature-Based Solutions for Urban Resilience*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/36507>
- World Bank. (2023). *Nature-Based Solutions for Climate Resilience in the World Bank Portfolio*. Washington DC. <https://doi.org/10.1596/39560>
- World Bank Group. (2016). *Managing Coasts with Natural Solutions : Guidelines for Measuring and Valuing the Coastal Protection Services of Mangroves and Coral Reefs*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/23775>
- Wu, Z., & Zhang, Y. (2019). Water Bodies' Cooling Effects on Urban Land Daytime Surface Temperature : Ecosystem Service Reducing Heat Island Effect. *Sustainability*, 11(3), 787. <https://doi.org/10.3390/su11030787>
- Yan, C., Guo, Q., Li, H., Li, L., & Qiu, G. Y. (2020). Quantifying the cooling effect of urban vegetation by mobile traverse method : A local-scale urban heat island study in a subtropical megacity. *Building and Environment*, 169, 106541. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106541>
- Zhang, X., Chua, V. P., & Cheong, H.-F. (2015). Hydrodynamics in mangrove prop roots and their physical properties. *Journal of Hydro-Environment Research*, 9(2), 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.07.010>

8.3. Annexe C : Inventaire des solutions basées sur la nature

L'inventaire est joint au rapport au format classeur Excel.



Nature Based
Solutions inventory.

Nature-based solutions inventory Manual

Antea Group

Understanding today.
Improving tomorrow.



Table of Contents

1.	Context	2
2.	Structure	3
3.	Essential content	4
3.1.	Characterizing	4
3.1.1.	Family	4
3.1.2.	Technique	5
3.1.3.	Scale	5
3.2.	Functions and Benefits	5
3.3.	Index	6
3.3.1.	Index presentation	6
3.3.2.	Index use	7
3.4.	Suitability	8
3.4.1.	Slope	8
3.4.2.	Advice	8
3.5.	Costs	8
3.5.1.	Land	9
3.5.2.	Implementation	9
3.5.3.	Maintenance	9
3.6.	References	9
4.	Hidden content	10
4.1.	Nature based solutions characterizing	10
4.2.	Criteria weighting	11
4.3.	Calculation	11
5.	Effective area sheet	13
6.	Updates history	14

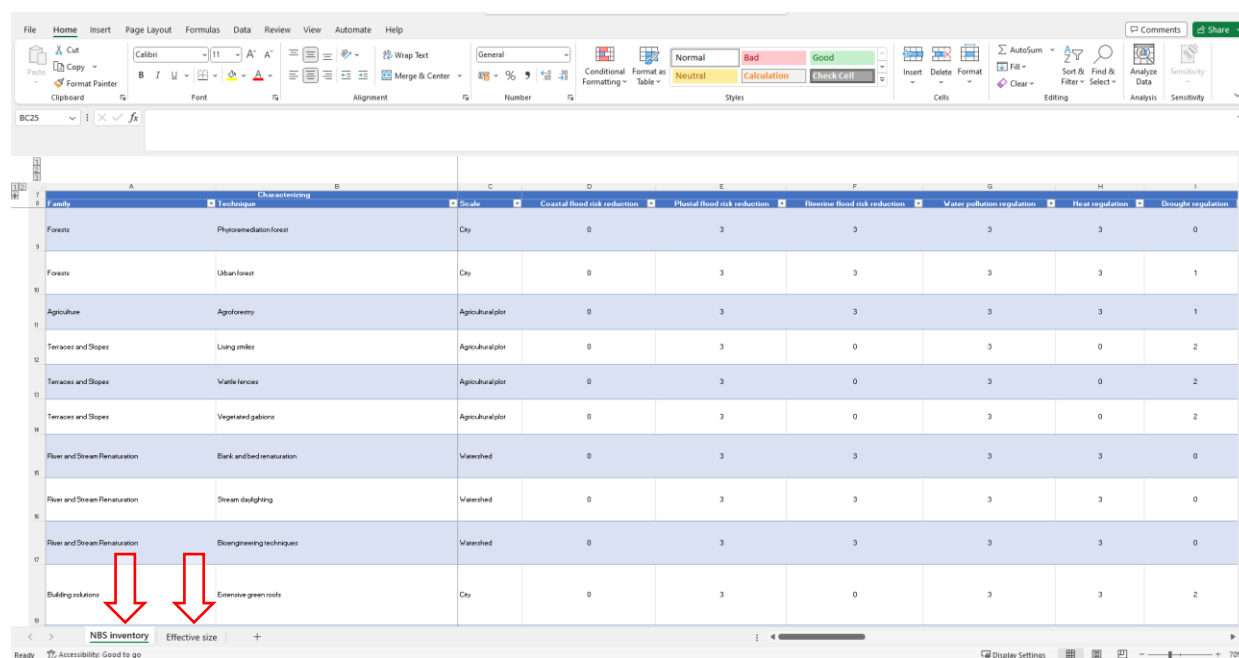
2. Structure

The “Nature Based Solutions inventory.xlsx” file contains two sheets named as following:

- “NBS inventory”: is the main sheet, containing all the techniques, their benefits and their description;
- “Effective size”: is a secondary sheet, meant for a possible future use in a model.

The basic view displays essential content about nature-based solutions, while further data, related to the sheet functioning, can be accessed by unhiding panels. Hidden panels are only in the “NBS inventory” sheet.

The hidden content is relative to calculations used for the index. It also contains complementary data, which is not essential to understand the inventory. It will be presented in the following parts.

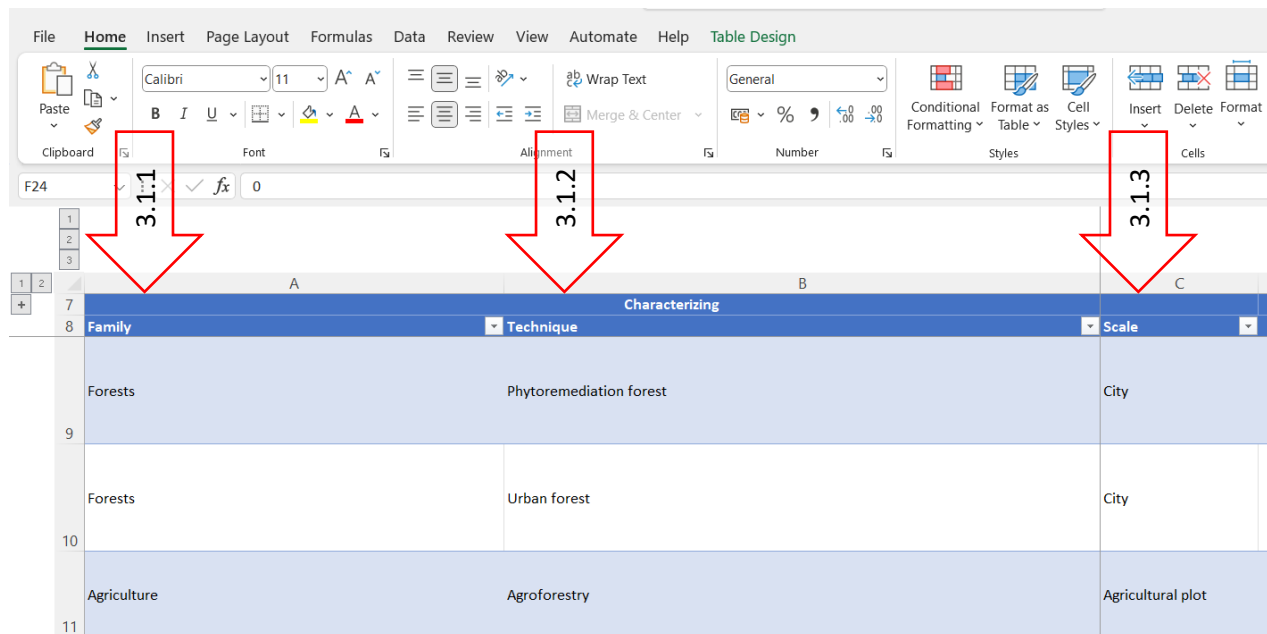


Family	Technique	Scale	Coastal flood risk reduction	Fluvial flood risk reduction	Fluvial flood risk reduction	Water pollution regulation	Heat regulation	Drought regulation
Forests	Photosynthesis forest	City	0	3	3	3	3	0
Forests	Urban forest	City	0	3	3	3	3	1
Agriculture	Agroforestry	Agricultural plot	0	3	3	3	3	1
Terraces and Slopes	Living mules	Agricultural plot	0	3	0	3	0	2
Terraces and Slopes	Wattle fences	Agricultural plot	0	3	0	3	0	2
Terraces and Slopes	Vegetated gabions	Agricultural plot	0	3	0	3	0	2
River and Stream Renaturation	Bank and bed renaturation	Watershed	0	3	3	3	3	0
River and Stream Renaturation	Stream daylighting	Watershed	0	3	3	3	3	0
River and Stream Renaturation	Ecological engineering techniques	Watershed	0	3	3	3	3	0
Building solutions	Extensive green roofs	City	0	3	0	3	3	2

3. Essential content

3.1. Characterizing

Three main features are meant to characterize each nature-based solution. They are presented in the following parts.



Characterizing		
Family	Technique	Scale
Forests	Phytoremediation forest	City
Forests	Urban forest	City
Agriculture	Agroforestry	Agricultural plot

3.1.1. Family

The “Family” field is meant to gather nature based solution in 16 megatypes which are listed below:

Forests	Bioretention Areas
Agriculture	Natural Inland Wetlands
Terraces and Slopes	Constructed Inland Wetlands
River and Stream Renaturation	River Floodplains
Building solutions	Submerged structures
Open Green Spaces	Salt Marshes
Green corridors	Sandy Shores
Urban Farming	Water management

It helps giving the user indications about where a technique can be implemented, at which scale, in which context and roughly in what will consist the technique. Several techniques of a same family will most probably have several common points.

3.1.2. Technique

The technique field refers to the name of the nature-based solution which is presented in the row. It is under that name that the nature-based solution to implement is known. If the name does not seem evocative enough to the user, looking at the features of the technique and at its reference document should provide a clearer idea of what it consists of.

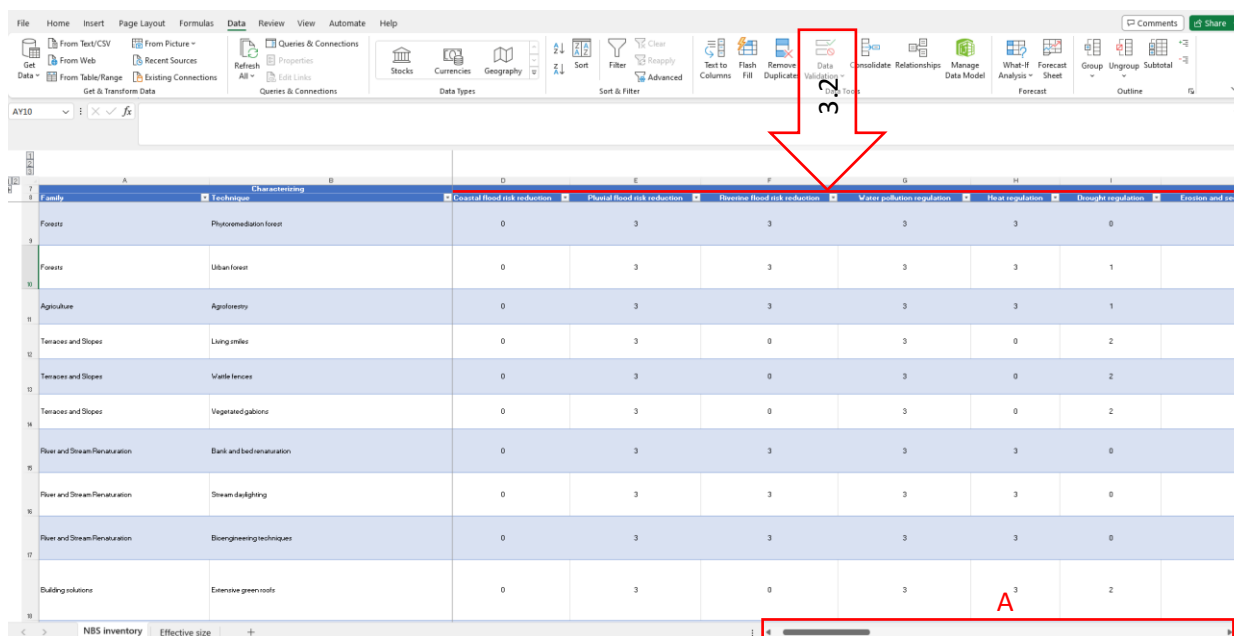
3.1.3. Scale

The scale field specifies in which extent a nature-based solution can be implemented. It usually gives the widest scale at which the technique can be used or which one is the most relevant for the technique. Four possibilities are given in the inventory, namely :

- Agricultural plot
- City
- Neighborhood
- Watershed

The scale also gives a piece of information about the context in which it can be implemented, since, for example an agricultural plot specifies that it will mostly be in the countryside whereas neighbourhood or city scale will in fact occur in urban areas.

3.2. Functions and Benefits



	Technique	Coastal flood risk reduction	Fluvial flood risk reduction	Fluvial flood risk reduction	Water pollution regulation	Heat regulation	Drought regulation	Emission and...
7	Forests	Phytoremediation forest	0	3	3	3	0	
9	Forests	Urban forest	0	3	3	3	1	
11	Agriculture	Agroforestry	0	3	3	3	1	
12	Terraces and Slopes	Living walls	0	3	0	3	0	2
13	Terraces and Slopes	Wattle fences	0	3	0	3	0	2
14	Terraces and Slopes	Vegetated gabions	0	3	0	3	0	2
15	River and Stream Renaturation	Bank and bed renaturation	0	3	3	3	0	
16	River and Stream Renaturation	Stream daylighting	0	3	3	3	0	
17	River and Stream Renaturation	Bioengineering techniques	0	3	3	3	0	
18	Building solutions	Extensive green roofs	0	3	0	3	2	

Functions and benefits are represented by 19 different criteria, listed below, aiming to define which social, environmental or economic aspect each solution can tackle. They can be displayed by using the grey cursor (A) in the bottom right corner of the screen.

Coastal flood risk reduction

Pluvial flood risk reduction

Riverine flood risk reduction

Water pollution regulation

Heat regulation

Drought regulation

Erosion and sediment management

Landslide regulation

Soil pollution regulation

Air pollution regulation

Carbon storage and sequestration

Biodiversity

Resources production

Tourism and recreation

Stimulate local economies and job creation

Human health

Education

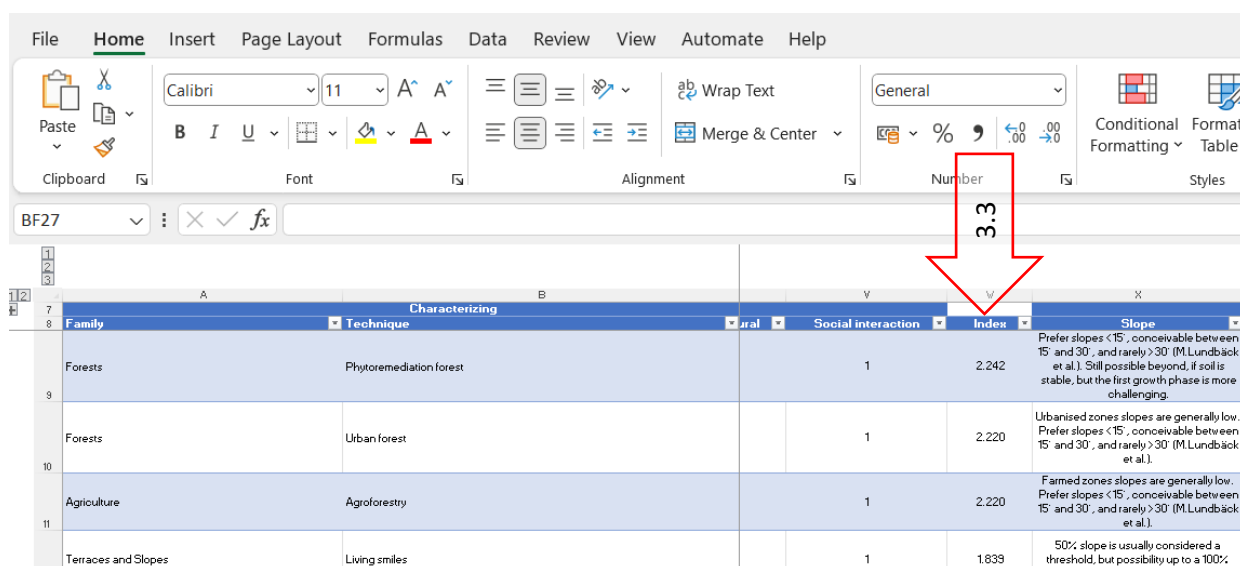
Cultural

Social interaction

For each criterion, a solution can only have one value. This value is meant to represent the effect (or not) the solution has on a parameter. It can be considered as an affinity value of the solution with the parameter. Possible values are integers ranging from 0 to 3, with 0 being null (no effect on the parameter, or negligible), 1 for “Low”, 2 for “Medium” and 3 for “High”. These values are mostly taken from the associated reference document of each technique. They are arbitrary, i.e. they are dimensionless and are just meant to classify the capacity a solution has to affect a parameter. However, it is not a value which represents the intensity of each case since many factors can change the nature-based solution efficiency. Differences in index values between several references can be noted due to the lack of standardisation between them seen they come from different studies.

3.3. Index

3.3.1. Index presentation



Family	Technique	Social interaction	Index	Slope
Forests	Phytoremediation forest	1	2.242	Prefer slopes <15°, conceivable between 15° and 30°, and rarely >30° (M.Lundbäck et al.). Still possible beyond, if soil is stable, but the first growth phase is more challenging.
Forests	Urban forest	1	2.220	Urbanised zones slopes are generally low. Prefer slopes <15°, conceivable between 15° and 30°, and rarely >30° (M.Lundbäck et al.).
Agriculture	Agroforestry	1	2.220	Farmed zones slopes are generally low. Prefer slopes <15°, conceivable between 15° and 30°, and rarely >30° (M.Lundbäck et al.).
Terraces and Slopes	Living smiles	1	1.839	50% slope is usually considered a threshold, but possibility up to a 100%.

Since nature-based solutions are multifunctional, it can be hard to choose between several of them looking similar on several parameters. The “Index” field is meant to sum up a technique into a unique value, in order to help user to choose which nature-based solution(s) to apply to a case by giving

an “objective” criterion. It is obtained by using “Functions and Benefits” values and applying them through a variation of the Shannon index. The index uses the following formula for each technique:

$$ID = - \sum_{c=1}^{19} W * F_i * \ln(W * F_i)$$

Where:

- ID is the index
- c is the criteria number, ranging from 1 to 19;
- F_i is the frequency of the “ith” criteria ($\frac{\text{ith Value}}{\text{Sum of maximal possible values of a row}}$);
- $\ln$ is the natural logarithm;
- W is a weighting factor which will be presented later.

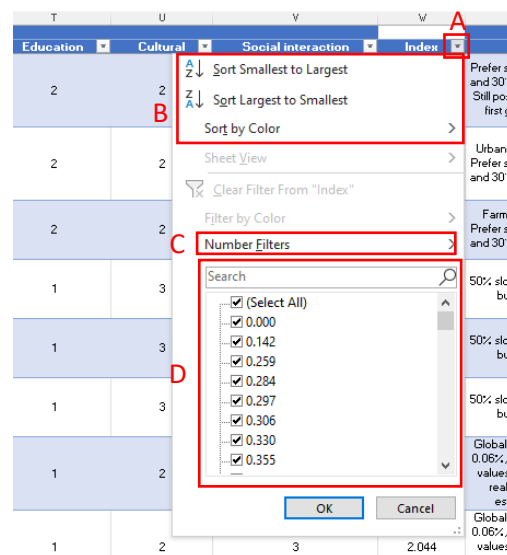
In order to avoid errors, a special condition has been set for calculations. Seen that criteria values or W can be null, a natural logarithm cannot be calculated. Cases implying a null value in the logarithm were directly assigned to 0.

3.3.2. Index use

By clicking on the small arrow (A), one can open a panel to choose settings in order to rank nature-based solutions. This method can be done for each field, depending on what feature the user wants to highlight, but it is recommended to apply it to numeric values. By using sorting parameter (B), one can choose to display nature-based techniques according to an increasing, decreasing index value or customized sorting settings. User can choose to only display precise data by ticking them in the bottom window (D) or by defining rules to filter data (C).

The index does not provide a value to whom the best solution will be close. Instead, it ranks solutions depending on the distribution and the intensity of values. Higher the index, higher the criteria values with a homogenous distribution.

The index does not define “good or bad” practices, because all solutions can be useful depending on the case study. It just helps user choosing between several possibilities, by giving the most adapted solution to a case, regarding benefits and priorities set. Other parameters should be considered, such as scale, suitability and costs.

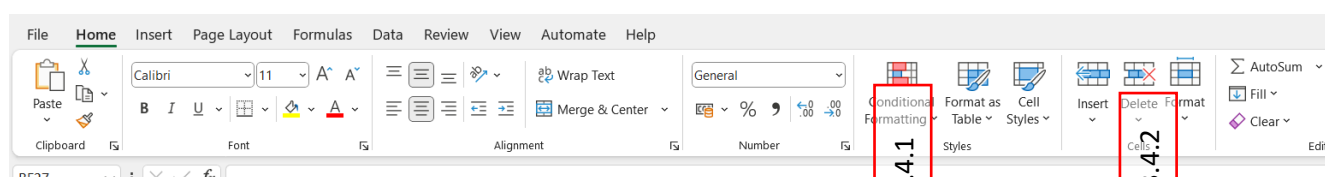


3.4. Suitability

The Suitability field is aimed for guiding user in refining the nature-based solution choice through two main parameters which are:

- Slope
- Advice

They cannot be summarized as a single value since several possibilities and shadings can be conceivable, and for that they contain several sentences and textual data.



Family	Technique	Characterizing	Slope	Advice
Forests	Phytoremediation forest		Prefer slopes < 15°, conceivable between 15° and 30°, and rarely > 30° (M. Lundback et al.). Still possible beyond, if soil is stable, but the first growth phase is more challenging.	Care to avoid lowering water tables and reducing refilling rate during dry season. Type of soil and pollution to treat (concentration, depth) induce usable species, local ones preferentially.
Forests	Urban forest		Urbanised zones slopes are generally low. Prefer slopes < 15°, conceivable between 15° and 30°, and rarely > 30° (M. Lundback et al.).	Care to avoid lowering water tables and reducing refilling rate during dry season. Type of soil and urban micro-climate induces usable species, local ones preferentially. Forests with intended human uses and near gray infrastructure often requires additional considerations (type of afforestation, management).
Agriculture	Agroforestry		Farmed zones slopes are generally low. Prefer slopes < 15°, conceivable between 15° and 30°, and rarely > 30° (M. Lundback et al.).	Care to avoid lowering water tables and reducing refilling rate during dry season. Type of soil and crops induces usable species, local ones preferentially. Can cause reduction in yield of the main agricultural crop, a fortiori if they are incompatible (shading, light for resources).
Terraces and Slopes	Living smiles		50°; slope is usually considered a threshold, but possibly up to a 100°; alone.	Adapt the use/crop to local hydrologic conditions and also the shape of the terraces: outward (low-rainfall areas with moderately permeable soil), level (medium rainfall and highly permeable soils) or inward sloping (heavy rainfall and less permeable soils).

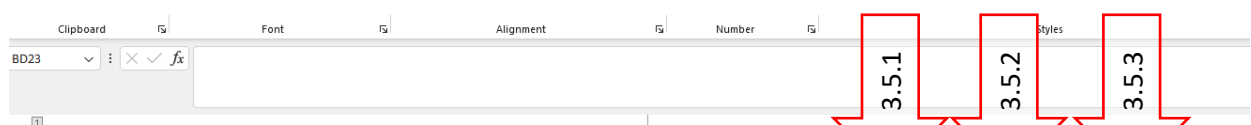
3.4.1. Slope

The “Slope” field gives to the user an idea of which classes are commonly used as possibilities and which type would correspond to the study situation. It describes, when possible, in what extent a technique can be applied, what are parameters related to this criterion (soil type, river slope,...) and why it is categorised as such (technical limit, flow efficiency,...).

3.4.2. Advice

The “Advice” field collects varied information about the technique, where it should preferentially be implemented, dimensional indications, considerations or whatever that is important to consider before realising the technique. It is meant to be completed with experiences over time.

3.5. Costs



Family	Technique	Characterizing	Advice	Land	Implementation	Maintenance	Reference
Forests	Phytoremediation forest		nd reducing refilling rate during dry season. (concentration, depth) induce usable species, preferentially.	Acquisition, land use indemnification, land securing, community resettlement	Permits, site preparation, reforestation (purchase, planting, watering)	Watering, pruning, invasive species removal, variable depending on age, location and condition, contaminated parts treatment	World Bank
Forests	Urban forest		nd reducing refilling rate during dry season. (concentration, depth) induce usable species, preferentially. Can cause reduction in yield of the main agricultural crop, a fortiori if they are incompatible (shading, light for resources)	Acquisition, land use indemnification, land securing, community resettlement	Permits, site preparation, reforestation (purchase, planting, watering)	Pruning, invasive species removal, variable depending on age, location and condition	World Bank
Agriculture	Agroforestry		nd reducing refilling rate during dry season. (concentration, depth) induce usable species, preferentially. Can cause reduction in yield of the main agricultural crop, a fortiori if they are incompatible (shading, light for resources)	Acquisition, land use indemnification, land securing, community resettlement	Permits, site preparation, reforestation (purchase, planting, watering)	Pruning, invasive species removal, variable depending on age, location and condition	World Bank
Terraces and Slopes	Living smiles		nd reducing refilling rate during dry season. (concentration, depth) induce usable species, preferentially. Can cause reduction in yield of the main agricultural crop, a fortiori if they are incompatible (shading, light for resources)	Acquisition, land use indemnification, land securing, community resettlement	Machinery, labor, materials	Reshaping, vegetation management, fence restoration	World Bank

3.5.1. Land

What is meant by “land” is every support which could be used to implement nature-based solution on. It could be natural land, agricultural soil, but also building façades or rooftops. Costs flowing from acquiring lands depends on the type of acquisition, by purchasing lands or by renting an access (usually done for buildings), and all of the costs related to owner and land use changes (indemnification, community resettlement).

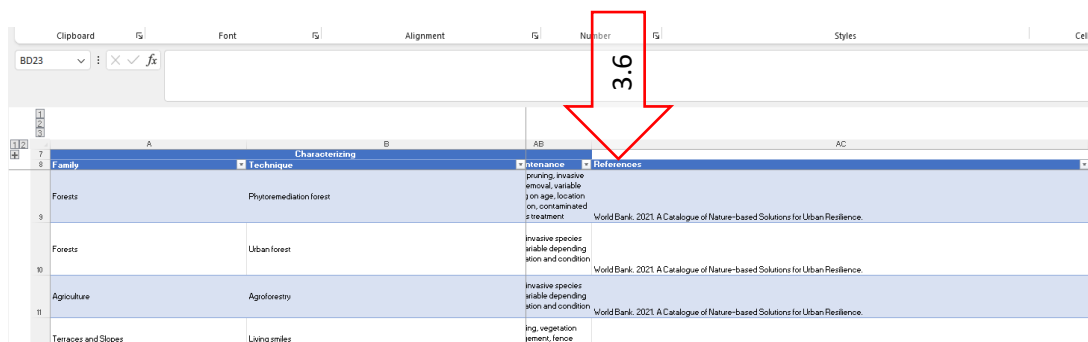
3.5.2. Implementation

“Implementation” costs include all costs related to the nature-based solution construction, from site preparation beforehand to implementation of the technique. Composing costs are usually machinery, labor payment, project planning, substrate and vegetation purchase. When restoring ecosystems, implementation also involves removing old infrastructures which are an issue to environment, infected vegetation, ...

3.5.3. Maintenance

“Maintenance” contains the possible operations needed to maintain the nature-based solution in good conditions, so it can keep providing benefits. It includes equipment maintenance as well as material purchase and operations needing to be done. When possible, a temporal information is added such as delay between several operations or how many operations are needed for a year.

3.6. References

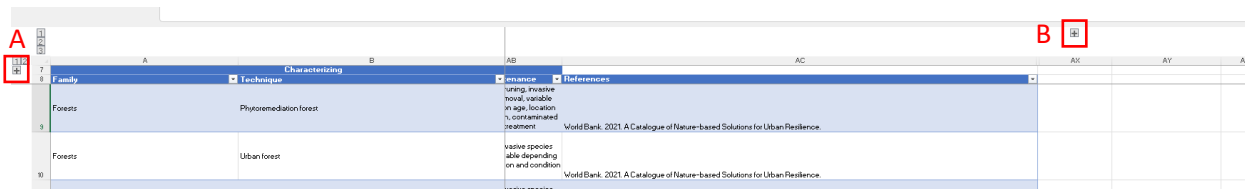


	Family	Technique	Characterizing	Maintenance	References
8	Forests	Phytoremediation forest		pruning, invasive removal, variable on age, location, on contaminated treatment	World Bank. 2021. A Catalogue of Nature-based Solutions for Urban Resilience.
9	Forests	Urban forest		invasive species removal, variable depending on station and condition	World Bank. 2021. A Catalogue of Nature-based Solutions for Urban Resilience.
10	Agriculture	Agroforestry		invasive species removal, variable depending on station and condition	World Bank. 2021. A Catalogue of Nature-based Solutions for Urban Resilience.
11	Terraces and Slopes	Living smiles		ing, vegetation removal, fence	

“References” field precises the document where each technique was found, so the user can look for it in order to find further information about a technique. One can usually find additional data, such as study cases, variations and graphical representations.

4. Hidden content

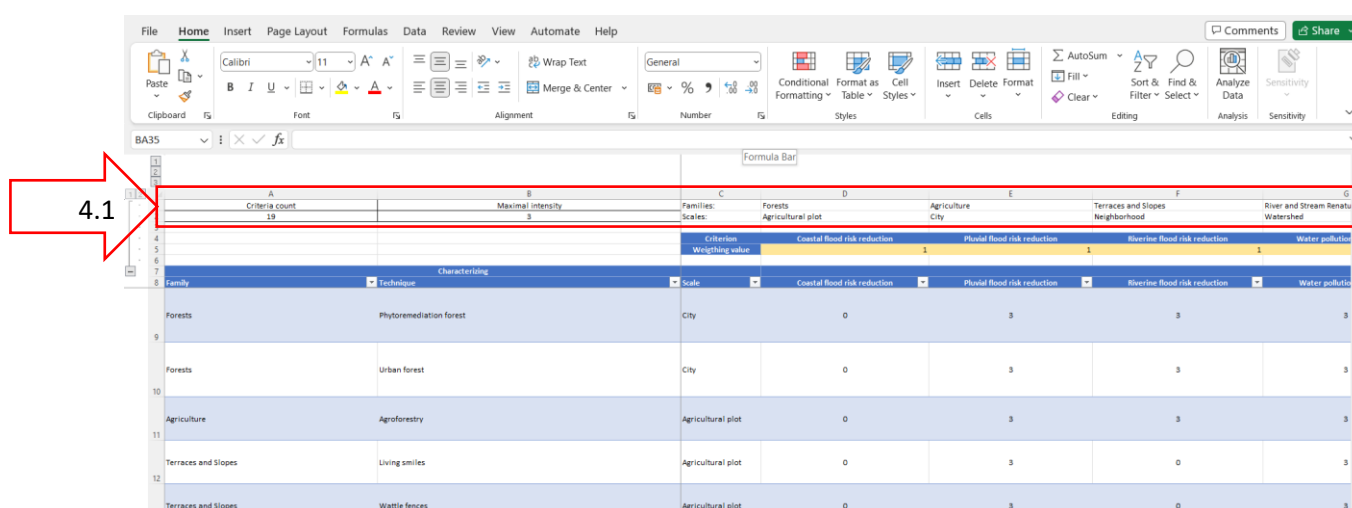
An incoherence can be noted in the rows and columns numbering, as shown below, where the first row is n°7 and the following column of “AC” is “AX”.



	A	B	AC	AX	AY	AZ
7	Family	Characterizing	Finance			
8	Forests	Phytoremediation forest	Finance			
9	Forests	Urban forest	Finance			
10						

These discrepancies are due to the use of hidden fields, to hide non-essential data, which will be presented in the following parts. To display them, one only have to click on the “plus button” (A and B), and after on the “minus button” to hide it again.

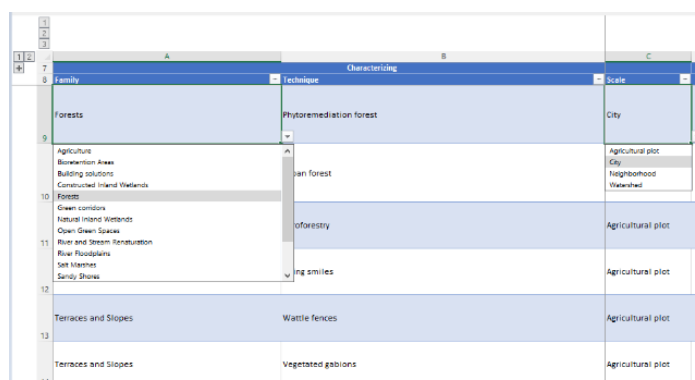
4.1. Nature based solutions characterizing



	A	B	C	D	E	F	G
4	Criteria count	Maximal intensity	Families	Forests	Agriculture	Terraces and Slopes	River and Stream Renatu
5	19	3	Scales	Agricultural plot	City	Neighborhood	Watershed
6			Criteria	Coastal flood risk reduction	Pluvial flood risk reduction	Riverine flood risk reduction	Water pollution
7			Weighting value	1	1	1	1
8	Family	Technique	Scale	Coastal flood risk reduction	Pluvial flood risk reduction	Riverine flood risk reduction	Water pollution
9	Forests	Phytoremediation forest	City	0	3	3	3
10	Forests	Urban forest	City	0	3	3	3
11	Agriculture	Agroforestry	Agricultural plot	0	3	3	3
12	Terraces and Slopes	Living smiles	Agricultural plot	0	3	0	3
13	Terraces and Slopes	Wattle fences	Agricultural plot	0	3	0	3

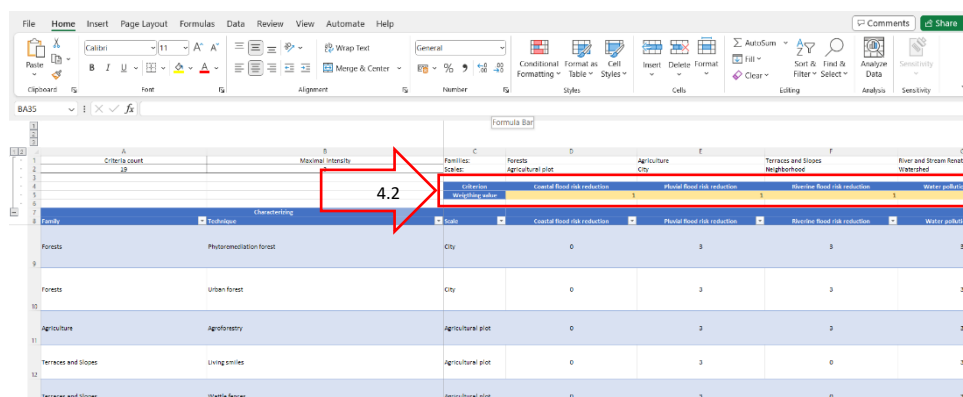
Information displayed on the image above is used for the automation of the inventory sheet. “Criteria count” and “Maximal intensity” are reminder but are also used for the calculation of the index, for the “Sum of maximal possible values of a row” in the frequency. If changes need to be made, such as expanding the range of values for techniques affinity, or the amount of criteria, index can be automatically adapted.

“Families” and “Scales” fields are the source from which the drop-down lists extract values, as shown below. Adding values to the range will extend the drop-down list.



	A	B	C
9	Family	Technique	Scale
10	Forests	Phytoremediation forest	City
11	Forests	Urban forest	City
12	Forests	Agroforestry	Agricultural plot
13	Terraces and Slopes	Living smiles	Agricultural plot
14	Terraces and Slopes	Wattle fences	Agricultural plot
15	Terraces and Slopes	Vegetated gabions	Agricultural plot

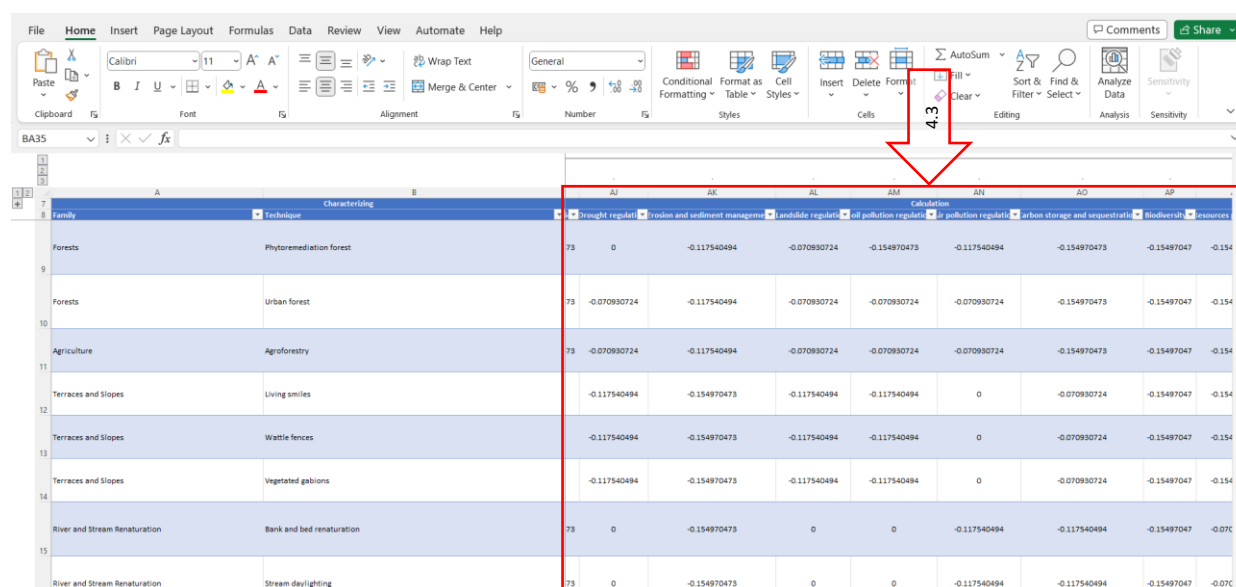
4.2. Criteria weighting



Criteria	Maximal interests	Criteria weight	Weighted value	Weighted value	Weighted value	Weighted value	Weighted value
Forests	Phytoremediation forest	City	0	3	3	3	3
Forests	Urban forest	City	0	3	3	3	3
Agriculture	Agroforestry	Agricultural plot	0	3	3	3	3
Terraces and Slopes	Living smiles	Agricultural plot	0	3	0	0	3
Terraces and Slopes	Wattle fences	Agricultural plot	0	3	0	0	3

As presented in the part relative to the index, a factor, namely “W”, is meant to weight chosen criteria depending on the user priorities and the context of the study. On the 4th and 5th rows are respectively the list of criteria and the weight they have in the index calculation. Each criterion has its own weight. Weight has no maximal value, which means that one can use any range and any pace that seems adapted, even if weighting too much might cause other criteria to “disappear”. Null values are handled by the calculations, which means that a completely irrelevant criteria for a special analysis can be “erased” from the index. However, it does not take negative values, and if a negative one is written, the cell will turn red and the index will give an error. Please correct it.

4.3. Calculation



Family	Technique	AI	AI	AI	AI	AI	AI	AI
Forests	Phytoremediation forest	73	0	-0.117540494	-0.070930724	-0.154970473	-0.117540494	-0.154970473
Forests	Urban forest	73	-0.070930724	-0.117540494	-0.070930724	-0.070930724	-0.070930724	-0.154970473
Agriculture	Agroforestry	73	-0.070930724	-0.117540494	-0.070930724	-0.070930724	-0.070930724	-0.154970473
Terraces and Slopes	Living smiles	-0.117540494	-0.154970473	-0.117540494	-0.117540494	0	-0.070930724	-0.154970473
Terraces and Slopes	Wattle fences	-0.117540494	-0.154970473	-0.117540494	-0.117540494	0	-0.070930724	-0.154970473
Terraces and Slopes	Vegetated gabions	-0.117540494	-0.154970473	-0.117540494	-0.117540494	0	-0.070930724	-0.154970473
River and Stream Renaturation	Bank and bed renaturation	73	0	-0.154970473	0	0	-0.117540494	-0.154970473
River and Stream Renaturation	Stream daylighting	73	0	-0.154970473	0	0	-0.117540494	-0.154970473

The calculation part of the sheet has the same size as the table with affinities for functions and benefits since it calculates the partial Shannon value for each criteria. Each cell thus has the following formula:

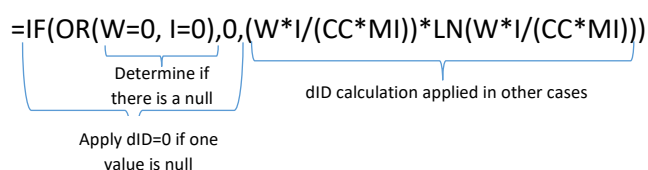
$$dID = W * F_i * \ln(W * F_i)$$

Where:

- dID is the partial index;
- c is the criteria number, ranging from 1 to 19;
- F_i is the frequency of the “ i^{th} ” criteria ($\frac{\text{ith Value}}{\text{Sum of maximal possible values of a row}}$);
- Ln is the natural logarithm;
- W is the criteria weighting factor seen in 4.2.

As a reminder, to avoid errors, a special condition has been set for calculations involving null criteria or W values, by directly assigning dI to 0. In other words, an excel formula is built as follows:

$$=IF(OR(W=0, I=0), 0, (W*I/(CC*MI))^*LN(W*I/(CC*MI)))$$



Where

- W is the criteria weighting factor seen in 4.2;
- I is the affinity of a technique with a function or benefit;
- CC is the “Criteria count” (equals 19);
- MI is the “Maximal intensity” (equals 3).

The sum of dID of a row gives the index value of this row.

5. Effective area sheet

	A	B	C	D	E
1	Families	Minimal effective size	Maximal effective size	Unit	Complementary details
2	Forests				
3	Agriculture				
4	Terraces and Slopes				
5	River and Stream Renaturation				
6	Building solutions				
7	Open Green Spaces				
8	Green corridors				
9	Urban Farming				
10	Bioretention Areas	3	6 %		of the drainage area
11	Natural Inland Wetlands				
12	Constructed Inland Wetlands				
13	River Floodplains				
14	Submerged structures	50	m		wide
15	Salt Marshes	200	10000 m		wide
16	Sandy Shores				
17	Water management				

The data contained in this sheet is not meant to be used as such, but more in case of future experiments to implement nature based solutions in risk assessment.

- “Families” refers to families used in the “NBS inventory” sheet.
- “Minimal effective size” is determined as the length/width/area from which benefits are quantifiable or have a significant effect.
- “Maximal effective size” is determined as the length/width/area from which the increase in size will not have a significant increase in benefits.
- “Unit” is the dimension relative to the data in “Minimal effective size” and “Maximal effective size” fields.
- “Complementary details” precises the type of measurement defined by the data.

6. Updates history

Date	User	Function	Description
			First release of the NBS inventory and its manual.

8.5. Annexe E : code python du modèle de flux gravitaire

```
# -*- coding: utf-8 -*-

"""

Generated by ArcGIS ModelBuilder on : 2023-08-20 15:58:27

"""

import arcpy

from arcpy.sa import *
from arcpy.sa import *
from arcpy.sa import *
from arcpy.sa import *
from arcpy.sa import *
from arcpy.sa import *
from sys import argv


def modele2(Floodplain_slope_reclassification_rule, Instream_slope_reclassification_rule,
LU_reclass_rule_CCI_or_Worldcover, DEM_resolution="30",
Floodplain_relevance_tif="D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Floodplain_relevance.tif",
Instream_diversification_relevance="D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Instream_diversification_relevance",
Wetlands_relevance_tif="D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Wetlands_relevance.tif", DSMW_2_layer, River_discharge_layer, Raw_DEM,
River_width_depth_layer, Watershed_layer, Land_use_raster): # modele 2


    # To allow overwriting outputs change overwriteOutput option to True.

    arcpy.env.overwriteOutput = False


    # Check out any necessary licenses.

    arcpy.CheckOutExtension("spatial")

    arcpy.CheckOutExtension("3D")

    arcpy.CheckOutExtension("ImageAnalyst")


    Extent = "27,9998611111 -1,9998611111 31,9998614311 2,0001392089
GEOGCS[\"GCS_WGS_1984\",DATUM[\"D_WGS_1984\",SPHEROID[\"WGS_1984\",6378137.0,298.25
7223563]],PRIMEM[\"Greenwich\",0.0],UNIT[\"Degree\",0.0174532925199433]]"
```

```

# Process: Extract by Mask (2) (Extraction par masque) (sa)

extr_DEMpoly_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers    temporaires
modelbuilder\\extr_DEMpoly.tif"

Extract_by_Mask_2_ = extr_DEMpoly_tif

with arcpy.EnvManager(extent=Extent):

    extr_DEMpoly_tif = arcpy.sa.ExtractByMask(in_raster=Raw_DEM,
in_mask_data=Watershed_layer, extraction_area="INSIDE", analysis_extent="27,9998611111 -
1,9998611111 31,9998614311 2,0001392089
GEOGCS[\"GCS_WGS_1984\",DATUM[\"D_WGS_1984\",SPHEROID[\"WGS_1984\",6378137.0,298.25
7223563]],PRIMEM[\"Greenwich\",0.0],UNIT[\"Degree\",0.0174532925199433]]")

    extr_DEMpoly_tif.save(Extract_by_Mask_2_)


# Process: Fill (Remplissage) (sa)

extrfill_DEM_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers    temporaires
modelbuilder\\extrfill_DEM.tif"

Fill = extrfill_DEM_tif

extrfill_DEM_tif = arcpy.sa.Fill(in_surface_raster=extr_DEMpoly_tif, z_limit=None)

extrfill_DEM_tif.save(Fill)


# Process: Flow Direction (Direction de flux) (sa)

Flowdir_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers    temporaires
modelbuilder\\Flowdir.tif"

Flow_Direction = Flowdir_tif

Output_drop_raster = ""

Flowdir_tif = arcpy.sa.FlowDirection(in_surface_raster=extrfill_DEM_tif,
force_flow="NORMAL", out_drop_raster=Output_drop_raster, flow_direction_type="D8")

Flowdir_tif.save(Flow_Direction)


# Process: Clip (Découper) (analysis)

Watershed_rivers2_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers    temporaires
modelbuilder\\Watershed rivers2.shp"

```

```

        arcpy.analysis.Clip(in_features=River_discharge_layer, clip_features=Watershed_layer,
out_feature_class=Watershed_rivers2_shp, cluster_tolerance="")

```

```

# Process: Add Field (Ajouter un champ) (management)

```

```

with arcpy.EnvManager(workspace=r"D:\Documents\ArcGIS\Projects\test modele 2\test
modele 2.gdb"):

```

```

    Watershed_rivers_shp_2_ =
arcpy.management.AddField(in_table=Watershed_rivers2_shp, field_name="Bufdist",
field_type="LONG", field_precision=None, field_scale=None, field_length=None, field_alias="",
field_is_nullable="NULLABLE", field_is_required="NON_REQUIRED", field_domain="")[0]

```

```

# Process: Calculate Field (Calculer un champ) (management)

```

```

    Watershed_rivers2_shp_4_ =
arcpy.management.CalculateField(in_table=Watershed_rivers_shp_2_, field="Bufdist",
expression="buff( !DISCHARGE!)", expression_type="PYTHON3", code_block="""def buff(d):

```

```

    if d > 10000:

```

```

        return 8000

```

```

    elif d > 1000:

```

```

        return 4000

```

```

    elif d > 100:

```

```

        return 2000

```

```

    elif d > 10:

```

```

        return 1000

```

```

    else:

```

```

        return 500""", field_type="TEXT", enforce_domains="NO_ENFORCE_DOMAINS")[0]

```

```

# Process: Définir une projection (Définir une projection) (management)

```

```

    Watershed_rivers2_shp_2_ =
arcpy.management.DefineProjection(in_dataset=Watershed_rivers2_shp_4_,
coor_system="PROJCS[\"WGS_1972_UTM_Zone_36N\",GEOGCS[\"GCS_WGS_1972\",DATUM[\"D_W
GS_1972\",SPHEROID[\"WGS_1972\",6378135.0,298.26]],PRIMEM[\"Greenwich\",0.0],UNIT[\"Degr
e\",0.0174532925199433]],PROJECTION[\"Transverse_Mercator\"],PARAMETER[\"False_Easting\",50
0000.0],PARAMETER[\"False_Northing\",0.0],PARAMETER[\"Central_Meridian\",33.0],PARAMETER[\"
Scale_Factor\",0.9996],PARAMETER[\"Latitude_Of_Origin\",0.0],UNIT[\"Meter\",1.0]]")[0]

```

```

# Process: Buffer (Zone tampon) (analysis)

```

```

    rivers_buffer2_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\rivers_buffer2.shp"

```

```

arcpy.analysis.Buffer(in_features=Watershed_rivers2_shp_2_,
out_feature_class=rivers_buffer2_shp, buffer_distance_or_field="Bufdist", line_side="FULL",
line_end_type="ROUND", dissolve_option="ALL", dissolve_field=[], method="PLANAR")

```

```

# Process: Add Field (7) (Ajouter un champ) (management)

```

```

rivers_buffer2_shp_2_ = arcpy.management.AddField(in_table=rivers_buffer2_shp,
field_name="Value", field_type="LONG", field_precision=None, field_scale=None, field_length=None,
field_alias="", field_is_nullable="NULLABLE", field_is_required="NON_REQUIRED",
field_domain="")[0]

```

```

# Process: Calculate Field (7) (Calculer un champ) (management)

```

```

rivers_buffer2_shp_3_ = arcpy.management.CalculateField(in_table=rivers_buffer2_shp_2_,
field="Value", expression="2", expression_type="PYTHON_9.3", code_block="""def buff(d):

```

```

if d > 10000:

```

```

    return 8000

```

```

elif d > 1000:

```

```

    return 4000

```

```

elif d > 100:

```

```

    return 2000

```

```

elif d > 10:

```

```

    return 1000

```

```

else:

```

```

    return 500""", field_type="TEXT", enforce_domains="NO_ENFORCE_DOMAINS")[0]

```

```

# Process: Clip (2) (Découper) (analysis)

```

```

DSMW_2_Clip = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\DSMW_2_Clip"

```

```

arcpy.analysis.Clip(in_features=DSMW_2_layer, clip_features=Watershed_layer,
out_feature_class=DSMW_2_Clip, cluster_tolerance="")

```

```

# Process: Select (2) (Sélectionner) (analysis)

```

```

FloodP_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\FloodP.shp"

```

```

arcpy.analysis.Select(in_features=DSMW_2_Clip, out_feature_class=FloodP_shp,
where_clause='"DOMSOI" IN (\'J\', \'B\', \'Q\', \'A\', \'N\') OR "DOMSOI" IN (\'Gm\', \'M\', \'Mo\', \'Mg\', \'Sm\', \'Tm\',
\'Wm\', \'Zm\')')

```

```

# Process: Add Field (3) (Ajouter un champ) (management)

FloodP_shp_2_ = arcpy.management.AddField(in_table=FloodP_shp,
field_name="Soil_value", field_type="SHORT", field_precision=None, field_scale=None,
field_length=None, field_alias="", field_is_nullable="NULLABLE", field_is_required="NON_REQUIRED",
field_domain="")[0]

# Process: Calculate Field (3) (Calculer un champ) (management)

FloodP_shp_4_ = arcpy.management.CalculateField(in_table=FloodP_shp_2_,
field="Soil_value", expression="fp_subs(!DOMSOI!)", expression_type="PYTHON_9.3",
code_block="""def fp_subs(f):

    if f in ('J', 'Je', 'Jc', 'Jd', 'Jt', 'B', 'Be', 'Bd', 'Bh', 'Bg', 'Bx', 'Bk', 'Bc', 'Bv', 'Bf', 'Q', 'Qc', 'Ql', 'Qf',
'Qa', 'A', 'Ao', 'Af', 'Ah', 'Ap', 'Ag', 'N', 'Ne', 'Nd', 'Nh', 'Gm', 'M', 'Mo', 'Mg', 'Sm', 'Tm', 'Wm', 'Zm'):

        return 2""", field_type="TEXT", enforce_domains="NO_ENFORCE_DOMAINS")[0]

# Process: Select (3) (Sélectionner) (analysis)

Wtlds_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Wtlds.shp"

arcpy.analysis.Select(in_features=DSMW_2_Clip, out_feature_class=Wtlds_shp,
where_clause="\"DOMSOI\"
IN('Jc','Jd','Je','J','Jt','Gc','Gd','Ge','Gx','G','Gh','Gm','Gp','Od','Oe','Ox','O','Wd','We','Wx','Wh','Wm','W'
,'Ws','Ap','Fp','Gp','Lp','A','Af','Ag','Ah','Ao','Ap','Bk','B','Bc','Bd','Be','Bf','Bx','Bg','Bh','Bv','Qa','Q','Qc','
'Qf','Ql','Sg','Sm','So','S','T','Th','Tm','To','Tv','Zg','Zm','Zo','Z','Zt','Fa','F','Fh','Fo','Fp','Fr','Fx','Pf','Pg','Ph',
'Pl','Po','Pp','P','Vc','Vp','V')")

# Process: Add Field (4) (Ajouter un champ) (management)

Wtlds_shp_2_ = arcpy.management.AddField(in_table=Wtlds_shp, field_name="Soil_value",
field_type="SHORT", field_precision=None, field_scale=None, field_length=None, field_alias="",
field_is_nullable="NULLABLE", field_is_required="NON_REQUIRED", field_domain="")[0]

# Process: Calculate Field (4) (Calculer un champ) (management)

Wtlds_shp_4_ = arcpy.management.CalculateField(in_table=Wtlds_shp_2_,
field="Soil_value", expression="Wtlds_subs(!DOMSOI!)", expression_type="PYTHON_9.3",
code_block="""def Wtlds_subs(w):

    if w in ('Jc', 'Jd', 'Je', 'J', 'Jt', 'Gc', 'Gd', 'Ge', 'Gx', 'G', 'Gh', 'Gm', 'Gp', 'Od', 'Oe', 'Ox', 'O', 'Wd',
'We', 'Wx', 'Wh', 'Wm', 'W', 'Ws', 'Ap', 'Fp', 'Gp', 'Lp'):

        return 3

    elif w in ('A', 'Af', 'Ag', 'Ah', 'Ao', 'Ap', 'Bk', 'B', 'Bc', 'Bd', 'Be', 'Bf', 'Bx', 'Bg', 'Bh', 'Bv', 'Qa', 'Q',
'Qc', 'Qf', 'Ql', 'Sg', 'Sm', 'So', 'S', 'T', 'Th', 'Tm', 'To', 'Tv', 'Zg', 'Zm', 'Zo', 'Z', 'Zt'):

        return 2

```

```

elif w in ('Fa', 'F', 'Fh', 'Fo', 'Fp', 'Fr', 'Fx', 'Pf', 'Pg', 'Ph', 'Pl', 'Po', 'Pp', 'P', 'Vc', 'Vp', 'V'):
    return 1"", field_type="TEXT", enforce_domains="NO_ENFORCE_DOMAINS")[0]

# Process: Select (Sélectionner) (analysis)

riv_soils_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\riv_soils.shp"

arcpy.analysis.Select(in_features=DSMW_2_Clip, out_feature_class=riv_soils_shp,
where_clause="\DOMSOI\" IN
('I','Po','Fo','Yk','Qc','Y','Ao','WR','DS','Fx','Bx','Bd','Qf','Xk','Yl','Rc','Rx','Be','Lf','Je','Lo','Vc','Kl','Re','De','
Lc','Kh','Od','Gx','Yh','Gd'))

# Process: Add Field (2) (Ajouter un champ) (management)

riv_soils_shp_2_ = arcpy.management.AddField(in_table=riv_soils_shp,
field_name="Soil_value", field_type="SHORT", field_precision=None, field_scale=None,
field_length=None, field_alias="", field_is_nullable="NULLABLE", field_is_required="NON_REQUIRED",
field_domain="")[0]

# Process: Calculate Field (2) (Calculer un champ) (management)

riv_soils_shp_3_ = arcpy.management.CalculateField(in_table=riv_soils_shp_2_,
field="Soil_value", expression="riv_subs(!DOMSOI!)", expression_type="PYTHON_9.3",
code_block="""def riv_subs(so):

    if so == 'I':

        return 3

    elif so in ('Po', 'Fo', 'Yk', 'Qc', 'Y', 'Ao', 'WR', 'DS', 'Fx'):

        return 2

    elif so in ('Bx', 'Bd', 'Qf', 'Xk', 'Yl', 'Rc', 'Rx', 'Be', 'Lf', 'Je', 'Lo', 'Vc', 'Kl', 'Re', 'De', 'Lc', 'Kh', 'Od',
'Gx', 'Yh', 'Gd'):

        return 1"", field_type="TEXT", enforce_domains="NO_ENFORCE_DOMAINS")[0]

# Process: Clip (3) (Découper) (analysis)

Watershedrivs_WiDe_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Watershedrivs_WiDe.shp"

arcpy.analysis.Clip(in_features=River_width_depth_layer, clip_features=Watershed_layer,
out_feature_class=Watershedrivs_WiDe_shp, cluster_tolerance="")

# Process: Slope (Pente) (sa)

```

```
extrslope_DEM_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires  
modelbuilder\\extrslope_DEM.tif"
```

```
Slope = extrslope_DEM_tif
```

```
extrslope_DEM_tif = arcpy.sa.Slope(in_raster=extrfill_DEM_tif,  
output_measurement="DEGREE", z_factor=1, method="PLANAR", z_unit="METER")
```

```
extrslope_DEM_tif.save(Slope)
```

```
# Process: Reclass by ASCII File (2) (Reclasser par fichier ASCII) (3d)
```

```
Instrrec_slope_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires  
modelbuilder\\Instrrec_slope.tif"
```

```
arcpy.ddd.ReclassByASCIIFile(in_raster=extrslope_DEM_tif,  
in_remap_file=Instrstream_slope_reclassification_rule, out_raster=Instrrec_slope_tif,  
missing_values="DATA")
```

```
Instrrec_slope_tif = arcpy.Raster(Instrrec_slope_tif)
```

```
# Process: Raster to Polygon (Raster vers polygones) (conversion)
```

```
Instr_slopePolyg_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires  
modelbuilder\\Instr_slopePolyg.shp"
```

```
arcpy.conversion.RasterToPolygon(in_raster=Instrrec_slope_tif,  
out_polygon_features=Instr_slopePolyg_shp, simplify="SIMPLIFY", raster_field="VALUE",  
create_multipart_features="SINGLE_OUTER_PART", max_vertices_per_feature=None)
```

```
# Process: Spatial Join (Jointure spatiale) (analysis)
```

```
Rivs_WiDe_Slope_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires  
modelbuilder\\Rivs_WiDe_Slope.shp"
```

```
arcpy.analysis.SpatialJoin(target_features=Watershedrivs_WiDe_shp,  
join_features=Instr_slopePolyg_shp, out_feature_class=Rivs_WiDe_Slope_shp,  
join_operation="JOIN_ONE_TO_MANY", join_type="KEEP_ALL", field_mapping="",  
match_option="WITHIN", search_radius="", distance_field_name="")
```

```
# Process: Add Field (5) (Ajouter un champ) (management)
```

```
Rivs_WiDe_Slope_shp_3_ = arcpy.management.AddField(in_table=Rivs_WiDe_Slope_shp,  
field_name="Rivs_value", field_type="SHORT", field_precision=None, field_scale=None,  
field_length=None, field_alias="", field_is_nullable="NULLABLE", field_is_required="NON_REQUIRED",  
field_domain="")[0]
```

```
# Process: Calculate Field (5) (Calculer un champ) (management)
```

```

Rivs_WiDe_Slope_shp_2_ =
arcpy.management.CalculateField(in_table=Rivs_WiDe_Slope_shp_3_, field="Rivs_value",
expression=" riv_types( !GRIDCODE! , !B_ratio!)", expression_type="PYTHON_9.3", code_block="""def
riv_types(s, b):

```

```

    if s == 4 and b < 40:

```

```

        return 3

```

```

    elif s == 3 and b > 12:

```

```

        return 2

```

```

    elif s == 3 and b < 12:

```

```

        return 3

```

```

    elif s == 2 and b > 40:

```

```

        return 2

```

```

    elif s == 2 and b > 12 and b < 40:

```

```

        return 1

```

```

    elif s == 2 and b < 12:

```

```

        return 2

```

```

    elif s == 1:

```

```

        return 0""", field_type="TEXT", enforce_domains="NO_ENFORCE_DOMAINS")[0]

```

```

# Process: Spatial Join (2) (Jointure spatiale) (analysis)

```

```

RiWDSlo_Subs_shp = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\RiWDSlo_Subs.shp"

```

```

arcpy.analysis.SpatialJoin(target_features=Rivs_WiDe_Slope_shp_2_,
join_features=riv_soils_shp_3_, out_feature_class=RiWDSlo_Subs_shp,
join_operation="JOIN_ONE_TO_MANY", join_type="KEEP_COMMON", field_mapping="Join_Count
\\Join_Count\\" true true false 0 Long 0 0,First,#,D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers
temporaires modelbuilder\\Rivs_WiDe_Slope.shp,Join_Count,-1,-1;TARGET_FID \\\"TARGET_FID\\\" true
true false 0 Long 0 0,First,#,D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Rivs_WiDe_Slope.shp,TARGET_FID,-1,-1;JOIN_FID \\\"JOIN_FID\\\" true true false 0 Long 0
0,First,#,D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Rivs_WiDe_Slope.shp,JOIN_FID,-1,-1;Rivs_value \\\"Rivs_value\\\" true true false 0 Short
0 0,First,#,D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Rivs_WiDe_Slope.shp,Rivs_value,-1,-1;Soil_value \\\"Soil_value\\\" true true false 0 Short
0 0,First,#,D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\riv_soils.shp,Soil_value,-1,-1", match_option="WITHIN", search_radius="",
distance_field_name="")

```

```

# Process: Add Field (6) (Ajouter un champ) (management)

```

```

    RiWDSlo_Subs_shp_2_ = arcpy.management.AddField(in_table=RiWDSlo_Subs_shp,
field_name="Relevance", field_type="SHORT", field_precision=None, field_scale=None,
field_length=None, field_alias="", field_is_nullable="NULLABLE", field_is_required="NON_REQUIRED",
field_domain="")[0]

```

Process: Calculate Field (6) (Calculer un champ) (management)

```

    RiWDSlo_Subs_shp_3_ =
arcpy.management.CalculateField(in_table=RiWDSlo_Subs_shp_2_, field="Relevance",
expression="!Rivs_value!+ !Soil_value!", expression_type="PYTHON_9.3", code_block="",
field_type="TEXT", enforce_domains="NO_ENFORCE_DOMAINS")[0]

```

Process: Reclass by ASCII File (3) (Reclasser par fichier ASCII) (3d)

```

    FloodPrec_slope_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\FloodPrec_slope.tif"

```

```

    arcpy.ddd.ReclassByASCIIFile(in_raster=extrslop_DEM_tif,
in_remap_file=Floodplain_slope_reclassification_rule, out_raster=FloodPrec_slope_tif,
missing_values="DATA")

```

```

    FloodPrec_slope_tif = arcpy.Raster(FloodPrec_slope_tif)

```

Process: Flow Accumulation (Accumulation de flux) (sa)

```

    FlowAcc2_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\FlowAcc2.tif"

```

```

    Flow_Accumulation = FlowAcc2_tif

```

```

    FlowAcc2_tif = arcpy.sa.FlowAccumulation(in_flow_direction_raster=Flowdir_tif,
in_weight_raster="", data_type="FLOAT", flow_direction_type="D8")

```

```

    FlowAcc2_tif.save(Flow_Accumulation)

```

Process: Raster Calculator (2) (Calculatrice raster) (sa)

```

    Tan_slope2 = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires
modelbuilder\\Tan_slope2"

```

```

    Raster_Calculator_2_ = Tan_slope2

```

```

    Tan_slope2 = Tan(extr�lop_DEM_tif)

```

```

    Tan_slope2.save(Raster_Calculator_2_)

```

Process: Raster Calculator (Calculatrice raster) (sa)

```

TWI_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires modelbuilder\\TWI.tif"
Raster_Calculator = TWI_tif
TWI_tif = Ln(FlowAcc2_tif/Tan_slope2)
TWI_tif.save(Raster_Calculator)

# Process: Raster Calculator (3) (Calculatrice raster) (sa)
DIS_tif = "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers temporaires modelbuilder\\DIS.tif"
Raster_Calculator_3_ = DIS_tif
DIS_tif = extrfill_DEM_tif- extr_DEMpoly_tif
DIS_tif.save(Raster_Calculator_3_)

# Process: Raster Calculator (4) (Calculatrice raster) (sa)
DTWI_tif      =      "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers      temporaires
modelbuilder\\DTWI.tif"
Raster_Calculator_4_ = DTWI_tif
DTWI_tif = (DIS_tif/"%Raster resolution%") ^ (Tan_slope2)
DTWI_tif.save(Raster_Calculator_4_)

# Process: Extract by Mask (Extraction par masque) (sa)
extr_landuse_tif      =      "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers      temporaires
modelbuilder\\extr_landuse.tif"
Extract_by_Mask = extr_landuse_tif
extr_landuse_tif      =      arcpy.sa.ExtractByMask(in_raster=Land_use_raster,
in_mask_data=Watershed_layer, extraction_area="INSIDE", analysis_extent="61490,1904438258 -
165040,584422294      275839,069714657      116186,16657577
PROJCS["WGS_1972_UTM_Zone_36N",GEOGCS["GCS_WGS_1972",DATUM["D_WGS_1972",SP
HEROID["WGS_1972",6378135.0,298.26]],PRIMEM["Greenwich",0.0],UNIT["Degree",0.0174532
925199433]],PROJECTION["Transverse_Mercator"],PARAMETER["False_Easting",500000.0],PARA
METER["False_Northing",0.0],PARAMETER["Central_Meridian",33.0],PARAMETER["Scale_Factor\
",0.9996],PARAMETER["Latitude_Of_Origin",0.0],UNIT["Meter",1.0]]")
extr_landuse_tif.save(Extract_by_Mask)

```

```

# Process: Reclass by ASCII File (Reclasser par fichier ASCII) (3d)

exrec_landuse_tif      =      "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers      temporaires
modelbuilder\\exrec_landuse.tif"

arcpy.ddd.ReclassByASCIIFile(in_raster=extr_landuse_tif,
in_remap_file=LU_reclass_rule_CCI_or_Worldcover,          out_raster=exrec_landuse_tif,
missing_values="DATA")

exrec_landuse_tif = arcpy.Raster(exrec_landuse_tif)


# Process: Polygon to Raster (2) (Polygones vers rasters) (conversion)

Wtlds_soils_tif      =      "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers      temporaires
modelbuilder\\Wtlds_soils.tif"

arcpy.conversion.PolygonToRaster(in_features=Wtlds_shp_4_,      value_field="Soil_value",
out_rasterdataset=Wtlds_soils_tif,      cell_assignment="CELL_CENTER",      priority_field="NONE",
cellsize="0,0047", build_rat="BUILD")


# Process: Polygon to Raster (3) (Polygones vers rasters) (conversion)

Rivs_buff      =      "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers      temporaires
modelbuilder\\Rivs_buff"

arcpy.conversion.PolygonToRaster(in_features=rivers_buffer2_shp_3_, value_field="Value",
out_rasterdataset=Rivs_buff, cell_assignment="CELL_CENTER", priority_field="NONE", cellsize="",
build_rat="BUILD")


# Process: Raster Calculator (6) (Calculatrice raster) (sa)

Raster_Calculator_6_ = Wetlands_relevance_tif

Wetlands_relevance_tif = exrec_landuse_tif+Wtlds_soils_tif+TWI_tif+ Rivs_buff

Wetlands_relevance_tif.save(Raster_Calculator_6_)


# Process: Polygon to Raster (Polygones vers rasters) (conversion)

FloodP_soils_tif      =      "D:\\Documents\\travail\\Popo\\4A\\fichiers      temporaires
modelbuilder\\FloodP_soils.tif"

arcpy.conversion.PolygonToRaster(in_features=FloodP_shp_4_,      value_field="Soil_value",
out_rasterdataset=FloodP_soils_tif,      cell_assignment="CELL_CENTER",      priority_field="NONE",
cellsize="", build_rat="BUILD")


# Process: Raster Calculator (5) (Calculatrice raster) (sa)

Raster_Calculator_5_ = Floodplain_relevance_tif

```

```

Floodplain_relevance_tif =
exrec_landuse_tif+FloodP_soils_tif+FloodPrec_slope_tif+TWI_tif+ Rivs_buff

Floodplain_relevance_tif.save(Raster_Calculator_5_)

```

Process: Make Feature Layer (Créer une couche d'entités) (management)

```

arcpy.management.MakeFeatureLayer(in_features=RiWDSlo_Subs_shp_3_,
out_layer=Instream_diversification_relevance, where_clause="", workspace="",
field_info="Join_Count Join_Count VISIBLE NONE;TARGET_FID TARGET_FID VISIBLE NONE;JOIN_FID
JOIN_FID VISIBLE NONE;Join_Count Join_Count VISIBLE NONE;TARGET_FID TARGET_FID VISIBLE
NONE;JOIN_FID JOIN_FID VISIBLE NONE;Rivs_value Rivs_value VISIBLE NONE;Soil_value Soil_value
VISIBLE NONE;Relevance Relevance VISIBLE NONE")

```

Process: Suppr (Suppr) (management)

```

if Floodplain_relevance_tif and Instream_diversification_relevance and
Wetlands_relevance_tif:

```

```

    Suppression_réussie = arcpy.management.Delete(in_data=[Watershed_rivers2_shp,
Watershed_rivers2_shp_2_, rivers_buffer2_shp_3_, FloodP_shp_4_, Wtlds_shp_4_, riv_soils_shp_3_,
Rivs_WiDe_Slope_shp_2_, RiWDSlo_Subs_shp_3_, DSMW_2_Clip, Watershedrivs_WiDe_shp,
Instrrec_slope_tif, Instr_slopePolyg_shp, FloodPrec_slope_tif, extr_DEMpoly_tif, extrfill_DEM_tif,
Flowdir_tif, FlowAcc2_tif, TWI_tif, extrslop_DEM_tif, Tan_slope2, DIS_tif, DTWI_tif, extr_landuse_tif,
exrec_landuse_tif], data_type="")[0]

```

```

if __name__ == '__main__':

```

Global Environment settings

```

with arcpy.EnvManager(scratchWorkspace=r"D:\Documents\ArcGIS\Projects\test modele
2\test modele 2.gdb", workspace=r"D:\Documents\ArcGIS\Projects\test modele 2\test modele
2.gdb"):

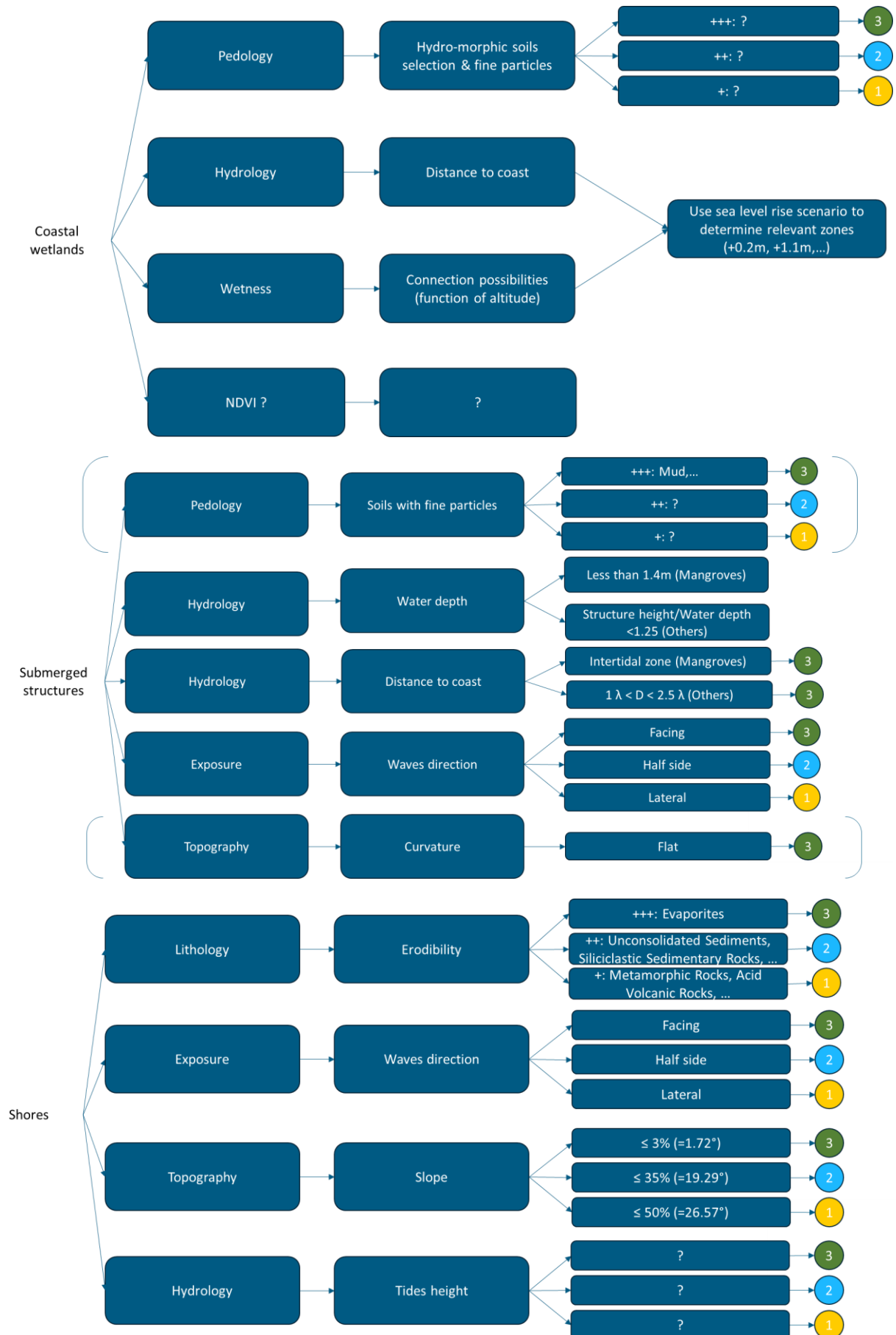
```

```

    modele2(*argv[1:])

```

8.6. Annexe F : représentations graphiques du modèle de flux directionnel





POLYTECH
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Pierre Trillaud
2022-2023

Rapport de stage individuel : Mitiger les risques par les Solutions Basées sur la Nature

Résumé :

Ce rapport aborde l'étude des solutions basées sur la nature (tiré de l'anglais « nature-based solution ») au travers de la conception de 2 outils permettant d'illustrer et appliquer cette récente notion encore méconnue. Alors que le biomimétisme devient partie intégrante de nos sociétés, les solutions basées sur la nature peuvent aussi leur apporter de grands changements, aussi bien dans la santé que pour la sécurité de chacun. Cela est d'autant plus vrai dans le contexte de changement climatique actuel, mettant à rude épreuve les solutions conventionnelles, dites « grises ». Les solutions basées sur la nature remettent en question les fonctionnements sociétaux en amenant à penser d'une toute autre façon. Et si, afin de mitiger les risques naturels, nous ne luttons pas contre la nature mais plutôt avec elle ?

Mots Clés : Environnement, solutions basées sur la nature, réduction des risques, analyse territoriale, conception de méthode

Antea Group - Ghent Office:
Buchtenstraat 9, 9051
Gent, Belgique

Tuteur entreprise :
Tom D'Haeyer
Manager développement
commercial international

Tuteur académique :
Vincent Rotgé