

Gestion des inondations à Chlef en Algérie par les Solutions fondées sur la Nature – Approche par simulation

Fethi Hamzaoui¹, Franck Taillandier²

¹ EOLE (Université Aboubekr Belkaid) Tlemcen, Algérie

² RECOVER (INRAE, Aix Marseille Université), Aix-en-Provence, France

RESUME Les inondations font partie des risques naturels fortement impactés par le changement climatique et dont l'ampleur impose des nouvelles stratégies de gestion du risque. Une stratégie de plus en plus mise en avant se base sur les Solutions fondées sur la Nature (SfN). Si leur intérêt a été attesté par de nombreuses études, leur usage reste limité, et encore plus en Algérie, où ce concept est encore méconnu. Dans ce travail, nous ferons appel à la simulation multi-agents pour démontrer l'intérêt du recours aux SfN en Algérie en simulant des scénarios d'inondation en prenant en compte différentes stratégies et en évaluant un ensemble de critères (nombre de victimes en cas d'inondation, impact environnemental...). Le modèle a été instancié à la ville de Chlef qui est soumise au risque d'inondation. La simulation a permis de comparer différentes stratégies, basées sur des SfN ou non, afin de démontrer l'intérêt des SfN dans un tel contexte.

Mots-clefs Inondation, Solution fondée sur la Nature, Simulation multi-agents, Chlef

I. INTRODUCTION

Les inondations constituent un risque majeur dans le monde causant chaque année de nombreux dégâts et victimes. A l'instar du reste du monde, l'Algérie a connu de nombreuses inondations, qui, sous l'influence du changement climatique et de l'urbanisation, n'ont cessé d'augmenter (Banque mondiale, 2023). Face à l'augmentation de ce risque, l'ensemble des acteurs publics et privés, et surtout les scientifiques, se doivent d'innover en matière de gestion des risques naturels, afin de répondre aux multiples défis liés à la gestion durable des catastrophes naturelles, qui doit faire l'objet d'un véritable plan d'action national. Les solutions fondées sur la nature (SfN) sont un concept global récent qui vise à répondre aux défis sociétaux tels que la gestion des risques tout en apportant des bénéfices à la biodiversité et à l'environnement (UICN, 2016). Elles représentent une alternative économiquement viable et durable, souvent moins coûteuse à long terme que les investissements technologiques ou la construction et l'entretien d'infrastructures pour relever des défis sociétaux tels que le changement climatique ou la gestion des risques naturels (Beceiro et al., 2022).

En Algérie, la prévention de ces risques revêt un intérêt particulier pour le développement durable du pays. Une série de mesures a été définie en juillet 2003, qui a notamment abouti à la mise en place de la loi 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable (Redjem et al., 2020).

Pour promouvoir la gestion des risques par les SfN dans les territoires, tels que l'Algérie, où elles sont peu connus/reconnus, il est nécessaire de faire la démonstration de leur intérêt. Pour cela, la simulation informatique peut être particulièrement pertinente. Ainsi, afin de contribuer aux réflexions sur l'utilisation des SfN pour répondre à la gestion des risques en Algérie, nous chercherons à proposer un modèle capable de simuler une inondation et de tester plusieurs scénarios d'aménagement alternatif intégrant des SfN. Pour cela, nous allons nous appuyer sur la simulation multi-agent d'inondation. Elle permettra de simuler des scénarios d'inondation et d'évaluer les possibles conséquences. L'objectif de cet article est double avec une contribution méthodologique et une contribution applicative. Sur le plan méthodologique, nous proposons un modèle Agent implémentable à tout territoire permettant de simuler l'introduction de solutions fondées sur la nature pour faire face aux inondations. Ce modèle permettra de tester des stratégies d'aménagement alternatives et ainsi de démontrer l'intérêt des SfN.

Dans une première partie, nous ferons un état de l'art sur ces deux plans (simulation de l'inondation et implémentation des SfN en Algérie). Nous exposerons ensuite le modèle Agent que nous avons développé. Enfin, nous étudierons comment l'implémenter pour répondre à la question de la gestion des inondations à Chlef, en Algérie. Finalement, nous discuterons des résultats et de leur généralisation.

II. ETAT DE L'ART

A. SfN et mise en œuvre

De nombreux travaux de recherche se sont intéressés aux SfN, et notamment dans le cadre de la gestion des inondations. Globalement, ces travaux visent plusieurs objectifs : évaluer les SfN, étudier la perception des SfN par les différents acteurs, sensibiliser les acteurs aux SfN, ou aider à décider autour des SfN.

L'évaluation des SfN, que ce soit à court terme ou à long terme, sur la base de critères hydrauliques ou environnementaux fait l'objet d'une littérature abondante (Biswal et al., 2022; Moazzem et al., 2024; Nika et al., 2020). De la même façon, d'autres travaux se sont intéressés aux enjeux d'aide à la décision autour des SfN (Croeser et al., 2021; Matos et al., 2022; Taillandier et al., 2023). Enfin, certains auteurs se sont intéressés à leur implémentation concrète dans les territoires, que ce soit en Europe (Beceiro et al., 2022; Kauark-Fontes et al., 2023), aux Etats-Unis (Guido et al., 2023; Lipiec, 2020), ou en Afrique sub-saharienne (Asare, 2021; Enu et al., 2022)... Cependant, peu de travaux se sont penchés sur le contexte Algérien.

Il existe un certain nombre de travaux qui s'intéressent aux SfN dans les pays méditerranéens, ainsi que dans les pays du continent Africain, mais sans véritablement s'intéresser au contexte Algérien. C'est par exemple le cas de (Kiribou et al., 2024) qui expose la situation des SfN en Afrique. L'article conclue sur les opportunités des SfN dans les pays de ce continent. Toutefois, l'Algérie y est simplement évoquée pour notamment indiquer qu'aucun projet de SfN n'y a été relevé. La seule étude sur les SfN en Algérie qui semble être référencée dans la littérature scientifique porte sur l'évaluation de SfN en termes de services écosystémiques liés à l'eau (Marijuan et al., 2024). L'article présente 5 cas d'études, dont un se trouve en Algérie ; il s'agit de l'Oued Righ, situé au nord-est du Sahara algérien. L'enjeu ici n'est pas l'inondation, mais

au contraire le manque d'eau. Les auteurs proposent pour répondre à cet enjeu deux SfN : l'aménagement d'une zone humide et par ailleurs la création d'une zone tampon disposant d'espèces macrophytes pour traiter les polluants. Ils démontrent que ces solutions apportent des bénéfices environnementaux et économiques (services écosystémiques).

En dehors de la littérature scientifique, le rapport rédigé par (Rankovic et al., 2017) présente les résultats d'un projet pilote, issu de la collaboration entre l'Institut de développement durable et des relations internationales (l'IDDRI) et le Centre de coopération pour la Méditerranée de l'UICN (UICN-Med) et les gouvernements du Maroc et de la Tunisie. Ce rapport revient sur l'identification des actions assimilables à des SfN, contenues dans les contributions déterminées au niveau national (CDN) du Maroc et de la Tunisie. Le rapport analyse le potentiel des SfN pour la biodiversité et la gestion des risques présentant ces approches comme des opportunités intéressantes. Il est à noter que le rapport n'aborde pas directement la question des SfN en Algérie.

Si de nombreux travaux se sont intéressés aux SfN, on en trouve peu qui se sont intéressés au contexte Algérien. Bien évidemment, beaucoup de travaux abordant les SfN sous un angle général, ou appliqués à des pays partageant des caractéristiques proches (Maghreb, territoires méditerranéens) restent pertinents en partie, mais il y a un déficit de mise en application de ces outils pour l'Algérie. Par ailleurs, il est possible que des travaux aient pu porter sur des SfN en Algérie, sans que le terme « Solution fondée sur la Nature » ne soit utilisé ; la revue systématique que nous avons utilisée est basée sur ce terme et a pu laisser passer des travaux n'utilisant pas ce terme. Toutefois, dans un contexte où le concept de SfN est internationalement reconnu et porté par de nombreuses institutions (y compris dans d'autres pays Africains), son absence en Algérie est déjà signifiante. Le manque d'application et de travaux sur les SfN en Algérie soulève la question de la démonstration de l'intérêt de ce type d'approche dans ce contexte. Pour en faire la démonstration, nous proposons de passer par la simulation. Nous utiliserons dans le cadre de ce travail la simulation multi-agents reposant sur un modèle Agent (*Agent Based Model - ABM*). La partie suivante de cet état de l'art est ainsi consacré aux travaux utilisant les ABM pour évaluer les SfN appliquées aux inondations.

B. Modèle de simulation de l'inondation

Différents modèles agent (ABM) ont été proposés pour modéliser et simuler les inondations et/ou la gestion des inondations, permettant d'évaluer des scénarios alternatifs d'aménagement. Taillandier et al. (2021) ont identifié dans leur revue bibliographique 31 modèles permettant de simuler les inondations. En analysant la littérature entre 2021 et 2024, il est possible d'ajouter 17 modèles supplémentaires (soit 48 modèles au total). Nous nous intéressons plus particulièrement ici aux modèles capables de simuler un événement d'inondation, instanciable à tout territoire (afin de pouvoir être appliqué au territoire Algérien), et permettant d'intégrer des SfN.

Certains modèles issus de la littérature se concentrent sur les politiques d'urbanisme ; l'inondation n'y est vu qu'au travers de son résultat, sans en simuler la dynamique. Ces modèles utilisent généralement un pas de temps annuel et s'appliquent sur des territoires à grande échelle ; e.g. (Haer et al., 2020, 2019) proposent un modèle à l'échelle de l'Union européenne en tenant compte des actions d'atténuation des risques des ménages et des gouvernements. Ces

modèles ne s'intéressent pas ainsi à des projets isolés, mais plutôt à des politiques publiques. Cela pourrait être intéressant pour valoriser des SfN à grande échelle, mais ne permet pas de démontrer leur intérêt localement.

Dans les modèles permettant de simuler les inondations, certains ne se focalisent que sur un enjeu spécifique de l'inondation tel que le modèle ESCAPE (Daudé et al., 2019). Si l'évacuation est l'un des comportements possibles de la part des habitants, c'est rarement le comportement attendu en cas d'inondation, où l'on préconise généralement aux habitants de rester chez eux en attendant des secours. En se concentrant uniquement sur cet aspect, on ne peut pas rendre compte complètement de ce qui se passerait en cas d'inondation. Par ailleurs, on ne cherche pas au travers de ce modèle à tester des stratégies de gestion du territoire, notamment par les SfN.

On peut aussi noter que certains de ces modèles n'ont été créés que pour un territoire spécifique et ne peuvent pas être projetés sur un autre territoire, e.g. SPRITE (Taillandier and Adam, 2018), et/ou traitent des inondations par submersion marine et non par débordement de cours d'eau, e.g. LittoSIM-Gen (Laatabi et al., 2022), (Nourali et al., 2024). Dans peu de ces modèles, les SfN sont proposées en tant que stratégie de gestion des risques. Par exemple Si-Flo s'intéresse aux actions sur le comportement des populations (Taillandier et al., 2021), et Draw & Flood (Taillandier et al., 2025) ne permet que de faire appel à des ouvrages de génie civil (digue, barrage...).

L'analyse des 48 modèles Agent n'a permis d'en trouver aucun qui permette tout à la fois : 1) de simuler des inondations par débordement de cours d'eau, 2) instanciable à tout territoire, 3) permettant de simuler des stratégies basées sur des SfN. Il nous faudra ainsi développer notre propre ABM, ou en adapter un afin de pouvoir répondre à ces différents défis.

III. MODELE AGENT

A. Principales caractéristiques

Le modèle que nous utiliserons dans le cadre de ce travail s'appuie sur le modèle Si-Flo (Taillandier et al., 2021). Cependant, Si-Flo ne permet pas d'intégrer directement les SfN. On utilisera ainsi une version adaptée de Si-Flo ; par souci de clarté, cette nouvelle version sera appelée Si-flo NBS (NBS pour Nature Based Solution, l'acronyme anglais de SfN) dans la suite. Deux nouveaux agents seront introduits pour modéliser les SfN : l'agent Pool et l'agent « Nature ». L'agent « Pool » correspond aux aménagements de captation d'eau tels que les bassins de rétention ou d'infiltration. On utilisera ce même agent pour représenter les noues. L'agent « Nature » correspond à tous les éléments végétalisés qui vont permettre de capter une partie des eaux de pluie (parc urbain, jardins de pluie...). De nouvelles dynamiques seront associées à ces deux agents, pour leur permettre de rendre compte de leur action sur les eaux pluviales. Enfin, nous avons ajouté des indicateurs en liens avec les SfN : biodiversité, la quantité d'espaces verts et la satisfaction des habitants.

La simulation de l'inondation un pas de temps de 30s, identique à celui utilisé par (Taillandier et al., 2021).

B. Agents du modèle

Si-Flo NBS dispose de 12 types d'agents (figure 1). A noter que les noms des agents ont été laissés qu'ils apparaissent dans le modèle (i.e. en anglais) afin de faciliter la lecture de ceux qui voudraient l'explorer.

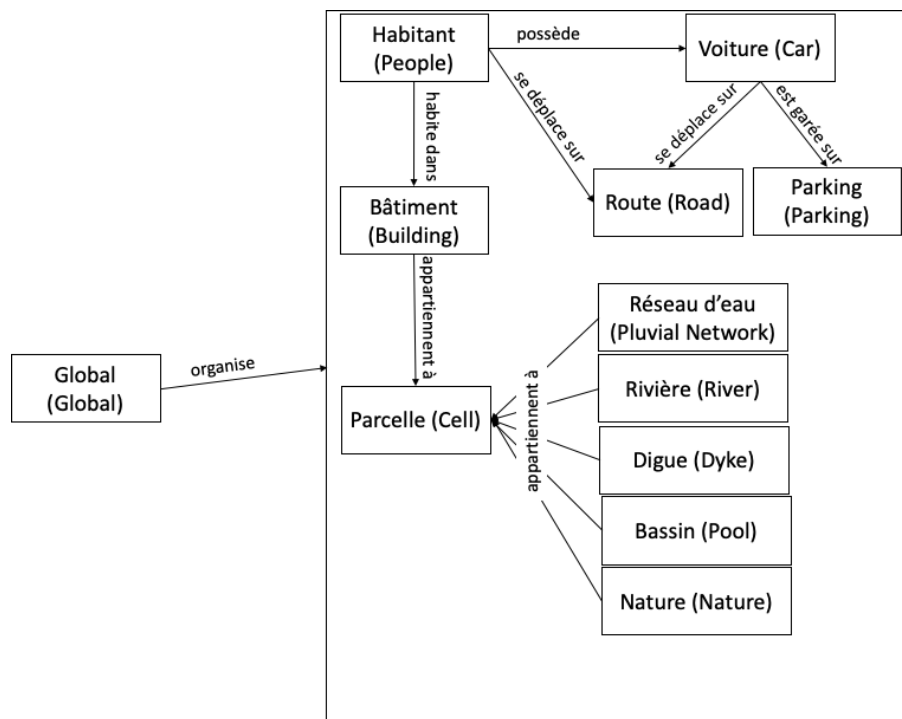


FIGURE 1. Agents de Si-Flo NBS

Global. L'agent global est un agent « monde » qui gère les règles générales de la simulation. C'est lui qui instancie le territoire, qui informe sur le pas de temps et organise la dynamique en distribuant les actions aux autres agents.

Grid. L'agent Grid est le support du monde virtuel. Il est composé d'un ensemble de cellules correspondant chacune à un rectangle de 31m x 25m du territoire simulé. Chaque cellule a une altitude ; la discrétisation de la topographie s'est donc faite sur cette base. La simulation de l'inondation utilise l'agent Grid comme support pour gérer les écoulements. Chaque cellule est aussi caractérisée par une imperméabilité et une capacité d'évacuation qui dépend de la nature des sols et des infrastructures présentes.

River. L'agent River correspond au lit de la rivière. Chaque tronçon de rivière est caractérisé par une largeur et une profondeur. Son débordement va causer la majeure partie de l'inondation (des secteurs peuvent aussi être touchés par ruissellement).

Building. L'agent Building correspond aux différents types de bâtiment. Le modèle distingue les bâtiments résidentiels, les bâtiments commerciaux (magasins ou bureaux) et les bâtiments recevant du public (ERP). Chaque agent People habite dans un bâtiment et peut se déplacer d'un bâtiment à l'autre en utilisant les routes. L'eau peut pénétrer dans les bâtiments et causer des dommages. Les bâtiments sont caractérisés par leur hauteur et nombre d'étages.

Dyke. L'agent Dyke regroupe tous les types d'éléments dont le but est de faire obstacle à l'eau. Il peut s'agir d'une digue en remblai, d'un mur, d'un barrage, etc. Il est caractérisé par sa hauteur et sa résistance ; en cas de charge trop importante, un agent Dyke peut rompre. A noter que les éléments linéaires (digue par exemple) sont décomposés en tronçons homogènes.

Road. L'agent Road correspond à tous les éléments de voirie (route, autoroute, chemin, etc.). Les routes constituent le réseau sur lequel les agents People se déplacent (à pied ou en voiture). Elles peuvent être inondées, ce qui limite la vitesse de déplacement, voire rend la route impraticable.

Pool. L'agent Pool correspond à tous les agents dont l'objectif est de recueillir une partie des eaux pluviales. Les bassins (pool) ont une capacité de stockage et d'infiltration qui vont leur permettre de prendre en charge une partie des eaux de ruissellement ou de débordement du cours d'eau.

Pluvial network. L'agent Pluvial network correspond à tous les éléments du réseau permettant l'évacuation des eaux pluviales. Il peut être de type classique (génie civil) ou de type fossé/noue. Il est décomposé en tronçon et est caractérisé par une capacité d'évacuation.

Nature. L'agent Nature correspond aux espaces naturels et/ou végétalisés. Ces espaces constituent des enjeux en termes de biodiversité et d'attractivité du territoire, mais contribuent aussi à absorber (sol et végétation) une partie de l'eau en cas d'inondation.

Parking. L'agent Parking correspond à l'ensemble des zones dont la priorité est d'assurer le stationnement des voitures. Il s'agit donc d'espaces reliés aux routes où les agents People peuvent garer leur voiture. Ils sont caractérisés par un niveau de perméabilité qui dépend de leur nature (enrobé classique, parking enherbé, etc.).

Car. La voiture est le moyen de déplacement privilégié des agents People. Ceux-ci pourront l'utiliser pour se déplacer rapidement, mais elle constitue également un risque. Les agents People peuvent vouloir les récupérer et les mettre à l'abri en cas d'inondation. L'eau peut immobiliser et endommager les agents Car ; les agents People voyageant en voiture dans des zones inondées sont particulièrement vulnérables.

People. L'agent People modélise un ménage. Leur comportement est inspiré de celui dans SiFlo (Taillandier et al., 2021). Le modèle prend en compte une large variété d'actions pouvant être réalisées par les habitants : évacuer (en voiture ou à pied) ; mettre à l'abri leur voiture ; accomplir leur tâche classique (hors inondation) dans ou hors de leurs bâtiments ; ou exécuter un ensemble d'actions de protection au sein de leur maison telles que calfeutrer les ouvertures, protéger leurs biens, éteindre le gaz et l'électricité, se mettre à l'abri à l'étage et prévenir d'autres habitants.

C. Dynamique du modèle

La simulation d'une inondation dans Si-Flo NBS reste proche de celle du modèle SiFlo tout en intégrant les mécaniques propres aux SfN intégrées à la phase Absorb water. Le processus répété à chaque pas de temps (de 30 s) est exposé en figure 2.

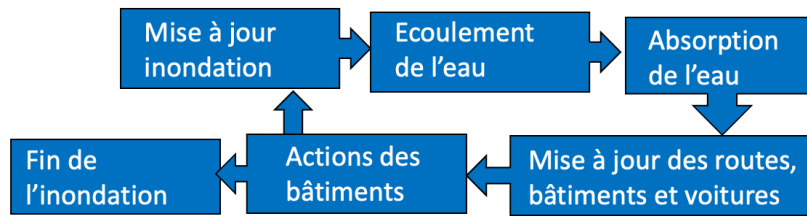


FIGURE 2. Dynamique du modèle Si-Flo NBS

L'agent Global met à jour les données environnementales (par exemple, l'eau en amont du bassin versant et la pluie) à partir des caractéristiques de l'aléa simulé (paramétrable). De cette façon, on définit l'entrée d'eau dans le système et sa localisation. Ensuite, un sous-modèle d'écoulement est utilisé pour simuler le flux d'eau. C'est un modèle simple de déversement. Globalement, une parcelle déverse son eau sur les parcelles voisines si l'altitude d'eau sur cette parcelle est supérieure à l'altitude des parcelles voisines (en tenant compte des digues et rivières). On considère aussi la cinétique d'écoulement ; seule une certaine quantité d'eau peut s'écouler en un pas de temps d'une parcelle à l'autre. Le modèle prend ainsi en compte la capacité des digues à arrêter l'eau et leur état ; une digue en mauvais état peut se rompre sous l'action de l'eau. Le déversement d'eau se traduit par une quantité actualisée sur chaque parcelle. Une partie de cette eau est absorbée par les sols (selon leur perméabilité) ou évacuée au travers du réseau d'eau pluviale. C'est aussi à cette partie qu'une partie d'eau peut être captée dans les bassins (pool). La quantité d'eau restante sur chaque parcelle est alors traduite en hauteur d'eau (en prenant en compte la présence de rivières).

A partir de ces hauteurs d'eau, Si-Flo NBS calcule l'état des routes (inondées, dangereuses, inutilisables). L'état de la route se dégrade avec l'eau induisant des dommages matériels. Après la route, Si-Flo NBS calcule la quantité d'eau entrante dans les bâtiments, qui dépend de la hauteur d'eau et de la perméabilité du bâtiment (i.e. le ratio d'eau entrante en fonction de la hauteur d'eau l'entourant). L'eau dans les bâtiments représente un danger pour les habitants et endommage les biens présents. Les habitants peuvent toutefois anticiper ce problème et s'en protéger en réalisant des actions de calfeutrement (diminution de la perméabilité), de coupure du gaz et de l'électricité et accès à l'étage (diminution du danger) ou en protégeant leur bien par le biais de batardeaux (diminution des dommages matériels). L'eau peut également s'écouler du bâtiment si le niveau d'eau à l'extérieur est inférieur au niveau à l'intérieur.

Ensuite, les agents People (habitants) vont agir. Pour cela, ils vont tout d'abord évaluer la situation à partir de la présence ou l'absence d'eau dans leurs bâtiments, sur leur parcelle et les parcelles voisines. Ils peuvent aussi avoir ou non connaissance de l'inondation (information au préalable ou acquise durant la simulation). A partir de ces informations, les agents vont agir différemment en privilégiant certaines actions à d'autres. Nous utilisons le modèle cognitif de Si-flo (Taillandier et al., 2021), basé sur l'architecture cognitive BEN (Bourgais et al., 2020), qui intègre les émotions, les liens sociaux et les aspects normatifs des comportements.

Le processus de simulation d'inondation est reproduit à chaque pas de temps jusqu'à la fin du scénario (paramètre). Le processus s'arrête alors, et le modèle met à jour les indicateurs afin de présenter le bilan final de la stratégie. Ces indicateurs sont présentés dans la partie C.

C. Entrées et sorties du modèle

Le modèle utilise en entrées des données géographiques ; celles-ci sont directement lues depuis des fichiers SIG (shapefile et données topographiques sous format asc ou geotiff). Les bâtiments, les routes, les digues, les cours d'eau et la topographie sont directement importés depuis les fichiers dédiés. Les agents People sont créés au début de la simulation en fonction des bâtiments ; un paramètre permet de renseigner la densité d'occupation des bâtiments pour rendre compte de la population réelle sur le secteur.

En sortie, Si-Flo NBS fournit deux principaux éléments : une carte de la ville avec les secteurs inondés/endommagés et les indicateurs mis à jour. La carte de la ville permet de rendre compte de la réalité de la ville (topographie, positionnement des enjeux, etc.) et permet aux utilisateurs de suivre le processus d'inondation (montée du niveau de l'eau sur les parcelles, détérioration des bâtiments et des infrastructures, activités des agents People, etc.). Les indicateurs permettent d'évaluer les stratégies sur le territoire. Cinq indicateurs renseignent sur l'impact de l'inondation (décès, blessés, bâtiments endommagés, voitures endommagées et infrastructures endommagées). Les autres indicateurs, repris du modèle Arbre Cité (Brosse et al., 2024), concernent la biodiversité, la quantité d'espaces verts (ratio d'espace vert sur surface de la ville) et la satisfaction des habitants.

La figure 3 présente l'interface du modèle de simulation. L'écran gauche présente la carte avec le suivi de l'inondation ; les cases bleues indiquent les zones inondées et les éléments en rouge correspondent aux bâtiments touchés par l'inondation. L'écran de droite présente le suivi des indicateurs avec en haut, les conséquences de l'inondation (nombre de morts, de blessés...), et en bas, les critères sociaux environnementaux.

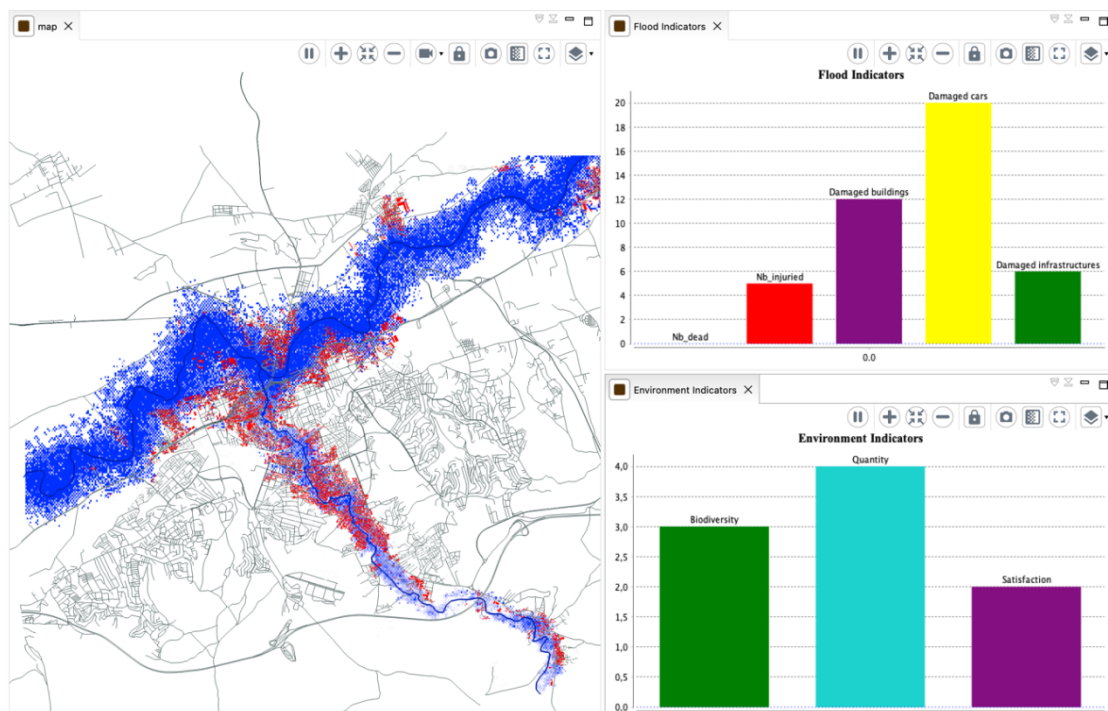


FIGURE 3. Interface du modèle (simulation)

D. Implémentation du modèle

Si-Flo NBS a été implémenté sur la plate-forme GAMA (Taillandier et al., 2019). GAMA est une plate-forme de simulation multi-agents en open source et qui offre de nombreuses fonctionnalités particulièrement intéressantes pour ce modèle. GAMA permet une intégration native des données SIG et fournit des « skill » pour gérer les déplacements des agents et une architecture pour leur comportement cognitif. De plus, GAMA propose différentes fonctionnalités permettant d'explorer des scénarios (mode Batch) et réaliser des analyses de sensibilité (Hamzaoui et al., 2019).

IV. APPLICATION

A. Cas d'étude

Nous allons appliquer notre modèle au cas de la ville de Chlef en Algérie. Chlef est une ville située au nord-ouest de l'Algérie, à environ 200 kilomètres d'Alger. Fondée à l'époque romaine, la ville témoigne d'un riche patrimoine historique et culturel. Aujourd'hui, Chlef est un important centre économique et administratif de la région, bénéficiant d'une croissance urbaine dynamique. Cependant, cette ville est particulièrement vulnérable aux risques d'inondation en raison de sa situation géographique dans la plaine du Cheliff, traversée par l'oued du même nom. Ce cours d'eau, qui est l'un des plus longs d'Algérie, peut déborder en période de fortes pluies, provoquant des crues parfois dévastatrices. L'un des épisodes les plus marquants reste l'inondation de 1927, qui a causé des dégâts considérables à la ville, alors appelée Orléansville.

La vulnérabilité de Chlef est exacerbée par plusieurs facteurs : l'urbanisation croissante qui réduit les zones d'absorption naturelle des eaux, l'insuffisance ou le vieillissement des infrastructures de drainage, et le changement climatique qui intensifient les épisodes de pluies torrentielles. Les autorités locales travaillent toutefois à atténuer ces risques en renforçant les systèmes d'évacuation des eaux pluviales, en aménageant des digues et en sensibilisant la population à ces dangers. Malgré ces efforts, le risque d'inondation demeure une préoccupation majeure pour les habitants et nécessite une gestion préventive rigoureuse.

B. Proposition de scénarios

Le modèle Si-Flo NBS permet d'évaluer la situation initiale. On simule une crue d'intensité très forte (centennale ; équivalente à l'épisode de pluie de 1927). La durée simulée correspond à 30h, ce qui correspond à la montée en charge progressive du cours d'eau, puis une fois le pic atteint à sa décrue. On estime que la majorité des dommages se produisent lors de ces 30h. Nous avons choisi d'évaluer la situation initiale (statu quo) ainsi que 4 autres stratégies alternatives.

TABLEAU 1. Différentes stratégies évaluées

	Description
Statu quo	Cette stratégie correspond à la situation initiale.
Digues	Cette stratégie consiste à ajouter des digues le long des cours d'eau afin de limiter ses débordements.

Bassin d'infiltration	Cette stratégie consiste à ajouter des bassins d'infiltration arborés à proximité des cours d'eau afin de capter une partie des eaux de débordement.
Nature en ville	Cette stratégie consiste à ajouter plusieurs parcs urbains et de la végétation en ville (arbre, jardins). Ces éléments sont répartis en ville et vont viser à assurer une meilleure infiltration des eaux.
Bassin d'infiltration + Nature en ville	Cette stratégie combine les deux précédentes.

B. Résultats

Les différents scénarios ont été simulés ; pour rendre compte du caractère stochastique du modèle, 15 simulations ont été réalisées pour chaque scénario. En raison des phénomènes d'émergence propre aux modèles Agent, certains scénarios peuvent conduire à des « emballlements du modèle » donnant des résultats extrêmes (valeurs très fortes ou très faibles). Face à un nombre de simulations peu élevé comme c'est ici le cas (15 répétitions), ces résultats extrêmes, qui sont peu fréquents, peuvent avoir un impact fort sur la moyenne des résultats s'ils sont tirés. Afin d'éviter de donner trop de poids à ces cas extrêmes, les résultats extrêmes de chaque cohorte (fractile 10% et 90%) ont été exclus. Le tableau 2 donne les résultats moyens obtenus pour chaque scénario sur les différents indicateurs. Les décès, blessés, bâtiments endommagés et infrastructures endommagées correspondent au bilan de l'inondation (nombre de décès, de blessés...). La biodiversité est évaluée par un indicateur allant de 1 (aucune biodiversité) à 5 (zone à très haute biodiversité). La quantité d'éléments naturels correspond au rapport de surface de nature sur la surface du territoire. L'indicateur de satisfaction traduit la satisfaction moyenne des habitants vis-à-vis de la gestion des risques et des espaces de nature ; cette évaluation est tiré du modèle Arbre Jardin (Brosse et al., 2024). Les autres facteurs de satisfaction (accès au logement, mobilité...) n'étant pas impacté par les différents scénarios, ils ne sont pas pris en compte.

TABLEAU 2 Différentes stratégies évaluées

	Décès	Blessés	Bâtiments endommagés	Voitures endommagées	Infrastructures endommagées	Biodiversité	Ratio d'espaces naturels (%)	Satisfaction
Statu quo	3,62	55,91	56,62	89,27	58,00	2,00	14,57	0,88
Digues	0,54	6,46	37,55	30,73	40,00	1,97	14,57	1,64
Bassin d'infiltration	1,06	12,06	35,07	36,60	33,00	2,21	15,25	1,89

Nature en ville	3,07	27,17	56,64	63,64	56,93	2,13	17,11	1,28
Bassin d'infiltration + Nature en ville	0,53	8,73	36,54	20,00	31,35	2,34	17,78	2,03

C. Discussion

1. Analyse des résultats

Les résultats indiqués sur le tableau 2 montrent que la situation en cas d'inondation pourrait se révéler catastrophique pour Chlef en cas d'inaction (scénario statu quo) avec plusieurs morts et dizaines de blessés (moyenne de 55,91). Il est ainsi nécessaire d'agir et de proposer un plan d'actions pour répondre à ce besoin. La stratégie passant par les digues est assez efficace pour la gestion des risques permettant de limiter grandement l'impact humain (de l'ordre de 90% en ramenant le nombre moyen de blessés à 6,46), et très sensiblement l'impact matériel (environ 40% sur le nombre de bâtiments touchés par exemple). La stratégie par bassin d'infiltration est moins performante sur le bilan humain sur la stratégie par digue (12,06 blessés en moyenne), mais toutefois bien meilleur que celui de la situation initiale. Cela peut s'expliquer par le positionnement des bassins. Dans cette stratégie, plusieurs bassins sont disposés le long de la rivière ; mais ne peuvent pas être implémentés dans des zones trop urbanisées où il n'y a pas de place disponible. Certaines zones très urbanisées sont ainsi non couvertes par ces bassins alors qu'elles le seraient par les digues. Sur le plan des infrastructures, la stratégie par bassin est légèrement plus efficace que celle par digue (33 touchées contre 40 avec les digues). Cet écart peut être dû à la relocalisation de certaines infrastructures (e.g. parking) pour laisser la place aux bassins. La stratégie basée sur la nature en ville a le bilan sur l'inondation le moins efficace (en dehors du statu quo). Cela s'explique par le fait que cette stratégie est efficace pour gérer des inondations d'intensité faible à moyenne, mais moins pour des inondations de très forte ampleur. Cependant, cette stratégie a tout de même l'intérêt de préserver des secteurs où les hauteurs d'eau sont plus faibles. La stratégie couplant bassins et nature en ville permet de coupler les avantages de ces deux stratégies. Les bassins permettent de capter de l'eau des cours d'eau. L'eau non captée arrivant sur les parcelles les plus urbanisées peut être traitée par la végétation urbaine, qui est au plus près des bâtiments. Le bilan est ainsi très proche de celui obtenu avec des digues. La répartition de la végétation en ville permet de protéger un peu plus les infrastructures et les véhicules y stationnant. En revanche, les digues ont un résultat légèrement meilleur sur le nombre de blessés. Il est difficile de se prononcer tout de même sur la signification de ce résultat en raison des incertitudes sur le comportement humain.

Pour les enjeux environnementaux (biodiversité et quantité de nature), les solutions basées sur les SfN sont évidemment les meilleures. Les digues viennent dégrader l'indicateur de biodiversité en urbanisant encore davantage les berges des rivières (en réduisant la biodiversité qui s'y trouve). Elles contribuent aussi à rendre plus difficile l'accès aux cours d'eau pour les espèces animales. Les bassins d'infiltration végétalisés offrent un refuge et des ressources pour de nombreuses espèces animales et végétales (amphibiens, insectes, oiseaux, microfaune du sol). En

utilisant des plantes adaptées aux milieux humides, ces bassins favorisent la biodiversité végétale, attirant par ricochet des insectes pollinisateurs et d'autres espèces associées. Ils peuvent aussi servir de points de connexion entre différents milieux naturels, facilitant le déplacement et la dispersion des espèces. La stratégie de nature en ville apporte évidemment de nombreux bénéfices sur les critères environnementaux. Les espaces verts urbains (parcs, jardins, toitures végétalisées, haies, mares...) fournissent des refuges et des ressources alimentaires pour de nombreuses espèces (oiseaux, insectes, mammifères, amphibiens). La préservation d'espèces végétales locales favorise une diversité de microhabitats, attirant des pollinisateurs (abeilles, papillons) et d'autres espèces bénéfiques. En fournissant des ressources aux pollinisateurs et autres auxiliaires de cultures, la nature en ville contribue au maintien des écosystèmes et à la reproduction des plantes, y compris les cultures vivrières urbaines. Par ailleurs, les espaces verts en ville permettent aux habitants d'observer la biodiversité de proximité, favorisant la sensibilisation et l'engagement pour la protection de l'environnement. La stratégie combinant nature en ville et bassins végétalisés permet de tirer bénéfice de ces deux types d'aménagement et contribue à la connexion des zones de nature (trames verte et bleue). C'est ainsi la stratégie la plus efficace sur ces critères. Sur le critère de satisfaction de la population, plusieurs facteurs sont pris en considération, et en premier lieu la gestion de l'inondation. Sans une gestion efficace de ce risque, la satisfaction est forcément limitée ; les habitants pouvant reprocher aux dirigeants de ne pas avoir fait assez pour gérer le risque. La stratégie nature en ville, qui apporte de vrais bénéfices pour la population (limitation des effets îlots de chaleur, lieux de loisir, connexion à la nature...), est pénalisée par le bilan de l'inondation. Les stratégies basées sur les digues et bassins obtiennent des résultats bien meilleurs sur ce critère par leur capacité à bien gérer le risque. Mais c'est bien sûr la stratégie couplant nature en ville et bassins qui se trouve être la plus intéressante pour répondre aux enjeux sociaux, assurant la protection des habitants et bénéficiant des apports de la nature en ville.

2. Limites et généralisation

Cette étude présente des limites. Tout d'abord, en raison du temps de simulation et de la nature stochastique du modèle, il existe une part d'incertitude sur les résultats. Nous ne pouvons assurer la convergence des résultats, c'est-à-dire que les moyennes obtenues seraient identiques si un très grand nombre de simulations avaient été réalisées pour chaque cas. Pour répondre à ce besoin, nous avons prévu d'effectuer davantage de simulations et d'étudier la convergence des résultats. Cela ne pourra être réalisé qu'au moyen de stratégies numériques basées sur la parallélisation des calculs et le recours à des serveurs de calcul.

Parmi les limites de l'étude, on peut également relever certaines simplifications de modélisation. Nous évoquons ici plusieurs points. Tout d'abord, nous n'avons pas spécialisé notre population d'habitants (âge, profession, présence d'enfants, etc.). Ces données pourraient mieux caractériser la population et d'affiner son comportement face aux inondations. De plus, nous ne disposons pas d'informations sur la connaissance préalable des habitants quant aux risques d'inondation et aux consignes à suivre en pareil cas. En outre, nous avons simplifié l'usage des bâtiments ainsi que leurs caractéristiques vis-à-vis de l'inondation (nombre d'étages accessibles,

perméabilité, etc.). Enfin, le modèle utilisé ici ne prend pas en compte les services de secours, un élément qui serait intéressant à intégrer dans la simulation.

Même en tenant compte des limites du modèle, nous avons pu obtenir des résultats encourageants en faveur des SfN. Toutefois, comme mentionné précédemment, leur apport ne réside pas dans la gestion directe du risque (qui peut être assurée par des stratégies d'ingénierie), mais dans les co-bénéfices qu'elles offrent (apport à la biodiversité, au rafraîchissement urbain, au bien être des habitants...). Ainsi, pour promouvoir les SfN, il est nécessaire d'intégrer ces critères dans le processus décisionnel. Cela implique de ne pas cloisonner la gestion du risque, mais de l'inclure dans une réflexion plus large sur l'aménagement urbain. Par ailleurs, si les critères sociaux influencent souvent les décisions politiques, il est parfois plus difficile de valoriser la biodiversité comme critère déterminant. Enfin, un aspect primordial des politiques publiques n'a pas été abordé dans cet article : le coût financier des différentes stratégies (investissement initial et frais de maintenance/entretien). De nombreuses études ont montré que les SfN pouvaient être compétitives, voire plus avantageuses que les stratégies d'ingénierie du point de vue financier (Le Coent et al., 2021). Cependant, cela dépend fortement du contexte local et il est difficile de généraliser cette assertion. Une étude plus approfondie sur les différentes stratégies permettrait d'en évaluer les coûts.

De manière plus générale, il est démontré que l'implication des habitants dans la gestion des risques présente de nombreux avantages (Evers et al., 2016; Maskrey et al., 2022). Il serait ainsi intéressant, au lieu de proposer des stratégies préconçues comme dans la présente étude, de laisser les acteurs locaux (élus, services techniques, habitants...) construire eux-mêmes les stratégies à tester. Cela permettrait d'affiner leur définition et de s'assurer qu'elles répondent réellement aux attentes des différents acteurs. Une telle approche pourrait également faciliter la généralisation des résultats à l'ensemble du territoire algérien. Nous pensons qu'il est essentiel d'agir localement, en co-construction avec les acteurs concernés. L'extension à l'échelle nationale pourrait découler d'une multiplication des initiatives locales, l'accumulation des retours d'expérience favorisant la diffusion de ces pratiques (effet « boule de neige »).

Bien évidemment, pour que cela soit véritablement efficace, il est nécessaire que ces initiatives soient soutenues (ou, à tout le moins, qu'elles ne soient pas entravées) par un cadre réglementaire favorable à l'émergence des SfN. Le recours aux SfN peut même être encouragé par des subventions spécifiquement dédiées à ce type de projet. En ce sens, ce type d'étude pourrait inciter les décideurs nationaux à reconnaître l'intérêt des SfN dans la gestion des risques d'inondation. Il s'agit d'un processus long et complexe, mais qui mérite d'être engagé.

V. CONCLUSION

Cette étude a permis de présenter un modèle de simulation permettant d'évaluer différentes stratégies de gestion du risque et notamment le recours aux SfN. Le modèle a été appliqué à un cas d'étude : la ville de Chlef. Il est un premier pas vers une réflexion sur les SfN en Algérie. À travers l'exemple de la ville de Chlef, l'enjeu est de démontrer, par la simulation, que des stratégies alternatives aux ouvrages d'ingénierie classiques peuvent se révéler tout aussi efficaces et apporter des co-bénéfices sociaux et environnementaux. Dans notre étude, nous avons pu

montrer que nous obtenons des résultats comparables en termes de gestion des inondations avec une stratégie basée sur une digue qu'avec une stratégie combinant bassin végétalisé et nature en ville. Cette stratégie SfN apporte, par ailleurs, de réels bénéfices en termes de biodiversité et de satisfaction de la population.

Le modèle et les résultats de simulation présentent toutefois des limites qui devront faire l'objet de travaux supplémentaires. Un enjeu important aussi soulevé est celui de la généralisation des résultats et de l'approche. Cette généralisation serait indispensable pour permettre une réflexion plus globale sur les SfN en Algérie.

REFERENCES

- Asare, P., 2021. Nature-based solutions (NBS) as an urban flood mitigation measure: the case of Ga East Municipality, Accra, Ghana [WWW Document]. URL <https://essay.utwente.nl/88792/> (accessed 1.7.25).
- Banque mondiale, 2023. DIAGNOSTIC SUR LA GESTION DES RISQUES CLIMATIQUES ET DE CATASTROPHE EN ALGÉRIE. Banque internationale pour la reconstruction et le développement, Washington, Etats-Unis.
- Beceiro, P., Brito, R.S., Galvão, A., 2022. Assessment of the contribution of Nature-Based Solutions (NBS) to urban resilience: application to the case study of Porto. *Ecol. Eng.* 175, 106489. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106489>
- Biswal, B.K., Bolan, N., Zhu, Y.-G., Balasubramanian, R., 2022. Nature-based Systems (NbS) for mitigation of stormwater and air pollution in urban areas: A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 186, 106578. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106578>
- Bourgais, M., Taillandier, P., Vercouter, L., 2020. BEN: An Architecture for the Behavior of Social Agents. *J. Artif. Soc. Soc. Simul.* 23, 12. <https://doi.org/10.18564/jasss.4437>
- Brosse, N., Taillandier, F., Brueder, P., Taillandier, P., 2024. Perception et réflexion sur la nature en ville grâce aux cartes mentales dynamiques, in: Actes Des RUGC 2024. Presented at the Rencontres Universitaires de Génie Civil, Le Havre, France, pp. 1–18.
- Croeser, T., Garrard, G., Sharma, R., Ossola, A., Bekessy, S., 2021. Choosing the right nature-based solutions to meet diverse urban challenges. *Urban For. Urban Green.* 65, 127337. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127337>
- Daudé, E., Chapuis, K., Taillandier, P., Tranouez, P., Caron, C., Drogoul, A., Gaudou, B., Rey Coyrehourcq, S., Saval, A., Zucker, J., 2019. ESCAPE: Exploring by Simulation Cities Awareness on Population Evacuation.
- Enu, K.B., Zingraff-Hamed, A., Rahman, M.A., Stringer, L.C., Pauleit, S., 2022. Review article: Potential of Nature-Based Solutions to Mitigate Hydro-Meteorological Risks in Sub-Saharan Africa. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-604>
- Evers, M., Jonoski, A., Almoradie, A., Lange, L., 2016. Collaborative decision making in sustainable flood risk management: A socio-technical approach and tools for participatory governance. *Environ. Sci. Policy, Participatory and Collaborative Governance for Sustainable Flood Risk Management: An emerging research agenda* 55, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.009>
- Guido, B.I., Popescu, I., Samadi, V., Bhattacharya, B., 2023. An integrated modeling approach to evaluate the impacts of nature-based solutions of flood mitigation across a small watershed

- in the southeast United States. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 23, 2663–2681. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2663-2023>
- Haer, T., Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H., 2019. Advancing disaster policies by integrating dynamic adaptive behaviour in risk assessments using an agent-based modelling approach. *Environ. Res. Lett.* 14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0770>
- Haer, T., Husby, T.G., Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H., 2020. The safe development paradox: An agent-based model for flood risk under climate change in the European Union. *Glob. Environ. Change* 60, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.102009>
- Hamzaoui, F., Amine Allal, M., Taillandier, F., Achoui, M., 2019. Risk management in construction projects by coupling the SMACC agent with the MADS MOSAR method – application to the dam project in Mascara, Algeria. *Int. J. Constr. Manag.* 1–15. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1641890>
- Kauark-Fontes, B., Marchetti, L., Salbitano, F., 2023. Integration of nature-based solutions (NBS) in local policy and planning toward transformative change. Evidence from Barcelona, Lisbon, and Turin. *Ecol. Soc.* 28. <https://doi.org/10.5751/ES-14182-280225>
- Kiribou, R., Djene, S., Bedadi, B., Ntirenganya, E., Ndemere, J., Dimobe, K., 2024. Urban climate resilience in Africa: a review of nature-based solution in African cities' adaptation plans. *Discov. Sustain.* 5, 94. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00275-6>
- Laatabi, A., Becu, N., Marilleau, N., Amalric, M., Pignon-Mussaud, C., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Monfort, A., Hayoun, C., Rousseaux, F., 2022. LittoSIM-GEN: A generic platform of coastal flooding management for participatory simulation. *Environ. Model. Softw.* 149, 105319. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105319>
- Le Coent, P., Graveline, N., Altamirano, M.A., Arfaoui, N., Benitez-Avila, C., Biffin, T., Calatrava, J., Dartee, K., Douai, A., Gnonlonfin, A., Hérivaux, C., Marchal, R., Moncoulon, D., Piton, G., 2021. Is-it worth investing in NBS aiming at reducing water risks? Insights from the economic assessment of three European case studies. *Nat.-Based Solut.* 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100002>
- Lipiec, E., 2020. Nature-Based Infrastructure: NOAA's Role (No. R46145). Congressional Research Service Reports.
- Marijuan, R., Díez Rodríguez, B., Sanchez, S., Sanchez, C., Iglesias, J., Şirin, B., Baba, A., Gunduz, O., Francés, R., 2024. Evaluating the impact of Nature-based Solutions on the provision of water-related and water-dependant Ecosystem Services. *Nat.-Based Solut.* 6, 100194. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100194>
- Maskrey, S.A., Mount, N.J., Thorne, C.R., 2022. Doing flood risk modelling differently: Evaluating the potential for participatory techniques to broaden flood risk management decision-making. *J. Flood Risk Manag.* 15, e12757. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12757>
- Matos, F., Mendonça, R., Roebeling, P., Spinnato, P., Aiello, G., Mendes, R., Bastos, M.I., López-Maciel, M., Sirchia, A., 2022. Systemic Decision Support Tool for Online Application to Aid NBS Co-creation, in: Calabrò, F., Della Spina, L., Piñeira Mantiñán, M.J. (Eds.), *New Metropolitan Perspectives*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1916–1925. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_184
- Moazzem, S., Bhuiyan, M., Muthukumaran, S., Fagan, J., Jegatheesan, V., 2024. A Critical Review of Nature-Based Systems (NbS) to Treat Stormwater in Response to Climate Change and Urbanization. *Curr. Pollut. Rep.* 10, 286–311. <https://doi.org/10.1007/s40726-024-00297-8>
- Nika, C.E., Gusmaroli, L., Ghafourian, M., Atanasova, N., Buttiglieri, G., Katsou, E., 2020. Nature-based solutions as enablers of circularity in water systems: A review on assessment

- methodologies, tools and indicators. *Water Res.* 183, 115988. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115988>
- Nourali, Z., Shortridge, J.E., Bukvic, A., Shao, Y., Irish, J.L., 2024. Simulation of Flood-Induced Human Migration at the Municipal Scale: A Stochastic Agent-Based Model of Relocation Response to Coastal Flooding. *Water* 16, 263. <https://doi.org/10.3390/w16020263>
- Olgun, R., Cheng, C., Coseo, P., 2024. Nature-Based Solutions Scenario Planning for Climate Change Adaptation in Arid and Semi-Arid Regions. *Land* 13, 1464. <https://doi.org/10.3390/land13091464>
- Rankovic, A., Chan, S., Laurans, Y., 2017. Mise en œuvre des solutions fondées sur la nature dans les politiques climat : enjeux pour la biodiversité. *Study 7*.
- Redjem, A., Nouibat, B., Naghel, M., 2020. POUR DES VILLES RESILIENTES AUX INONDATIONS: Cas de la ville de M'sila, Algérie. *Sci. Technol. Sci. Terre* 33–42.
- S. Ferreira, C., Mourato, S., Kasanin-Grubin, M., J. D. Ferreira, A., Destouni, G., Kalantari, Z., 2020. Effectiveness of Nature-Based Solutions in Mitigating Flood Hazard in a Mediterranean Peri-Urban Catchment. *Water* 12, 2893. <https://doi.org/10.3390/w12102893>
- Taillandier, F., Adam, C., 2018. Games Ready to Use: A Serious Game for Teaching Natural Risk Management. *Simul. Gaming* 49, 441–470. <https://doi.org/10.1177/1046878118770217>
- Taillandier, F., Di Maiolo, P., Taillandier, P., Jacquenod, C., Rauscher-Lauranceau, L., Mehdizadeh, R., 2021. An agent-based model to simulate inhabitants' behavior during a flood event. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 64, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102503>
- Taillandier, F., Moatty, A., Brueder, P., Curt, C., Beullac, B., Di Maiolo, P., 2023. A Learning Game to promote Nature-based Solutions to manage flood risk. Presented at the ISAGA 2023, La Rochelle.
- Taillandier, F., Taillandier, P., Brueder, P., Brosse, N., 2025. The dynamic sketch map to support reflection on urban flooding. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 116, 105121. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.105121>
- Taillandier, P., Bourgais, M., Drogoul, A., Vercouter, L., 2017. Using parallel computing to improve the scalability of models with BDI agents. Presented at the Social Simulation Conference.
- Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q.-N., Marilleau, N., Caillou, P., Philippon, D., Drogoul, A., 2019. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica* 23, 299–322. <https://doi.org/10.1007/s10707-018-00339-6>
- UICN, 2016. Définition des solutions fondées sur la nature. disponible sur (consulté en 2025) : <https://portals.iucn.org/congress/fr/motion/077>