

Efficiences économique et financement des solutions fondées sur la nature : le cas du bassin versant de la Brague

Nabila Arfaoui^{1,*}, Amandine Gnonlonfin², Guillaume Piton³  et Ali Douai⁴

¹ Sciences économiques, Université Catholique de Lyon, ESDS, Lyon, France

² Sciences économiques, Université Côte d'Azur, IMREDD, Nice, France

³ Géoscience, Université Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France

⁴ Sciences économiques, Université Côte d'Azur, GREDEG, CNRS, Université Côte d'Azur, Valbonne, France

Reçu le 1^{er} avril 2020. Accepté le 21 janvier 2022

L'objectif de cet article est de montrer la complémentarité entre une approche technocratique et une approche que les auteurs qualifient de *bottom-up* afin d'éclairer la prise de décision en matière de financement des aménagements de gestion des risques d'inondation dans le bassin versant de la Brague (Alpes-Maritimes), laquelle prend place dans le cadre de la compétence communale en matière de gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (Gemapi). Un des enjeux de cette étude était de donner davantage de légitimité au recours à des solutions fondées sur la nature vis-à-vis de celles qui relèvent du génie civil – mais on verra ici qu'il n'est pas toujours aisé de distinguer les unes des autres. Par ailleurs, on notera que la méthode d'évaluation contingente (Mec) est un des dispositifs participatifs utilisés par les auteurs. La perspective qui se dessine ici est celle de la nécessité de mettre en œuvre une véritable évaluation monétaire délibérative. Elle fait écho aux séminaire et dossier que *NSS* (Vivien et Pivot, *NSS*, 1999, 2) consacra jadis à la Mec ainsi qu'aux propositions défendues par les partisans d'une économie écologique résolument ouverte sur les autres disciplines de sciences sociales (Renou, *NSS*, 2018, 4).

La Rédaction

Résumé – Cet article évalue l'efficacité économique de stratégies de prévention du risque d'inondation en vue d'éclairer la décision de financement des acteurs publics. Le cas de la protection contre les crues « éclair » (courtes et violentes) de la Brague et des inondations associées de la basse vallée à Biot et Antibes (Alpes-Maritimes) est pris comme exemple. Dans cette perspective, nous proposons une double analyse coût-bénéfice (ACB) dans le contexte particulier de la loi Gemapi (gestion des milieux aquatiques et protection contre les inondations) et des stratégies dites « SFN » (solutions fondées sur la nature). L'ACB *top-down* éclaire les décisions des acteurs nationaux et régionaux tandis que l'ACB *bottom-up* répond aux préoccupations des acteurs locaux en évaluant l'acceptabilité sociale des stratégies étudiées.

Mots clés : environnement / risques / inondations / analyse coût-bénéfice / Gemapi

Abstract – **Economic efficiency and financing of nature-based solutions: The Brague river case study.** This paper explores the economic efficiency of flood protection strategies to aid funding decisions of public bodies. The Brague river is a 68 km² catchment located on the Mediterranean Sea shore in South East France. It experienced disastrous flash floods triggering costly damages and casualties in the communities of Biot and Antibes. Several possible flood protection strategies using conventional civil engineering measures or Nature-based solutions were tailored mixing engineering and participatory approaches. They were then assessed in terms of i) protection efficacy and avoided damage using numerical modelling, ii) environmental gains or alterations using an indicator on the morphological quality of the river, and iii) willingness-to-pay of the citizens for the various strategies, assessed both by top-down transfer methods, as well as by interviews of about 400 citizens. A dual cost-benefit analysis (CBA) was finally

*Auteur correspondant : narfaoui@univ-catholyon.fr

tailored to help the various decision makers involved in the management of the catchment in the context of the Gemapi law (management of aquatic environments and flood protection). A top-down CBA was performed to help national and regional stakeholders decide whether they would support the strategies. In the meantime, a bottom-up CBA was performed to capture the local perception of hazards, the social acceptability of various mitigation measures and to help the basin managers decide on the relevant strategy to be implemented.

Keywords: environment / risk / floods / cost-benefit analysis / Gemapi

Dans le Sud de la France, le changement climatique se traduit par une augmentation de l'intensité et de la fréquence des épisodes de pluies dits « méditerranéens » provoquant des crues aux lourdes conséquences. Dans le département des Alpes-Maritimes, l'épisode d'octobre 2015 a, par exemple, causé le débordement de plusieurs rivières côtières entraînant des dommages estimés entre 500 et 600 millions d'euros et faisant plus de 20 morts. Les crues de novembre 2019 et octobre 2020 ont à nouveau montré la vulnérabilité de ces territoires. Dès lors, les appels à une gestion du risque d'inondation plus adaptée aux territoires se multiplient.

Les gestionnaires des ouvrages de protection contre les crues sont en pleine réorganisation depuis la réforme Gemapi (gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations). En vigueur depuis 2018, elle est associée aux lois de décentralisation de 2014 et de 2015 et relève d'une compétence confiée aux intercommunalités (métropoles, communautés urbaines, communautés d'agglomération, communautés de communes). La Gemapi leur impose de gérer les cours d'eau en prenant en compte à la fois la restauration environnementale (volet Gema) et la protection contre les risques d'inondation (volet Pi). Elle leur octroie aussi la possibilité de lever une « taxe Gemapi » (plafonnée à 40 €/habitant/an) afin de pouvoir financer ces missions.

Dans ce contexte, les solutions fondées sur la nature (SFN), étant multifonctionnelles, sont de plus en plus envisagées comme des mesures pertinentes de protection contre les risques naturels (Rey *et al.*, 2018). Elles sont définies comme « des actions inspirées de la nature ; [...] utilisant les fonctionnalités et la complexité des processus naturels, tels que sa capacité à stocker le carbone et à réguler l'eau [...] pour traiter de façon durable un ensemble de défis environnementaux, sociaux et économiques » (Nesshöver *et al.*, 2017, p. 1 217). Elles se veulent complémentaires ou alternatives aux mesures de génie civil (Eggermont *et al.*, 2015). Promues par la Commission européenne (CE) dans son agenda politique et son programme de recherche et d'innovation Horizon 2020¹, elles se traduisent en France par la volonté d'« augmenter la sécurité des populations exposées aux

inondations en tenant compte du fonctionnement naturel des milieux aquatiques ». C'est ainsi que sont intitulés le thème n°2 du plan de gestion des risques d'inondation pour 2016-2021 promu par l'État et l'orientation fondamentale n°8 du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) 2016-2021 de l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse² (AE-RMC).

L'intérêt récent de la littérature académique (Albert *et al.*, 2019) n'a pas suffi à lever tous les verrous liés à la mise en œuvre des SFN impliquant des processus de gouvernance participatifs (Nesshöver *et al.*, 2017) plus ambitieux que ceux en place actuellement dans la plupart des projets en France (Fournier, 2019). Leur généralisation est aussi entravée par les difficultés d'évaluer leur valeur (Kabisch *et al.*, 2016), dans un contexte où les pouvoirs publics demandent une évaluation de l'efficacité économique des mesures de prévention du risque (Mechler, 2016). En outre, cette difficulté d'évaluation freine le financement de ces solutions dans une conjoncture de contraintes budgétaires sévères. L'efficacité économique est généralement évaluée à travers l'analyse coût-bénéfice (ACB) utilisée, en France, de manière systématique pour tout projet dont les montants d'investissement public dépassent 2 millions d'euros (Commissariat général au développement durable [CGDD], 2018). Les ACB réalisées dans ce contexte peuvent être qualifiées de *top-down* car elles font appel à certaines valeurs déterminées au niveau national (les spécificités des architectures régionales, par exemple, ne sont pas considérées dans le calcul des dommages en fonction des hauteurs d'inondation). De plus, les stratégies de gestion du risque évaluées sont principalement définies par les entités gemapiennes appuyées par divers acteurs (État, agence de l'eau, bureaux d'études, associations environnementales) et sont soumises au public seulement dans un second temps (Fournier, 2019).

L'application de ce type d'analyse coût-bénéfice aux solutions fondées sur la nature pose question (cf. Encadré). En effet, contrairement aux solutions de génie civil, les solutions fondées sur la nature offrent des bénéfices

¹ Ce travail a été financé par le projet de la Commission européenne H2020 *Naiad* (Nature insurance value: assessment and demonstration), Grant agreement n° 730497.

² Cf. <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion-de-leausdage-2016-2021-en-vigueur/les-9-ofs/8-augmenter-la-securite-des-populations-exposees-aux-inondations-en-tenant-compte-du-fonctionnement-naturel-des-milieux-aquatiques>.

Encadré. Du bon usage de l'analyse coût-bénéfice (ACB) dans un contexte de pluralité des valeurs.

En économie écologique, la question du choix des méthodes pour mesurer et intégrer (dans un processus de décision) les valeurs environnementales dans un contexte de choix collectif à propos du devenir d'une ressource naturelle fait l'objet de vifs débats (cf. Douai et Plumecocq, 2017).

L'ACB, en général, a été présentée comme une démarche permettant de mesurer de façon unitaire et monétaire l'ensemble des valeurs que les individus attribuent à une ressource naturelle. Par-delà la diversité des méthodes d'application (évaluation contingente, calcul de coûts, etc.), il est essentiellement reproché à cette démarche : 1/ de ramener une question d'action collective (choix collectif autour du devenir de notre environnement) à un problème d'optimisation de bien-être individuel (le bien-être collectif – à l'aune duquel la décision finale est censée être prise – découlant de la somme des bien-être individuels) ; 2/ de vouloir tout réduire à une métrique monétaire, là où des bénéfices sociaux, selon même les répondants, ne peuvent s'exprimer monétairement, mais relèvent d'autres registres lexicaux, voire moraux. A ce propos, il est fréquent de constater, dans les enquêtes effectuées pour « révéler » ces valeurs, un taux significatif de « non-réponses », interprété par une bonne partie des économistes écologiques, comme des « mises de protestation » de la part des individus qui marquent ainsi leur rejet du cadre qui leur est proposé pour exprimer leurs valeurs.

Dans le cadre du projet NAIAD, un enjeu était de permettre de déployer et articuler une pluralité de méthodes d'évaluation, en tenant compte de leurs avantages et inconvénients respectifs et du contexte de prise de décision (cf. notamment le [tableau 3](#)). À cet égard, si l'ACB reste une démarche incontournable, il convient d'en définir un périmètre et une mise en œuvre qui permettent d'éviter les écueils méthodologiques usuels (Kallis *et al.*, 2013) :

- Proposer une ACB participative, qui permette aux acteurs clés de co-construire la démarche (scénarios, variables d'intérêt, véhicule de la mesure monétaire, etc.) et en même temps d'en préciser la portée et les limites.
- Tenir compte du fait que certains co-bénéfices ne peuvent pas être évalués monétairement au sens strict (qui appellent l'articulation avec d'autres approches de type socio-culturel, où il est question d'exprimer l'importance qu'ont des co-bénéfices pour les individus de façon qualitative ; cf. Martín-López *et al.*, 2012).
- Indiquer que les résultats sont à considérer avec précaution et à articuler avec d'autres apports ou d'autres résultats issus d'approches écologiques et sociologiques, dans un contexte où il est reconnu que la prise de décision simple et optimale n'est pas (ou plus) pertinente : l'impossibilité de mesurer monétairement l'ensemble des (co-)bénéfices implique que l'application stricte du critère usuel d'optimalité (maximisation du ratio bénéfices/coûts) pour prendre une décision n'est plus opératoire puisqu'une partie des bénéfices échappe au calcul. Il convient alors de considérer un ensemble hétérogène de données et d'informations et, par suite, de critères pour sous-tendre un choix collectif, ce qui ouvre la voie aux analyses multicritères.

socio-économiques et environnementaux (Eggermont *et al.*, 2015 ; Cohen-Shacham *et al.*, 2016) autres que la réduction du risque. Ces co-bénéfices rassemblent des valeurs d'usage et de non-usage potentiellement importantes. Négliger ces dernières peut biaiser la prise de décision publique. Leur intégration peut être envisagée dans une ACB *top-down* via, par exemple, des méthodes de transfert de valeurs des co-bénéfices. Toutefois, une approche *bottom-up* (Carolus *et al.*, 2018) – territorialisée et inclusive des parties prenantes – favorise l'acceptabilité sociale nécessaire à la mise en œuvre des SFN et à leur suivi dans le temps (certaines valeurs incorporées paraîtront plus adaptées ou justes) (Andersson *et al.*, 2017).

L'objectif de cet article est de montrer, dans le contexte français, la complémentarité entre les approches *top-down* et *bottom-up* dans la prise de décision de financement des aménagements de gestion de risque. L'analyse coût-bénéfice *top-down* rassemble les méthodes classiques de transfert de valeurs pour la réduction du risque et les co-bénéfices. Cette approche permet, d'une part, d'éclairer la décision de l'État de financer les projets

au titre du fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), dit « Fonds Barnier³ ». D'autre part, elle permet de conforter la position des agences de l'eau dont le financement est déterminé essentiellement par l'amélioration de la qualité des milieux et des fonctions écologiques. L'évaluation *bottom-up* rassemble des méthodes participatives et la méthode d'évaluation contingente. Elle évalue l'efficacité des stratégies dans une perspective locale pour favoriser leur acceptabilité sociale et indiquer les possibilités de financement de l'entité gemapienne.

L'article se structure en quatre parties. Nous présentons d'abord les stratégies de protection envisagées dans

³ Le fonds de prévention des risques naturels majeurs, créé en 1995, vise à accompagner les démarches globales de prévention des risques naturels en subventionnant des études et travaux de protection (notamment contre les inondations), mais aussi à mettre en sécurité les populations exposées à des risques naturels menaçant gravement les vies humaines (par exemple, via des procédures d'achats amiables ou d'expropriations).

Tab. 1. Les stratégies et leurs coûts sur 50 ans (millions d'euros).

Stratégies	Mesures	Coûts moyens (min ; max)
SFN1	Mesures génie civil (ambition moyenne) - pièges à flottants (140 m linéaires) - reprise de ponts et accès (2 880 m ²) Mesures de restauration écologique et paysagère (ambition moyenne) - restauration du lit moyen de la Brague (élargissements 15,5 ha) - restauration de zones humides (10 ha) - restauration de la ripisylve (13,2 ha) - création de pistes d'accessibilité discontinues (12 km)	80 (59 ; 133) dont : coût d'investissement : 76 (56 ; 128) coût de maintenance : 4 (3 ; 5)
SFN2	Mesures génie civil (niveau moyen) - pièges à flottants (110 m linéaires) - reprise de ponts, viaduc et déviation de route (18 700 m ²) Mesures de restauration écologique et paysagère (niveau fort) - restauration du lit moyen de la Brague (élargissement : 15,8 ha) - restauration de zones humides (12,7 ha) - création de pistes d'accessibilité continues (11,3 km) - restauration de la ripisylve (13,3 ha)	123 (93 ; 211) dont : coût d'investissement : 119 (90 ; 206) coût de maintenance : 4 (3 ; 5)
GC1	Mesures génie civil (niveau faible) - pièges à flottants (140 m linéaires) Mesures de restauration paysagère (niveau faible) - création de pistes d'accessibilité discontinues (4,4 km)	7,3 (5,3 ; 10,1) dont : coût d'investissement : 3,6 (2,5 ; 5,4) coût de maintenance : 3,7 (2,8 ; 4,7) coût environnemental : ~0
GC2	Mesures génie civil (niveau fort) - pièges à flottants (140 m linéaires) - grands barrages de rétention (Deux ouvrages de 30 m de haut et de capacité de rétention 880 000 m ³ sur la Brague et 560 000 m ³ sur la Valmasque) - endiguements et recalibrage de la Brague (200 m linéaires) Mesures de restauration paysagère (niveau faible) - création de pistes d'accessibilité discontinues (4,4 km)	171 (88 ; 270) dont : coût d'investissement : 105 (63 ; 147) coût de maintenance : 66 (26 ; 123) coût environnemental : 3 (1 ; 5)

notre cas d'étude : la basse vallée de la Brague (Alpes-Maritimes). Ensuite, nous explicitons les méthodologies d'estimation des bénéfices dans les deux approches de l'ACB. Nous présentons les résultats et enfin nous discutons de la complémentarité des deux approches dans le processus de décision et de financement de ces stratégies.

Les stratégies de prévention du risque d'inondation

Deux catégories de stratégies sont envisagées pour réduire le risque d'inondation : celles faisant appel seulement à des mesures de génie civil sont dites « GC »

tandis que celles reposant principalement sur des solutions fondées sur la nature sont dites « SFN ». Les stratégies SFN utilisent les fonctionnalités et la complexité des processus naturels pour restaurer les milieux aquatiques et riverains dans le but d'améliorer les opérations hydrauliques, géomorphologiques et écologiques. Contrairement aux stratégies GC, conçues et calibrées pour réduire le risque à un niveau donné, les stratégies SFN intègrent les objectifs de réduction du risque et d'amélioration de la qualité des milieux. Notons que certaines des mesures intégrées dans les stratégies SFN peuvent relever du génie civil : par exemple, des pièges à flottants qui sont des râteliers formés de pieux

métalliques fichés dans les alluvions, visant à piéger les troncs d'arbres transportés.

Des stratégies GC et SFN d'ambition intermédiaire (notées «1») et forte (notées «2») ont été définies. Chaque stratégie est composée de plusieurs mesures (Tab. 1). Dans le cas présenté ici, les mesures de génie civil correspondent principalement à des pièges à flottants et à de grands bassins de rétention. Les stratégies adoptant des solutions fondées sur la nature comportent des mesures d'élargissement et de rétablissement de végétation dans le lit moyen de la rivière, de restauration et de reconnexion des zones humides de la plaine et de replantation des boisements rivulaires. Ces stratégies correspondent ainsi à l'esprit des «espaces de bon fonctionnement» de la rivière (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2016).

Afin de s'assurer de l'intérêt écologique des stratégies SFN, une analyse de l'altération des cinq tronçons de rivière drainant la basse vallée de la Brague a été menée à l'aide de l'indice de qualité morphologique (IQM) de Rinaldi *et al.* (2013). Le IQM est un score compris entre 0 (tronçon totalement dégradé) et 1 (aucune altération) agrégeant l'état d'altération de la rivière estimée à partir de 28 indicateurs portant sur le chenal et son corridor. Sa pertinence pour mesurer l'amélioration de l'état des rivières après restauration a été démontrée sur de nombreux sites (Rinaldi *et al.*, 2017). Les indicateurs et leur échelle de définition permettent aussi l'utilisation du IQM dans des évaluations *a priori* de projets de restauration (Piton *et al.*, 2018a). Sur la Brague, il a été confirmé que le IQM se détériore sur l'ensemble des tronçons avec les stratégies GC et s'améliore avec les stratégies SFN, confirmant leur intérêt environnemental (Annexe 1).

La Figure 1 donne un aperçu de la localisation du bassin versant et des mesures proposées.

Le tableau 1 présente la composition et les coûts de toutes les stratégies sur un cycle de vie de 50 ans. Notons que le caractère GC ou SFN des stratégies est défini à une large échelle et indique un parti pris plutôt qu'une catégorie stricte. Afin de définir des stratégies techniquement cohérentes, chaque stratégie comprend ainsi des mesures relevant plutôt du génie civil et d'autres du paysagisme ou du génie écologique.

Les estimations des coûts sont faites à partir d'une revue de la littérature et des enquêtes locales, en retenant un taux d'actualisation de 2,5 % (CGDD, 2018). Ils comprennent les coûts d'investissement, environnementaux et de maintenance. Les coûts d'investissement incluent : i) les coûts d'acquisition et d'indemnisation des terrains et des résidences impactés (via des procédures

d'expropriation ou d'achat amiable) estimés à partir du prix du marché (base de données Perval⁴, 2018), ii) les coûts des études et des travaux. Les coûts environnementaux correspondent aux coûts des mesures correctives des impacts négatifs sur l'environnement, notamment de la phase de travaux (mesures compensatoires et mesures conservatoires). Ils sont estimés avec les ratios préconisés par le CGDD (2018, p. 125), soit 2 % à 4 % du coût d'investissement pour les constructions de barrage. Enfin, les coûts de maintenance englobent les estimations des coûts d'entretien et de réparation. En raison des incertitudes dans les estimations des coûts, la valeur des coûts moyens est indiquée et suivie entre parenthèses des valeurs basses et hautes de ces estimations.

Évaluation des bénéfices

Approche top-down

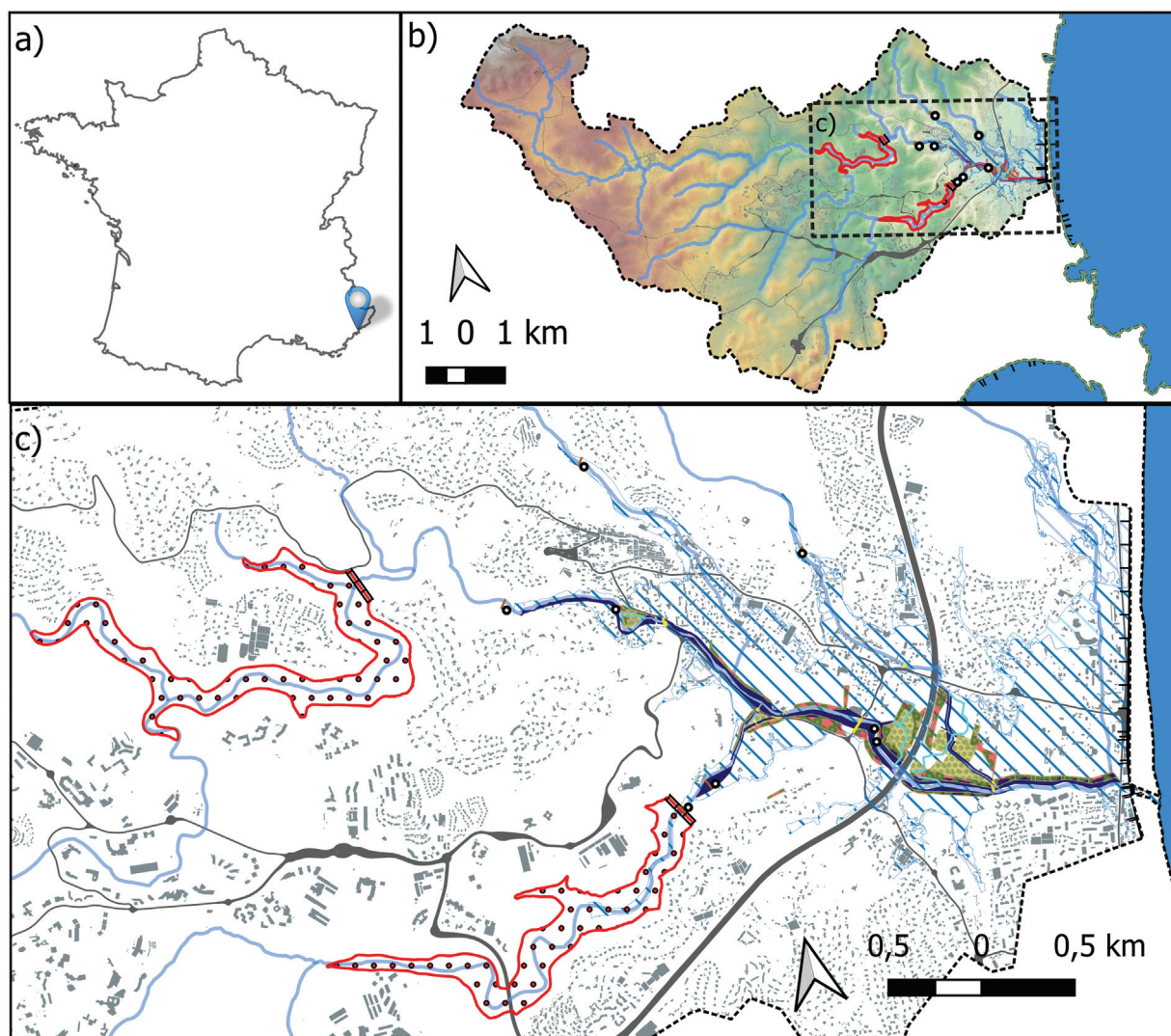
Les bénéfices dans l'approche *top-down* regroupent : i) les dommages évités permettant d'estimer le bénéfice lié à la réduction du risque et ii) le transfert de valeurs⁵ permettant d'estimer les co-bénéfices liés aux impacts positifs sur l'environnement.

L'estimation des dommages évités a suivi le protocole recommandé par l'État (CGDD, 2018) : i) modélisation des niveaux d'inondation liés à des crues avec plusieurs probabilités d'occurrence, dans l'état actuel et dans l'état aménagé ; ii) évaluation des dommages aux bâtis par l'utilisation de courbes de dommages reliant, pour chaque enjeu, niveau d'inondation et dommages ; iii) estimation des dommages moyens annuels évités par différence entre la moyenne des dommages dans l'état actuel et celle dans l'état aménagé. Plusieurs courbes de dommages ont été utilisées afin de fournir des estimations basses, moyennes et hautes : d'une part, les courbes moyennes nationales fournies par le commissariat général au développement durable (CGDD, 2018) et, d'autre part, la Caisse centrale de réassurance (CCR) qui a réestimé des courbes de dommages spécifiques au bassin versant de la Brague sur la base de ses données de sinistres et des niveaux de crues calculés par notre modèle numérique (Gnonlonfin *et al.*, 2019).

La méthode des transferts de bénéfices a été mise en œuvre pour estimer la valeur des co-bénéfices de restauration des milieux. Pour cela, Arfaoui et Gnonlonfin (2020) ont mené une méta-régression à partir de 49 études de restauration des écosystèmes de rivières, conduites de 1996 à 2018 en Europe, Asie de l'Est et Amérique.

⁴ Perval est une base de données publique qui se fonde sur les ventes immobilières enregistrées par les notaires de France pour proposer une analyse en profondeur de la structure du marché immobilier (<https://www.perval.fr/>)

⁵ L'approche de transfert de valeurs consiste à estimer les valeurs économiques de services écosystémiques à partir des estimations originales d'un ou de plusieurs sites d'études analogues (Richardson *et al.*, 2015).



Légende

--- Bassin versant

Plan de prévention des risques

--- Risque inondation faible

--- Risque inondation modéré

--- Risque inondation fort

Stratégie SFN1
(solution fondée sur la nature 1)

--- Restauration de ruisseau

--- Piège à flottants

--- Reprise de pont

--- Restauration du lit de la rivière

--- Restauration de zone humide

--- Restauration de ripisylve

Stratégie GC2
(génie civil 2)

--- Implantation des barrages

--- Zone maximale noyée par les barrages lors des crues

Fond de carte : IGN BD ALTI
Données vectorielles: IGN BD TOPO,
IGN BD GEOFLA, DDTM06 (Porté à
connaissance) et les auteurs
Préparation de la carte: les auteurs

Fig. 1. a) Carte de localisation du bassin versant de la Brague, b) Bassin versant de la Brague et localisation des mesures en amont et dans la basse vallée, c) Basse vallée et vallons amont et localisation précise des mesures des stratégies GC2 (génie civil 2) et SFN1 (solution fondée sur la nature 1).

Tab. 2. Les acteurs institutionnels clés.

Type d'acteur	Acteurs
Acteurs publics au niveau national	- Office national des Forêts - Agence française pour la biodiversité
Acteurs publics au niveau régional	- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse - Direction départementale des territoires et de la mer des Alpes-Maritimes - Département des Alpes-Maritimes - Conservatoire d'espaces naturels de Provence-Alpes-Côte d'Azur - Conservatoire du littoral
Acteurs publics au niveau local	- Communauté d'agglomération Sophia Antipolis - Syndicat mixte pour les inondations, l'aménagement et la gestion de l'eau communes de la basse vallée de la Brague (Biot et Antibes)
Société civile	- Représentants des victimes des inondations de la Brague - Association syndicale de lutte contre les inondations du bassin de la Brague - Association de sauvegarde de l'environnement de Biot et des Alpes-Maritimes

Les auteurs ont analysé 187 valeurs de consentement à payer (Cap) pour des mesures de restauration écologique puis dérivé une fonction de transfert de valeurs des co-bénéfices des stratégies SFN basée sur: i) les mesures de restauration mises en œuvre, ii) les services écosystémiques rendus par les stratégies et iii) un indicateur d'ambition du projet (normal ou forte).

L'estimation de la valeur des co-bénéfices à l'échelle du bassin de la Brague suit les préconisations de [Brander *et al.* \(2013\)](#). Le consentement à payer par an et par ménage est estimé en considérant les mesures constituant les différentes stratégies. Les variables de la fonction de transfert sont fixées à la valeur moyenne de la base de données constituée dans le cadre de la méta-régression d'[Arfaoui et Gnonlonfin \(2020\)](#). Des bornes hautes et basses de ces valeurs sont aussi estimées en intégrant l'incertitude de l'ajustement statistique. Afin de définir le Cap sur l'ensemble de la population du bassin versant, le consentement à payer par an et par ménage a été multiplié par le nombre d'habitants de ce même bassin (estimé à près de 28 874 habitants, INSEE 2014)

Approche *bottom-up*

L'approche *bottom-up* intègre des connaissances supplémentaires issues des parties prenantes à une échelle représentative. Dans cette perspective, notre démarche suit les trois conditions préconisées par [Carolus *et al.* \(2018\)](#): i) la définition des stratégies avec les parties prenantes locales, ii) la participation des acteurs clés concernés par le problème environnemental, iii) une échelle géographique pertinente.

Les parties prenantes clés représentent l'ensemble des acteurs dont les intérêts peuvent être affectés, positivement ou négativement, par les stratégies ([Colvin *et al.*, 2016](#)). Le bassin versant de la Brague a été défini comme la limite géographique du système afin de faciliter la coopération des acteurs. Une analyse sur les acteurs clefs en matière de gouvernance du risque ou des milieux a été menée. Quatre types d'acteurs ont été identifiés: les acteurs publics nationaux, régionaux, locaux, et la société civile. Entre juillet 2017 et décembre 2018, nous avons mené auprès des acteurs identifiés ([Tab. 2](#)) des entretiens semi-directifs et organisé des groupes de discussion. Ces dispositifs ont permis d'intégrer les connaissances et préférences des acteurs dans la définition des stratégies, d'identifier les co-bénéfices importants et de définir les modalités d'évaluation des stratégies auprès de la population. La consultation de la population s'est faite à travers une enquête menée en face à face en septembre et octobre 2019 auprès d'un échantillon représentatif de 405 personnes⁶.

Le questionnaire d'évaluation comprend essentiellement 5 modules pour appréhender :

- 1) les caractéristiques socio-économiques, les valeurs, croyances et normes environnementales des répondants ;

⁶ Les critères de représentativité (localisation géographique, genre, âge) ont émergé lors des discussions en ateliers. L'importance du critère de la localisation géographique a été particulièrement soulignée afin de prendre en compte les préférences de l'ensemble de la population vivant dans la limite géographique du bassin versant de la Brague.

- 2) et 3) la perception du risque d'inondation, les dommages causés par les inondations passées et les enjeux clés pour le territoire ;
- 4) les préférences sur les stratégies de réduction du risque d'inondation ;
- 5) le consentement à payer (Cap) pour la stratégie préférée.

Le Cap a été évalué via la méthode d'évaluation contingente suivant les recommandations de Johnston *et al.* (2017). De façon générale, cette méthode consiste à proposer aux personnes interrogées un scénario d'amélioration environnementale afin de les amener à déclarer la somme d'argent maximale qu'elles seraient prêtes à verser pour cette amélioration. Cette évaluation vise à estimer la variation de bien-être du répondant liée à l'ensemble des flux de services induits par la stratégie qu'il préfère (Pascual *et al.*, 2010). Pour cela, il était demandé aux enquêtés, dans un premier temps, de sélectionner leur stratégie préférée pour la réduction du risque d'inondation. Les enquêtés étaient informés sur le niveau des coûts socio-économiques (investissement et maintenance, expropriation et démolition de maisons) et des gammes de bénéfices potentiels de l'ensemble des mesures. Dans un second temps, les enquêtés devaient indiquer, d'une part, s'ils étaient prêts à contribuer financièrement à la stratégie préférée par une augmentation de la facture d'eau, et, d'autre part, leur niveau de « Cap-borné » pour tenir compte des incertitudes relatives à leurs préférences et au paiement effectif du montant déclaré (Pondorfer et Rehdanz, 2018).

Par ailleurs, il était demandé aux enquêtés qui refusaient de contribuer financièrement de justifier leur choix sur la base d'affirmations tirées de la littérature en économie de l'environnement (Tab. 3). Ce refus de payer peut avoir deux significations. Lorsque la stratégie préférée n'affecte pas le bien-être du répondant ou lorsque les contraintes budgétaires ne lui permettent pas de contribuer financièrement, le refus est considéré comme un « vrai 0 » (Rankin et Robinson, 2018 ; Johnston *et al.*, 2017). À l'inverse, le refus de contribuer financièrement peut être interprété comme une réponse de protestation ou de comportement stratégique visant à faire payer les autres (Meyerhoff et Liebe, 2010). Les motivations de protestation peuvent être multiples (Halstead *et al.*, 1992 ; Rankin et Robinson, 2018 ; Frey et Pirscher, 2019). Par exemple, elles peuvent être motivées par le fait que le répondant juge qu'il est inapproprié de donner une valeur monétaire aux services environnementaux. Par ailleurs, le répondant peut juger qu'il n'a pas l'information suffisante pour exprimer son consentement à payer pour le bien ou le service évalué.

Cependant, quelles que soient les motivations, selon Withey *et al.* (2019), les réponses de protestation ne

révèlent pas le bien-être induit par la stratégie préférée. Il est donc important de proposer une estimation de cette valeur pour ne pas introduire de biais de sélection dans l'évaluation du consentement à payer. En effet, les réponses de protestation sont souvent systématiques et représentent une proportion importante pouvant aller jusqu'à 60 % de la population enquêtée (Meyerhoff et Liebe, 2010 ; Frey et Pirscher, 2019). Dans ces conditions, leur suppression remet en question la représentativité de l'échantillon. Aussi, afin de permettre « l'estimation d'un Cap impartial pour une décision politique correcte » (Frey et Pirscher, 2019, p. 2), la littérature s'accorde sur la nécessité de proposer une classification et un traitement statistique approprié des réponses de protestations.

Dans la lignée des travaux empiriques (Withey *et al.*, 2019 ; Rankin et Robinson, 2018) nous utilisons le modèle d'Heckman (1976) pour traiter les réponses de protestation et le biais de sélection. Ce modèle permet de diviser le processus de décision du répondant en deux étapes. La première étape consiste à évaluer la probabilité de payer ou non pour la stratégie préférée. La deuxième étape consiste à estimer la valeur du consentement à payer, en tenant compte de la probabilité de payer ou non. La mise en œuvre de ce modèle est fondée sur les déterminants de la décision de payer d'une part, et les déterminants de la valeur du Cap, d'autre part (cf. Stern, 2000 ; Verlynde *et al.*, 2019). Ces estimations prennent en compte ici les caractéristiques socio-économiques, l'exposition au risque, les bénéfices valorisés, les valeurs environnementales et les perceptions des répondants⁷.

Résultats

L'approche *top-down* n'a été appliquée qu'aux deux stratégies GC2 et SFN1. Ce sont, en effet, celles qui ont été proposées par les acteurs publics dans les phases initiales du projet. Les stratégies GC1 et SFN2 n'avaient pas été retenues car jugées trop ou trop peu ambitieuses. À dire d'experts et à la lumière des modélisations détaillées menées sur les autres stratégies, la GC1 peut localement réduire le niveau des inondations. Dans la mesure où elle n'influence que la présence des flottants mais ne modifie ni les débits, ni le gabarit du cours d'eau, son effet sur la réduction des dommages est considéré comme négligeable. La SFN2 est plus ambitieuse que la SFN1 du fait qu'elle intègre le retrait du verrou formé par les buses de traversée de l'autoroute A8 (Fig. 1), lesquels seraient doublés d'un viaduc. À dire d'experts et sur la base de la modélisation menée sur la SFN1, il est estimé

⁷ Pour plus de détails sur l'utilisation du modèle d'Heckman dans l'estimation du consentement à payer des protestataires, se référer à l'annexe 6 du rapport Gnonlonfin et Douai (2019).

Tab. 3. Les refus de contribuer financièrement.

Affirmation qui justifie le mieux le refus de contribuer	% de répondants	Signification refus	Justification théorique
Ma situation financière ne me permet pas de contribuer à ma stratégie préférée.	16 %	« vrai 0 ».	contrainte budgétaire
Je ne suis pas concerné par les impacts et je ne pense pas devoir contribuer financièrement.	13 %	« vrai 0 »	variation nulle de l'utilité ex-ante.
Je ne crois pas que les travaux vont changer grand-chose à la situation actuelle.	5 %	« vrai 0 »	préférence pour le statu quo
Je paie déjà suffisamment de taxes locales.	23 %	protestation	croyances liées à la gouvernance de la finance locale.
La description des travaux n'est pas claire pour moi.	7 %	protestation	manque d'information
Je ne crois pas que les travaux auront un impact significatif sur le risque inondation	4 %	protestation	croyances relatives à l'efficacité des mesures proposées
Autres	1 %	autres protestations	autres croyances
Total	69 %		

que la SFN2 abaissera les niveaux de crues en amont mais aggravera les niveaux en aval où les écoulements sont bloqués par les remblais routiers et ferroviaires longeant la côte. Des amendements de la SFN2 pour faciliter l'évacuation vers la mer sont donc à réfléchir.

Les estimations montrent que les stratégies GC2 et SFN1 permettent des dommages évités annuels moyens comparables, estimés en moyenne (min ; max) à 0,5 (0,2 ; 0,7) M€/an, ce qui correspond sensiblement à une réduction de l'ordre de 30 % des dommages annuels moyens ([Annexe 2](#), détails des modélisations dans [Piton *et al.*, 2018b](#) et [Gnonlonfin *et al.*, 2019](#)). Les co-bénéfices de la stratégie SFN1 sur la qualité des milieux sont estimés à 28 (2 ; 353) €/ménage/an. Il en résulte un bénéfice social annuel de 0,8 (0,06 ; 10) M€/an. La très large incertitude sur les valeurs minimum et maximum est associée à la forte variabilité des valeurs mesurées dans la base de données d'[Arfaoui et Gnonlonfin \(2020\)](#).

Dans le cadre de l'approche *bottom-up*, l'ambition était d'explorer les préférences de la population, sans se limiter aux propositions des acteurs publics. L'enquête a donné la possibilité à tous les répondants d'exprimer leur préférence indépendamment de leur volonté à payer.

Les résultats de l'enquête montrent que les stratégies préférées sont : SFN1 pour 44 % des répondants, GC1 à hauteur de 28 % des répondants, GC2 + SFN2 à hauteur de 18 % des répondants et SFN2 pour 10 % des répondants. Aucun répondant ne préfère la seule stratégie GC2. Des deux stratégies proposées par les acteurs publics, seule la stratégie SFN1 correspond donc aux préférences de la population. Lorsque la stratégie GC2 est préférée, elle est toujours couplée avec la stratégie SFN2. Il en résulte que 72 % des répondants préfèrent une stratégie intégrant les mesures visant à restaurer ou améliorer le fonctionnement naturel de l'écosystème de la Brague. Ce résultat suggère une forte demande sociale pour les stratégies basées sur des solutions fondées sur la nature.

À la question « Êtes-vous prêt à contribuer financièrement, par une augmentation de votre facture d'eau, à la mise en œuvre de votre stratégie préférée ? », les résultats montrent que 69 % des répondants refusent de contribuer, dont 35 % de réponses de protestation et 34 % de « vrai 0 » ([Tab. 3](#)). Ceci suggère que près d'un tiers des répondants refusent de révéler le bien-être induit par leur stratégie préférée. Ce taux de réponses de

Tab. 4. Analyse coût-bénéfice sur une fenêtre de 50 ans, estimations moyennes (min ; max) en millions d'euros.

Stratégie	GC1	GC2	GC2+SFN2	SFN1	SFN2
% de préférence rapportée dans l'enquête	28 %	0 %	18 %	44 %	10 %
Coûts totaux (C)	7 (5 ; 10)	171 (89 ; 270)	294 (182 ; 481)	80 (59 ; 133)	123 (93 ; 211)
Bénéfices (B) [estimation <i>top-down</i>]	~	14 (7 ; 20)	~	37 (7 ; 309)	~
Bénéfices (B) [estimation <i>bottom-up</i>]	47 (25 ; 66)	0 (0 ; 0)	128 (57 ; 200)	68 (25 ; 103)	95 (51 ; 142)
B/C des valeurs moyennes (estimation <i>top-down</i>)	~	0.1 (0.1 ; 0.1)	~	0.5 (0.1 ; 2.3)	~
B/C des valeurs moyennes (estimation <i>bottom-up</i>)	6.7 (5 ; 6.6)	0 (0 ; 0)	0.4 (0.3 ; 0.4)	0.8 (0.4 ; 0.8)	0.8 (0.5 ; 0.7)

GC : génie civil – SFN : solution fondée sur la nature.

protestation est comparable à ceux rapportés dans la littérature empirique.

Les estimations avec le modèle d'Heckman permettent de corriger le biais de sélection et de prédire la moyenne empirique des $Cap > 0$ (Annexe 3, Gnonlonfin et Douai, 2019). Il en résulte un consentement à payer moyen par ménage et par an (borne inférieure ; borne supérieure) de : 83 € (31 ; 125) pour la stratégie SFN1 ; de 57 € (31 ; 81) pour la stratégie GC1 ; de 116 € (62 ; 173) pour la stratégie SFN2 et de 156 € (63 ; 240) pour la stratégie double GC2 + SFN2.

Le tableau 4 résume les estimations des coûts et bénéfices sur une période de 50 ans et présente les ratios bénéfices/coûts (B/C) dans les deux approches. À l'exception de la GC1, toutes les autres stratégies enregistrent en moyenne un ratio B/C inférieur à 1. La GC1 a un coût relativement faible et ses partisans lui attribuent des bénéfices lui conférant un ratio B/C très positif. Ce résultat peut s'expliquer par la perception des riverains qui accordent une grande importance au problème d'obstruction des ponts par les arbres, comme ce fut le cas en octobre 2015. Aussi, les ratios des stratégies évaluées dans les deux approches sont comparables en moyenne. Par ailleurs, dans l'approche *bottom-up*, les ratios des stratégies SFN1 et SFN2 sont aussi comparables en moyenne et sont supérieurs au ratio de la double stratégie GC2 + SFN2. Ce résultat confirme les intuitions des acteurs publics : les enquêtés accordent une valeur élevée à une ambition forte de stratégie de restauration telle que représentée par la SFN2. Les bénéfices totaux d'une stratégie sécuritaire ayant à la fois une forte ambition sur le plan du génie

civil et de la restauration des milieux (GC2 + SFN2) sont considérés comme étant très forts par ses partisans, mais les coûts associés, très élevés, génèrent une balance bénéfice/coût moins favorable que les autres stratégies.

Dans l'approche *bottom-up*, les préférences suggèrent une forte demande sociale pour les stratégies de réduction du risque intégrant une composante de restauration des milieux. Finalement, la SFN1 ressort comme la stratégie qui fait consensus entre les différentes parties prenantes. Elle intègre les préoccupations de réduction du risque, de l'amélioration environnementale et l'acceptabilité de la population. Toutefois, cette stratégie ne satisfait pas le critère d'analyse coût-bénéfice.

Discussion et remarques conclusives

La démarche décrite dans cet article correspond à une partie d'une analyse plus large visant à fournir à une diversité d'acteurs un ensemble hétérogène d'informations et de données pour comprendre les enjeux du risque inondation sur un territoire et éclairer la décision publique. Notre approche a consisté à inscrire l'analyse coût-bénéfice dans un cadre pluraliste, l'articulant avec des indicateurs écologiques (non monétaires) (cf. Gnonlonfin *et al.*, 2019). Cette approche s'est adressée prioritairement à une audience technique (gestionnaires du risque, etc.) et aux usagers. Il faut également être conscient que l'utilisation de l'ACB *top-down* pour fonder les décisions d'aménagement pour gérer ce type de risque est habituelle et autosuffisante (jusqu'à présent,

elle est la seule méthode prescrite et systématiquement mise en œuvre). À partir de la prise en compte de certains écueils théoriques et méthodologiques de l'analyse coût-bénéfice (Encadré) et du contexte de prise de décision, l'enjeu de notre démarche a été de proposer une formulation de cette dernière qui permette d'enrichir le cadre de la décision publique. Nous défendons ici l'idée d'appliquer, pour l'analyse coût-bénéfice, la double approche *top-down* et *bottom-up*, dans le contexte institutionnel de la Gemapi pour faciliter le débat entre les différentes parties prenantes et éclairer leur prise de décision. Cette analyse contribue ainsi à combler en partie les lacunes liées à l'évaluation et au financement des SFN.

L'ACB *top-down* couvre d'abord le volet protection contre les risques d'inondation (Pi) en démontrant l'impact des stratégies sur le risque sans la prise en compte des perceptions locales. Elle permet, en complément d'autres critères, d'éclairer les visions de l'État et de débloquent des financements au titre du Fonds Barnier. Ensuite, l'estimation des co-bénéfices couvre le volet gestion écologique des milieux aquatiques (Gema). Ce qui permet de donner une valeur monétaire aux impacts environnementaux et d'apporter une information supplémentaire pour la prise de décision des acteurs régionaux tels que l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, dont la décision de financement dépend de l'ambition des stratégies au niveau environnemental. Nos résultats montrent que, dans le cas de la Brague, les stratégies GC2 et SFN1 ne présentent pas de ratios bénéfices/coûts suffisants pour justifier directement leur mise en œuvre. Dès lors, les autres critères (sécurité des personnes, dommages indirects évités, etc.) vont être déterminants dans la décision de financement.

L'approche *bottom-up* repose sur le consentement à payer de la population pour les stratégies de réduction du risque d'inondation. Cette approche apporte des informations sur l'acceptabilité sociale de la taxe Gemapi en indiquant i) les stratégies auxquelles la population locale est prête à contribuer financièrement et ii) le montant de la contribution socialement acceptable. En effet, le Cap médian est considéré comme un bon indicateur de la contribution financière acceptable pour la majorité de la population (OCDE, 2018). Dans le cas de la Brague, on note qu'il est nul pour les stratégies GC, soulignant ainsi la non-acceptabilité sociale d'une contribution financière pour ces stratégies malgré leurs bénéfices. Par contre, le Cap médian (/ménage/an) est estimé à 27 € pour la stratégie SFN1 ; 75 € pour la stratégie SFN2 et 59 € pour la double stratégie GC2 + SFN2 ; avec un intervalle d'incertitude compris respectivement entre 7 et 47 € ; 38 et 100 € et 8 et 100 €. Les entités gemapiennes ont donc potentiellement un pouvoir significatif de financement bien que le soutien des autres acteurs reste nécessaire

pour les solutions fondées sur la nature. Le financement des agences de l'eau, dont la décision de financer un projet est fondée sur le gain de qualité des milieux, aidera à la promotion de ces stratégies.

Notre étude présente l'avantage de prendre en compte les incertitudes aussi bien dans l'estimation des coûts que des bénéfices. En effet, nous proposons, en plus des valeurs moyennes, une estimation des valeurs minimales et des valeurs maximales, étant donné les informations disponibles, ce qui suggère une précaution dans l'interprétation des résultats. Par ailleurs, nos résultats sont aussi sensibles au nombre de ménages retenus pour l'estimation du bénéfice social. Nous avons en effet calculé le bénéfice social sur la base de l'hypothèse selon laquelle seuls les ménages résidant dans la limite géographique du bassin versant représentent la population impactée par les stratégies. Toutefois, avec les parcs naturels départementaux de la Valmasque et de la Brague, les zones de loisirs de la base vallée et le parc d'activités Sophia Antipolis, des bénéficiaires des stratégies évaluées vivent hors du bassin versant. Dans ces conditions, la littérature recommande d'utiliser l'ensemble de la population vivant dans la zone administrative (Logar *et al.*, 2019). Dans le contexte français, plusieurs niveaux administratifs se partagent la gouvernance du risque. Par exemple, dans le cadre de la Brague, trois niveaux institutionnels peuvent être considérés, à savoir la communauté d'agglomération, l'entité gemapienne et les 11 communes de la Brague, c'est-à-dire les communes dont tout ou partie du territoire est située sur le bassin versant de la Brague.

L'estimation des bénéfices sociaux correspond donc à la borne la plus basse car la population considérée ne représente qu'environ 30 % de la population des 11 communes de la Brague. Une estimation des bénéfices sociaux à l'échelle administrative de ces communes multiplierait ainsi par 3,4 la valeur du bénéfice fournie dans le tableau 4. Il en résulterait une balance B/C > 1 pour les stratégies SFN dans les deux approches. Le niveau d'agrégation du bénéfice social est donc clé et devrait faire l'objet de recommandations claires.

La répartition des coûts entre les différentes parties prenantes est une question qui reste encore ouverte. Dans le contexte des SFN, qui intègrent les deux volets Gema et Pi, de nouveaux problèmes décisionnels en termes de financement se posent : quelles composantes des stratégies SFN relèvent des missions de protection contre les inondations (Pi) et quelles composantes relèvent de la restauration des milieux (Gema) ? Étant donné le caractère intégratif des solutions fondées sur la nature, il semble difficile de considérer séparément leur efficacité en matière de réduction du risque et de restauration des milieux.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les acteurs du bassin versant de la Brague, notamment le Syndicat intercommunal de l'amélioration de la qualité des eaux de la Brague et de ses affluents (Siaqueba), la Communauté d'agglomération Sophia Antipolis (Casa), l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, la Direction départementale des territoires et de la mer 06 (DDTM) et toutes les personnes qui ont contribué aux ateliers participatifs du projet Naiad. Ils remercient également Muhammad Badar Munir qui a réalisé une partie des modélisations des dommages évités et la Caisse centrale de réassurance (CCR) qui a calé des courbes de dommages spécifiques sur les données de sinistralité de 2015 du bassin versant. Une version préalable de cet article a été amendée grâce aux commentaires et suggestions de Pierre Barret, de Margot Chapuis, de Céline Pigeaud, de Benoît Terrier et de deux relecteurs anonymes que nous remercions pour leurs critiques constructives.

Références

- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2016. *Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau*. Guide Technique du SDAGE, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, <https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2017-05/2016-guide-ebf-cours-d-eau-hdef.pdf>.
- Albert C., Schröter B., Haase D., Brilling M., Henze J., Herrmann S., Matzdorf B., 2019. Addressing societal challenges through nature-based solutions: How can landscape planning and governance research contribute?, *Landscape and Urban Planning*, 182, 12-21, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.003>.
- Andersson E., Borgström S., McPhearson T., 2017. Double insurance in dealing with extremes: ecological and social factors for making nature-based solutions last, in Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (Eds), *Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas, Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*, Springer Open, 51-64, https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_4.
- Arfaoui N., Gnonlonfin A., 2020. Testing meta-regression analysis in the context of NBS restoration measures: The case of Brague river, *Working Paper ESDES* n°2020-02, https://www.esdes.fr/wp-content/uploads/sites/12/2020/11/wp_esdes_2020_02_arfaoui_gnonlonfin.pdf.
- Brander L., Brouwer R., Wagtendonk A., 2013. Economic valuation of regulating services provided by wetlands in agricultural landscapes: A meta-analysis, *Ecological Engineering*, 56, 89-96, <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2012.12.104>.
- Carolus J.F., Hanley N., Olsen S.B., Pedersen S.M., 2018. A bottom-up approach to environmental cost-benefit analysis, *Ecological Economics*, 152, 282-295, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.06.009>.
- Commissariat général au développement durable, 2018. *Analyse multicritère des projets de prévention des inondations*. Guide méthodologique, Commissariat général au développement durable, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Théma%20-%20Analyse%20multicritère%20des%20projets%20de%20prévention%20des%20inondations%20-%20Guide.pdf>.
- Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen C., Maginnis S., 2016. Nature-based solutions to address global societal challenges, *IUCN, Gland, Switzerland*, <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf>.
- Colvin R., Witt G.B., Lacey J., 2016. Approaches to identifying stakeholders in environmental management: insights from practitioners to go beyond the 'usual suspects', *Land Use Policy*, 52, 266-276, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.12.032>.
- Douai A., Plumecocq G., 2017. *L'économie écologique*, Paris, Repères, La Découverte.
- Eggermont H., Balian E., Azevedo J.M.N., Beumer V., Brodin T., Claudet J., 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://www.biodiversa.org/898/download>.
- Fournier M., 2019. Flood Governance in France: From Hegemony to Diversity in the French Flood-Risk Management Actors' Network, In La Jeunesse I., Larrue C. (Eds.), *Facing Hydrometeorological Extreme Events*, Chichester, UK, John Wiley et Sons, Ltd, 125-139, <https://doi.org/10.1002/9781119383567.ch9>.
- Frey U.J., Pirscher F., 2019. Distinguishing protest responses in motivations and attitudes behind them, *PLoS One*, 14, 1, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209872>.
- Gnonlonfin A., Piton G., Marchal R., Munir M.B., Wang Z.X., Moncoulon D., Mas A., Arnaud P., Tacnet J.-M., Douai A., 2019. *Deliverable 6.3 Demo insurance value assessment – Part 7: France: Brague*. NAIAD H2020 project (Grant Agreement n° 730497), 267-428, <https://hal.inrae.fr/hal-03027263/>.
- Gnonlonfin A., Douai A., 2019. *Rapport d'enquête: Quel avenir pour la Brague face au risque d'inondation?*. Rapport de recherche, EU Horizon 2020 NAIAD Project, Grant Agreement N°730497, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03030376>.
- Halstead J., Luloff A., Stevens T., 1992. Protest bidders in contingent valuation. *Northeastern Journal of Agricultural and Resource Economics*, 21, 2, 160-169, <https://doi.org/10.1017/S0899367x00002683>.
- Heckman J.J., 1976. The common structure of statistical models of truncation, sample selection and limited dependent variables and a simple estimator for such models. *Annals of economic and social measurement*, 5, 4, 475-492, <http://www.nber.org/books/aesm76-4>.
- Johnston R.J., Boyle K.J., Adamowicz W., Bennett J., Brouwer R., Cameron T.A., Vossler C.A., 2017. Contemporary guidance for stated preference studies, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4, 2, 319-405, <https://doi.org/10.1086/691697>.

- Kabisch N., Frantzeskaki N., Pauleit S., Naumann S., Davis M., Artmann M., Haase D., Knapp S., Korn H., Stadler J., Zaunberger K., Bonn A. 2016. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action, *Ecology and Society*, 21, 2, 39, <https://doi.org/10.5751/ES-08373-210239>.
- Kallis G., Gómez-Baggethun E., Zografos C., 2013. To value or not to value? That is not the question, *Ecological economics*, 94, 97-105, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.07.002>.
- Logar I., Brouwer R., Paillex A., 2019. Do the societal benefits of river restoration outweigh their costs? A cost-benefit analysis, *Journal of Environmental Management*, 232, 1075-1085, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.098>.
- Martín-López B., Iniesta-Arandia I., García-Llorente M., Palomo I., Casado-Arzuaga I., García Del Amo D., Gómez-Baggethun E., Oteros-Rozas E., Palacios-Agundez I., Willaarts B., González J.A., Santos-Martín F., Onaindia M., López-Santiago C., Montes C., 2012. Uncovering ecosystem service bundles through social preferences. *PLOS ONE*, 7, 6, e38970, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038970>.
- Mechler R., 2016. Reviewing estimates of the economic efficiency of disaster risk management: opportunities and limitations of using risk-based cost-benefit analysis, *Natural Hazards*, 81, 3, 2121-2147, <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2170-y>.
- Meyerhoff J., Liebe U., 2010. Determinants of protest responses in environmental valuation: A meta-study, *Ecological Economics*, 70, 366-374, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.09.008>.
- Nesshöver C., Assmuth T., Irvine K.N., Rusch G.M., Waylen K.A., Delbaer B., Wittmer H., 2017. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective, *Science of the total environment*, 579, 1215-1227, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>.
- OCDE, 2018. *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*, Paris, Éditions OCDE, <https://www.oecd.org/governance/cost-benefit-analysis-and-the-environment-9789264085169-en.htm>.
- Pascual U., Muradian R., Brander L., Gómez-Baggethun E., Martín-López B., Verma M., Polasky S., 2010. The economics of valuing ecosystem services and biodiversity, in Kumar P. (Ed.), *The economics of ecosystems and biodiversity, Ecological and economic foundations*, Londres, Routledge, 183-256, https://www.researchgate.net/profile/Unai-Pascual/publication/303444184_The_Economics_of_Valuing_Ecosystem_Services_and_Biodiversity/links/5746b08208aea45ee8561db8/The-Economics-of-Valuing-Ecosystem-Services-and-Biodiversity.pdf.
- Piton G., Philippe F., Tacnet J.-M., Gourhand A., 2018a. Focus – Caractérisation des altérations de la géomorphologie naturelle d'un cours d'eau Application du Morphological Quality Index (IQM) aux projets d'aménagement du Grand Buëch à La Faurie, *Science Eaux et Territoires*, 26, 58-61, <https://doi.org/10.3917/set.026.0058>.
- Piton G., Dupire S., Arnaud P., Mas A., Marchal R., Moncoulon D., Curt T., Tacnet J.-M., 2018b. *Delivrable 6.2 From hazards to risk: models for the Demos – Part 3: France: Brague catchment DEMO*, NAIAD H2020 project (Grant Agreement n° 730497), 215-344, <https://hal.inrae.fr/hal-03026632/>.
- Pondorfer A., Rehdanz K., 2018. Eliciting Preferences for Public Goods in Nonmonetized Communities: Accounting for Preference Uncertainty, *Land Economics*, 94, 1, 73-86, <https://doi.org/10.3368/le.94.1.73>.
- Rankin J., Robinson A., 2018. Accounting for protest zeros in contingent valuation studies: A review of literature, Health Economics Group (HEG), *Working Paper*, n°18-01, University of East Anglia, <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/197777/1/1027441459.pdf>.
- Rey F., Breton V., Poulard C., Breil P., Meriaux P., 2018. Les solutions fondées sur la nature pour accorder la prévention des inondations avec la gestion intégrée des milieux aquatiques, *Sciences Eaux et Territoires*, 26, 36-41, <https://doi.org/10.3917/set.026.0036>.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M., 2013. A method for the assessment and analysis of the hydro-morphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (IQM), *Geomorphology*, 180, 96-108, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.009>.
- Rinaldi M., Belletti B., Bussetini M., Comiti F., Golfieri B., Lastoria B., Marchese E., Nardi L., Surian N., 2017. New tools for the hydromorphological assessment and monitoring of European streams, *Journal of Environmental Management*, 202, 363-378, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.036>.
- Richardson L., Loomis J., Kroeger T., Casey F., 2015. The role of benefit transfer in ecosystem service valuation, *Ecological Economics*, 115, 51-58, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.018>.
- Stern P., 2000. Toward a coherent theory of environmentally significant behavior, *Journal of Social Issues*, 56, 3, 407-424, <https://doi.org/10.1111/0022-4537.00175>.
- Verlynde N., Voltaire L., Chagnon P., 2019. Exploring the link between flood risk perception and public support for funding on flood mitigation policies, *Journal of Environmental Planning and Management*, 62, 13, 2330-2351, <https://doi.org/10.1080/09640568.2018.1546676>.
- Withey P., Sullivan D., Lantz V., 2019. Willingness to pay for protection from storm surge damages under climate change in Halifax Regional Municipality, *Journal of Environmental Management*, 241, 44-52, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.007>.

Annexe 1

Les valeurs des indices de qualité morphologique (IQM) sont estimées sur les tronçons de cours d'eau représentés dans la [figure A1](#) ; le détail des scores est fourni au [tableau A1](#). Les valeurs des 28 sous-indicateurs ont été évaluées par analyse des images aériennes, visites de terrain et analyse de la bibliographie existante afin d'estimer le score actuel. Dans un second temps, sur la base des plans des stratégies et de la description des mesures, les sous-indicateurs ont été réévalués dans les états aménagés théoriques aboutissant aux scores fournis pour chaque stratégie (voir détails dans [Gnonlonfin *et al.*, 2019](#)).

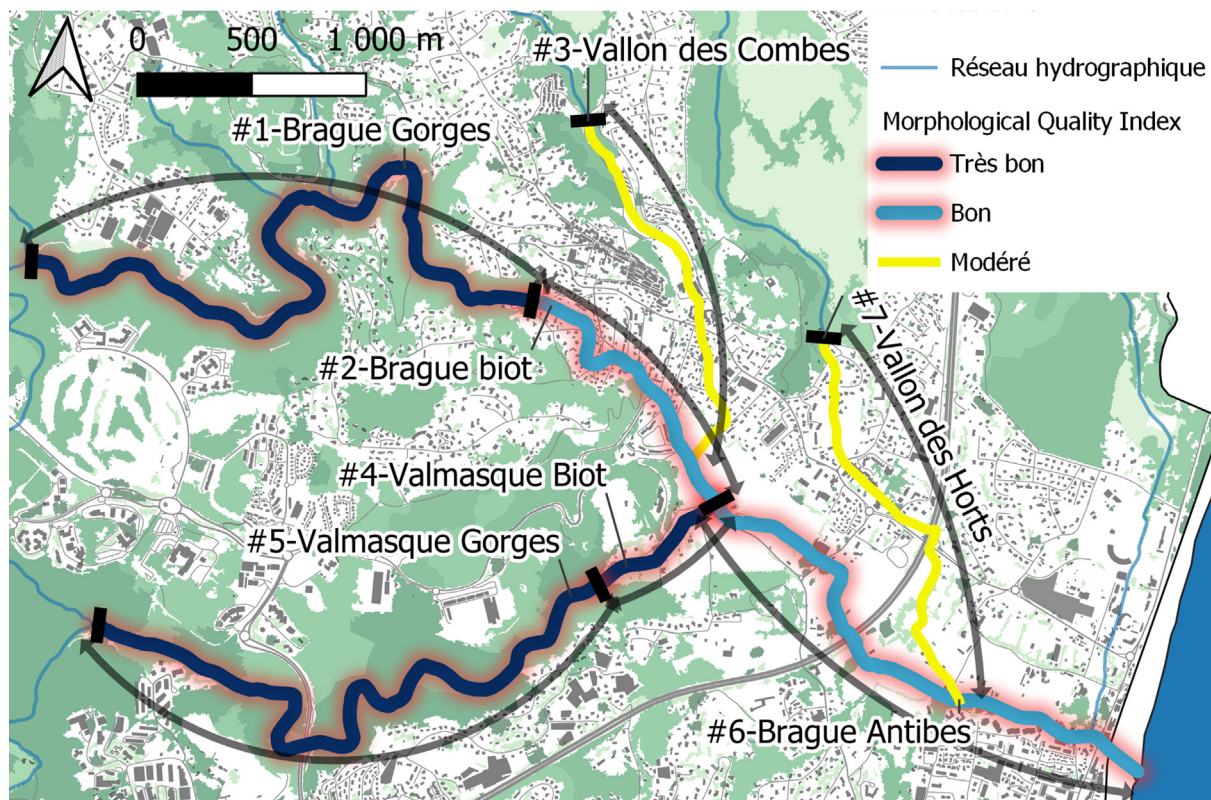


Fig. A1. Cartographie du réseau hydrographique de la Brague et de ses affluents et scores IQM de l'état actuel (Source : les auteurs, fond de carte IGN BD TOPO).

Tab. A1. Valeur de l'index IQM pour les tronçons #1 à #5 selon les différents stratégies et changements par rapport à l'état actuel
 $\Delta IQM = IQM_{\text{Aménagé}} - IQM_{\text{Actuel}}$

Stratégie	Tronçon	Brague Gorges #1	Brague Biot #2	Brague Antibes #6	Valmasque Gorges #5	Valmasque Biot #4
État Actuel	IQM	0.94	0.82	0.80	0.94	0.85
GC2	IQM	0.87	0.79	0.76	0.87	0.82
ΔIQM	-0.07	-0.03	-0.04	-0.07	-0.03	
SFN1	IQM	0.97	0.86	0.90	0.97	0.88
	ΔIQM	0.03	0.04	0.1	0.03	0.03
SFN2	IQM	0.97	0.87	0.95	0.97	0.88
	ΔIQM	0.03	0.05	0.15	0.03	0.03

Note : IQM = 0 = altération totale ; IQM = 1 = aucune altération.

Annexe 2

Tab. A2. Estimation des dommages associés à différentes crues en fonction des courbes de dommages utilisées (M€, 2018).

Situation	Situation actuelle			Stratégie GC2			Stratégie SFN1		
Courbe de dommage	CGDD bâti	CGDD m ²	CCR local	CGDD bâti	CGDD m ²	CCR local	CGDD bâti	CGDD m ²	CCR local
Crue T = 20 ans	6.0	15.0	23.2	4.9	12.1	19.0	4.1	10.2	16.1
Crue T = 100 ans	11.4	27.5	42.5	7.0	17.2	26.8	7.2	17.5	27.8
Crue T = 500 ans	15.4	37.2	52.4	9.8	23.8	37.4	12.1	29.3	43.0
Dommage moyen annuels	0.6	1.6	2.4	0.5	1.1	1.7	0.4	1.1	1.7
Dommages moyen annuel évité				0.2	0.5	0.7	0.2	0.5	0.7
Évité / Actuels				30 %	29 %	28 %	32 %	32 %	31 %

Annexe 3

Tab. A3. Résultats de l'enquête vis-à-vis de l'estimation du consentement à payer (Cap) [€/ménage/an].

Sous-groupes	Estimation empirique		Estimation avec le modèle Heckman	
	Moyenne (écart-type)	Médiane	Moyenne (écart-type)	Médiane
Cap (protestations)			140 (116)	102
Cap = 0	0	0	0 ^a	0 ^a
Cap > 0	159 (381)	50	147 (101)	122

a : considérée égale à zéro.

Citation de l'article : Arfaoui N., Gnonlonfin A., Piton G., Douai A. Efficience économique et financement des solutions fondées sur la nature : le cas du bassin versant de la Brague. *Nat. Sci. Soc.* 30, 3-4, 238-253.