



HAL
open science

Optimisation “ économique ” vs “ physique ” des réseaux de surveillance de la qualité de l’eau

François Destandau, Youssef Zaiter

► **To cite this version:**

François Destandau, Youssef Zaiter. Optimisation “ économique ” vs “ physique ” des réseaux de surveillance de la qualité de l’eau. *Revue d’économie politique*, 2020. hal-03373478

HAL Id: hal-03373478

<https://hal.science/hal-03373478>

Submitted on 11 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation « économique » vs « physique » des réseaux de surveillance de la qualité de l'eau

François Destandau*
Youssef Zaiter

Les réseaux de surveillance jouent un rôle important dans l'acquisition d'information pour orienter les politiques afin d'améliorer la qualité des eaux de surface. Ceci nous a conduits à une réflexion sur la valeur économique de cette information par la méthode bayésienne. Dans cette étude, nous cherchons à déterminer la localisation optimale des stations d'un réseau de surveillance, le long d'une rivière, dont l'objectif est de détecter des pollutions accidentelles potentielles.

Nous élaborons un modèle théorique et une simulation numérique pour comparer la valeur économique de l'information de deux réseaux différents : un réseau « physiquement » optimisé où la localisation des stations permet de minimiser le temps de détection de la pollution accidentelle, en ne tenant compte que de considérations hydrologiques, et un réseau « économiquement » optimisé où la localisation des stations permet la maximisation de la valeur de l'information. Cette comparaison est faite pour trois scénarios de vulnérabilité, à savoir un dommage environnemental, généré par la pollution : constant, décroissant ou croissant le long de la rivière.

Nos résultats montrent que l'avantage d'optimiser économiquement le réseau plutôt que physiquement, dépend du contexte, à savoir le nombre de stations et le scénario de vulnérabilité. Ainsi, selon le coût additionnel de l'optimisation économique, l'optimisation physique pourrait être recommandée.

Gestion de la ressource en eau - Réseaux de surveillance de la qualité - Valeur économique de l'information

"Economic" vs. "Physical" optimization of the water quality monitoring networks

Monitoring networks are playing an important role in acquiring information to guide policies to improve surface water quality. This has led us to reflections regarding the economic value of this information using the Bayesian method. In this study, we seek to determine the optimal location of stations in a monitoring network, along a river, where the objective is to detect potential accidental pollution.

With a theoretical model and a numerical simulation, we compare the economic value of information from two different networks: a "physically" optimized network where the location of stations minimizes the time required to detect accidental pollution, taking into account only hydrological considerations, and an "economically" optimized network where the location of stations allows the value of information to be maximized. This comparison is made for three vulnerability scenarios, namely environmental damage, generated by pollution: constant, decreasing or increasing along the river.

Our results show that the benefit of optimizing the network economically rather than physically depends on the context, namely the number of stations and the vulnerability scenario. Thus, depending on the additional cost of economic optimization, physical optimization could be recommended.

Water resource management - Quality monitoring network, Economic value of information

Classification JEL : C11, Q53

*1. GESTE, UMR MA 8101 ENGEES, F-67000 Strasbourg, France

2. Université de Strasbourg, F-67000 Strasbourg, France

ENGEES, 1 quai Koch, 67000 Strasbourg. Tél : 03 88 24 82 50. E-mail : francois.destandau@engees.unistra.fr

1. Introduction

Les réseaux de surveillance de la qualité de l'eau visent à acquérir de l'information sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des masses d'eau dans le temps et l'espace (Sanders *et al.* [1983]). Leur rôle est de fournir une information suffisante pour permettre aux décideurs de prendre des décisions informées concernant les risques sanitaires liés à l'exposition des populations à la ressource en eau (Telci *et al.* [2009]). Plus simplement Harmancioglu *et al.* [1999] définissent le réseau de surveillance comme l'activité de collecte et de production de données sur la qualité de l'eau.

L'analyse économique de l'information considérée comme bien rare, utile et pouvant faire l'objet d'échange, naît au début des années 60 (Stigler [1961]) de la remise en cause de l'hypothèse d'information parfaite du modèle économique standard. L'intérêt pour la valeur économique de cette information est beaucoup plus récente (Macauley et Laxminarayan [2010]). Par exemple, Corbel [2013] applique la notion de chaîne de valeur de Porter [1988] aux systèmes d'information. Yokota et Thompson [2004] décrivent l'analyse de la valeur de l'information comme l'évaluation du bénéfice de collecter de l'information additionnelle pour réduire ou éliminer de l'incertitude dans un contexte spécifique de prise de décision. Ainsi, l'analyste doit identifier l'ensemble des actions possibles et leurs conséquences selon tous les états de la nature possibles et les évaluer selon une métrique commune. De plus, il doit caractériser les incertitudes sur les états de la nature par des distributions de probabilité, ainsi que les stratégies de collecte d'information, leur précision et leur impact sur les incertitudes. La statistique Bayésienne permet de calculer la modification d'une distribution de probabilité en présence d'une information additionnelle. La notion de valeur économique de l'information a été déclinée dans de nombreux domaines scientifiques (Lawrence [2012]). Jeuland *et al.* [2019] font une revue de la littérature des travaux traitant des coûts et/ou des bénéfices de l'information dans le domaine de l'eau en soulignant le besoin d'enrichir cette recherche pour optimiser les systèmes d'information.

Le premier réseau de surveillance de la qualité de l'eau en France date de 1971. L'Inventaire National pour établir le degré de Pollution (INP) offrait un premier aperçu de la qualité des cours d'eau mais se limitait à quelques points de mesure dans les plus grands cours d'eau. L'objectif étant l'identification de « points noirs », les stations étaient positionnées à l'aval des sources de pollution les plus importantes. Le nombre de stations de mesure a été multiplié par la suite sans réellement faire l'objet d'une optimisation de leur localisation. En 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) crée trois types de réseaux : le Réseau de Contrôle de Surveillance, dont l'objet est de positionner les stations à des endroits représentatifs dans l'optique de suivre la qualité sur le long terme ; le Réseau de Contrôle Opérationnel, qui vise à surveiller de plus près les masses d'eau qui risquent de ne pas atteindre le bon état et d'identifier les sources de pollution ; et le Réseau de Référence avec des stations positionnées là où la qualité ne subit pas de dégradation anthropique pour servir de point de comparaison. Toutefois, en 2012, la Commission européenne, dans le cadre du bilan du premier cycle de la DCE, soulignait que cette surveillance restait insatisfaisante en Europe en général et en France en particulier (European Commission [2012]). A côté de ces réseaux « DCE », il existe également d'autres réseaux au niveau local pour répondre à des objectifs spécifiques, comme par

exemple identifier des variations saisonnières de qualité ou détecter des pollutions accidentelles potentielles. Pour ce dernier objectif, nous pouvons citer le Plan d'alerte et d'alarme du Rhin, qui est un réseau de surveillance transfrontalier le long du Rhin, dont l'objectif est de détecter des pollutions accidentelles afin d'agir le plus rapidement possible pour stopper le dommage généré.

La conception des réseaux de surveillance de la qualité de l'eau relève de problématiques spatiales et temporelles. La problématique spatiale concerne le nombre et la localisation des stations de surveillance, tandis que la problématique temporelle se focalise sur la question de la fréquence de la mesure. Toute une littérature s'est intéressée à l'optimisation de la structure des réseaux. L'objectif de ces articles est de trouver la structure qui minimise l'incertitude sur l'estimation de la qualité. Pour Liu *et al.* [2014] et Alvarez-Vazquez *et al.* [2006], l'optimisation respectivement de la fréquence et de la localisation des stations de surveillance permet de minimiser l'écart à la pollution moyenne. Le réseau a un objectif de représentativité de la qualité des milieux. Pour Telci *et al.* [2009], la localisation des stations est optimale si elle permet de minimiser le temps de détection de pollutions accidentelles potentielles. Pour Park *et al.* [2006], le réseau a différents objectifs: la représentativité des bassins versant, la conformité à des normes de qualité, la surveillance propre à certains usages de l'eau, la surveillance de certaines sources de pollution, l'identification d'une modification du niveau de pollution. Ils utilisent la méthode de l'algorithme génétique pour déterminer la localisation des stations qui répond à leur problème multicritères.

D'autres études se sont intéressées à la valeur économique de l'information (VEI) générée par les réseaux de surveillance. Cette VEI est le bénéfice généré par une information additionnelle pour réduire l'incertitude sur la connaissance des états de la nature dans un contexte de prise de décision spécifique. Pour Bouma *et al.* [2009], l'information additionnelle est l'utilisation de l'observation par satellite pour gérer la qualité de l'eau dans la mer du Nord. Cette information a pour but de mieux orienter les politiques pour réduire l'eutrophisation. Pour Bouma *et al.* [2011], l'observation par satellite doit permettre de savoir si l'impact de la pollution responsable de la dégradation de la grande barrière de corail par ruissellement est homogène ou hétérogène, afin de choisir entre des politiques générales, sur l'ensemble des bassins versants en amont, ou plus ciblées sur les bassins versants les plus nocifs. Destandau et Diop [2016] ont une approche plus théorique. Ils étudient l'impact des différents paramètres : probabilités *a priori* sur les états de la nature, coûts liés à une mauvaise décision, précision de l'information additionnelle, sur la VEI.

Ainsi, deux grands types de littérature sur les réseaux de surveillance de la qualité de l'eau existent. Dans la première catégorie, les auteurs cherchent à optimiser « physiquement » le réseau en cherchant la localisation et/ou la fréquence de la mesure qui permet de minimiser l'imprécision sur l'estimation de la qualité. Dans la seconde catégorie, les auteurs s'interrogent sur la valeur économique de l'information d'un réseau prédéfini.

Dans cet article, nous combinons pour la première fois les deux types de littérature en utilisant la valeur économique de l'information pour optimiser un réseau de surveillance de la qualité de l'eau, et nous nous interrogeons sur le bénéfice de cette optimisation dite « économique » sur l'optimisation traditionnelle dite « physique » traitée dans le premier type de littérature citée ci-dessus.

La suite de cet article s'articule de la façon suivante : la section 2 présente notre modèle, la section 3 l'optimisation « physique » du réseau, la section 4 l'optimisation « économique » du réseau. Dans la section 5, nous comparons les valeurs de l'information générées par les deux types du réseau, avant de conclure en section 6.

2. Modèle

2.1. Hypothèses de départ

Nous supposons une rivière, représentée par un segment $[0,1]$. La localisation $l = 0$ est la source de la rivière, et la localisation $l = 1$ son exutoire.

Une pollution accidentelle peut être émise en tout point l_x de la rivière avec une même probabilité P , et se diffuser vers l'aval de la rivière¹. Cette équiprobabilité de l'émission de la pollution accidentelle maximise l'incertitude sur sa localisation. Dans ce cas, un dommage environnemental $D_{l_x,1}$ est occasionné. Nous supposons qu'à l'aval de l'exutoire de la rivière, l'eau a un débit, une capacité d'épuration ou une utilisation de l'eau qui rend la pollution non nuisible². Nous supposons ainsi une situation binaire sur la rivière : soit il n'y a pas de pollution et donc pas de dommage, soit il y a une pollution, sans considération de quantité ou de concentration, et il y a un dommage.

Pour prévenir ce risque, un réseau de surveillance de la qualité de l'eau est mis en place sur cette rivière. Si une station de surveillance positionnée en l_y détecte cette pollution (voir figure 1), le décideur met en place une action a au coût C pour stopper le dommage environnemental qui devient D_{l_x,l_y} , économisant ainsi $D_{l_y,1}$. Pour illustrer cette hypothèse, nous pouvons citer l'exemple de la station d'alerte située à Huningue dans le Haut-Rhin. En cas de détection de pollution accidentelle, les canaux qui alimentent les rivières et la nappe souterraine d'Alsace sont fermés. Nous pouvons citer également l'exemple de la pollution par tétrachloroéthylène dans la Saône en 2012, dont la détection avait mené certains puits, pour fabriquer de l'eau potable, à être fermés.

¹ Notre rivière peut aussi être assimilée à un tronçon de rivière qui nécessite une surveillance particulière en raison d'une vulnérabilité élevée à la pollution. Cette vulnérabilité peut être due à des caractéristiques hydrologiques (concentration de pollution élevée en raison d'un faible débit), chimiques (capacité auto épurative limitée) ou économiques selon les usages (population de poissons exceptionnelle, production d'eau potable, zone de baignade,...).

² Nous pouvons, par exemple, supposer que notre rivière se jette dans un fleuve de débit beaucoup plus élevé où l'effet dilution réduirait la concentration du polluant jusqu'à le rendre non nocif. Nous pouvons également supposer que notre tronçon de rivière est associé à une utilisation particulière de l'eau (eau de baignade, eau potable,...) qui nécessite un niveau de qualité supérieur. Ainsi, la même pollution pourrait causer des dommages par rapport à cette utilisation et non l'aval où l'utilisation de l'eau serait moins exigeante en qualité.

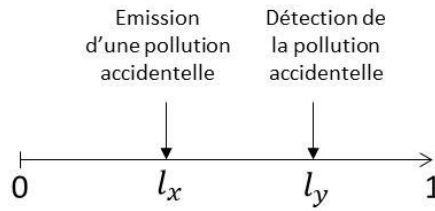


Figure 1. Schématisation de la rivière

Si la pollution accidentelle est détectée à l'exutoire de la rivière, ce sera trop tard pour réagir, il ne sera pas nécessaire de mettre en place l'action. Le dommage environnemental sera $D_{l_x,1}$.

L'objectif de la puissance publique est donc de définir un réseau de surveillance de la qualité qui, conformément à Telci *et al.* [2009], vise uniquement à détecter des pollutions accidentelles potentielles.

Notre modèle est, en outre, statique. Nous n'abordons pas ici la question de la fréquence de la mesure, ou nous supposons la mesure continue. Ainsi, le réseau ne fait pas d'erreur. Si aucune pollution n'est détectée au niveau d'une station ou de l'exutoire, cela signifie qu'aucune pollution n'a été émise. Si une pollution a été détectée au niveau d'une station ou de l'exutoire, cela signifie qu'une pollution a été émise entre la dernière station en amont et le point de détection.

2.2. Scénarios de vulnérabilité

Afin de déterminer le dommage D_{l_x,l_y} , nous supposons trois scénarios.

Dans le premier scénario, nous supposons une vulnérabilité uniforme le long de la rivière. La pollution génère le même dommage quelle que soit sa localisation sur la rivière. Ainsi, le dommage est proportionnel à la distance entre le point d'émission et le point de détection (figure 2). Le dommage marginal, ou vulnérabilité, est donné par la fonction $v^0(l) = \delta$.

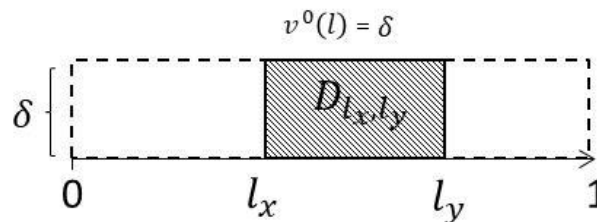


Figure 2. Vulnérabilité uniforme

Dans le second scénario, nous supposons une vulnérabilité décroissante. La pollution génère davantage de dommage en amont (figure 3). La vulnérabilité est donnée par la fonction: $v^-(l) = -2\delta l + 2\delta$.

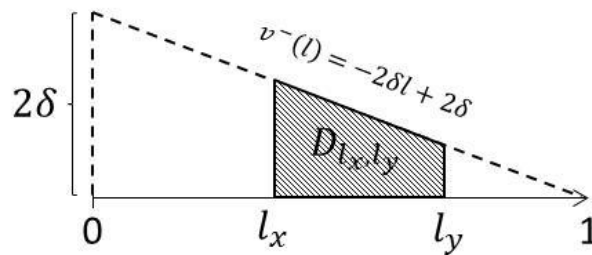


Figure 3. Vulnérabilité décroissante

Dans le troisième scénario, nous supposons une vulnérabilité croissante. La pollution génère davantage de dommage à l'aval (figure 4). La vulnérabilité est donnée par la fonction : $v^+(l) = 2\delta l$.

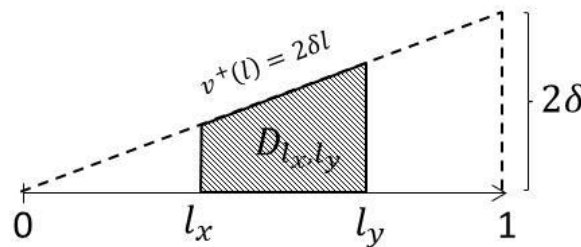


Figure 4. Vulnérabilité croissante

Les formes des fonctions de vulnérabilité ont été choisies de manière à ce que le dommage global (intégral des fonctions) sur l'ensemble de la rivière soit le même pour les trois scénarios, de manière à ce qu'un effet « niveau » de dommage ne vienne pas perturber l'analyse.

Il y a deux types de raisons qui peuvent expliquer la différence de vulnérabilité. La première est d'ordre hydro-chimique avec un lien rejet/concentration (coefficient de transfert) qui peut être hétérogène selon l'endroit avec des débits (et donc une dilution) ou des capacités épuratrices (assimilation) du milieu différents. La seconde est d'ordre économique avec des usages de l'eau qui peuvent être différents selon l'endroit sur la rivière. Ainsi une même pollution ne générera pas le même dommage selon qu'il s'agisse d'une aire de baignade, une aire de captage pour fabriquer de l'eau potable, une zone de pêche,...etc....

2.3. Valeur économique de l'information issue des réseaux

Pour calculer la valeur économique de l'information (VEI) issue des réseaux de surveillance de la qualité de l'eau, nous nous inspirons du modèle bayésien de Destandau et Diop [2016]. Ils construisent un modèle théorique qui considère deux états de la nature: l'un où le milieu est moins sensible à l'eutrophisation \bar{s} , et l'autre où il est plus sensible \underline{s} . Ils associent deux actions possibles, chacune mieux

adaptée à chacun des états de la nature : \bar{a} et \underline{a} . L'utilité se calcule à l'aide du coût des actions et du dommage associé à l'eutrophisation.

En nommant $I(i_{\bar{s}}, i_{\underline{s}}; P(i_{\bar{s}}), P(i_{\underline{s}}))$ la variable aléatoire, qui correspond à l'information additionnelle fournie par le réseau, qui donne les messages i que peut délivrer le réseau sur les états de la nature, et leur probabilité d'occurrence, et $U_{a/s}$ l'utilité de l'action a quand l'état de la nature est s , la VEI s'écrit :

$$VEI = P(i_{\bar{s}}). [P(\bar{s}/i_{\bar{s}}). U_{\bar{a}/\bar{s}} + P(\underline{s}/i_{\bar{s}}). U_{\bar{a}/\underline{s}}] + P(i_{\underline{s}}). [P(\underline{s}/i_{\underline{s}}). U_{\underline{a}/\bar{s}} + P(\bar{s}/i_{\underline{s}}). U_{\underline{a}/\underline{s}}] \quad (1)$$

Si nous considérons K états de la nature et K actions possibles, nous pouvons réécrire la VEI (1) comme suit :

$$VEI = \sum_{k=1}^K P(i_k). \left[\sum_{k'=1}^K P(s_{k'}/i_k). U_{a_k/s_{k'}} \right] \quad (2)$$

avec:

$P(i_k)$: Probabilité que le réseau indique l'état de la nature s_k .

$P(s_{k'}/i_k)$: Probabilité d'être dans l'état de la nature $s_{k'}$ quand le réseau indique i_k .

$U_{a_k/s_{k'}}$: Utilité de l'action a_k (plus appropriée à l'état de la nature s_k) quand l'état de la nature est $s_{k'}$.

Dans notre modèle, il y a donc deux états de la nature : « émission d'une pollution accidentelle » et « pas de pollution accidentelle ». Les deux actions les plus appropriées à ces états de la nature sont l'action a (fermeture de canaux ou de puits de production d'eau potable, interdiction de baignade, de pêche,...), et l'action « ne rien faire ».

Nous cherchons les localisations $\{l_{1/n} \dots l_{y/n} \dots l_{n/n}\}$ de n stations de surveillance pour détecter une éventuelle pollution accidentelle. En cas de pollution, l'utilité $U_{a_k/s_{k'}}$ découlant de l'action a dépendra de la localisation de l'émission et de la détection. Ainsi, pour notre formalisation, nous choisissons de décliner l'état de la nature « présence d'une pollution accidentelle » en plusieurs états de la nature selon la localisation de l'émission. Nous avons, par conséquent, désormais $(n + 2)$ états de la nature :

$$\left\{ s_{[0, l_{1/n}]}, s_{[l_{1/n}, l_{2/n}]}, \dots, s_{[l_{(y-1)/n}, l_{y/n}]}, \dots, s_{[l_{n/n}, 1]}, s_{\emptyset} \right\}$$

Avec $l_{y/n}$ la localisation de la $y^{\text{ème}}$ station sur n stations, l'état de la nature $s_{[l_{(y-1)/n}, l_{y/n}]}$ signifie qu'une pollution accidentelle a été émise entre les stations localisées en $l_{(y-1)/n}$, et $l_{y/n}$. L'état de la nature $s_{[l_{n/n}, 1]}$ signifie qu'une pollution accidentelle a été émise entre la dernière station et l'exutoire, et l'état de la nature s_{\emptyset} qu'aucune pollution n'a été émise.

Notre réseau peut également délivrer $(n + 2)$ messages, selon qu'aucune pollution ne soit détectée, i_\emptyset , qu'une pollution soit détectée sur l'une des n stations ou qu'une pollution soit détectée à l'exutoire, i_1 :

$$\{i_{l_{1/n}}, i_{l_{2/n}}, \dots, i_{l_{y/n}}, \dots, i_1, i_\emptyset\}.$$

Ainsi, dans l'équation (2), $P(s_{k'}/i_k)$ est égale à 0, si $k' \neq k$, et égale à 1 si $k' = k$.

L'utilité est estimée comparativement au *statu quo*, à savoir pour nous, aucune action entreprise. Par conséquent, l'utilité d'entreprendre l'action est le différentiel de dommage environnemental: $D_{l_x,1} - D_{l_x, l_{y/n}} = D_{l_{y/n},1}$ auquel on retranche le coût de l'action C . Si aucune pollution n'est détectée ou si une pollution est détectée à l'exutoire, alors l'utilité est nulle.

Par conséquent, avec n stations de surveillance, nous réécrivons l'équation (2) comme suit:

$$VEI_n = \sum_{y=1}^n P(i_{l_{y/n}}) \cdot [D_{l_{y/n},1} - C] \quad (3)$$

La valeur de l'information correspond au bénéfice généré par le réseau, sans tenir compte des coûts de mesure inhérents au réseau.

3. Optimisation physique du réseau

3.1. Localisation des stations de surveillance

Dans le cas d'une optimisation physique du réseau, la localisation optimale des n stations de surveillance, conformément à Telci *et al.* [2009], consiste à minimiser le temps de détection d'une pollution accidentelle. Dans notre modèle statique, minimiser le temps de détection correspond à minimiser la distance entre le point d'émission et le point de détection. Ainsi, l'objectif est de trouver les stations qui permettent de minimiser la distance de détection d'une pollution accidentelle qui peut être émise en tout point $l_x \in [0,1]$ de façon équiprobable. Cette optimisation « physique » du réseau ne tient pas compte des considérations économiques.

Soit T : le temps ou la distance de détection d'une pollution accidentelle. Le programme d'optimisation peut s'écrire comme suit:

$$\text{Min } T = \sum_{y=1}^{n+1} \int_{l_{(y-1)/n}}^{l_{y/n}} (l_{y/n} - l_x) dl_x \quad \forall n \geq 1 \quad (4)$$

avec $l_{0/n}$ la source de la rivière et $l_{(n+1)/n}$ l'exutoire. Alors $l_{0/n} = 0$, et $l_{(n+1)/n} = 1$.

Avec deux stations de surveillance localisées en $l_{(y-1)/n}$ et $l_{(y+1)/n}$, la localisation optimale de la $y^{\text{ème}}$ station: $l_{y/n}$, est calculée de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Min } T &= \int_{l_{(y-1)/n}}^{l_{y/n}} (l_{y/n} - l_x) dl_x + \int_{l_{y/n}}^{l_{(y+1)/n}} (l_{(y+1)/n} - l_x) dl_x \\ \Leftrightarrow \text{Min } T &= l_{y/n}^2 - l_{(y-1)/n} \cdot l_{y/n} - l_{y/n} \cdot l_{(y+1)/n} + \frac{l_{(y-1)/n}^2}{2} + \frac{l_{(y+1)/n}^2}{2} \\ \Leftrightarrow \frac{\partial T}{\partial l_{y/n}} &= 2l_{y/n} - l_{(y-1)/n} - l_{(y+1)/n} = 0 \\ \Leftrightarrow l_{y/n} &= \frac{l_{(y+1)/n} + l_{(y-1)/n}}{2} \end{aligned}$$

De plus :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial l_{y/n}^2} = 2 > 0$$

Par conséquent, la localisation optimale des stations de surveillance est celle qui divise la rivière en deux parties égales. Nous utilisons, ainsi, la formule (5) ci-dessous pour déterminer la localisation d'une station y parmi les n que compte le réseau.

$$l_{y/n} = \frac{y}{n+1} \quad \forall n \geq 1; 1 \leq y \leq n \quad (5)$$

3.2. VEI pour un réseau physiquement optimisé

Avec une optimisation physique du réseau, les stations de surveillance sont localisées comme défini par l'équation (5). La VEI (3) devient :

$$VEI_n = \sum_{y=1}^n \frac{P}{n+1} \cdot \left[D_{\frac{y}{n+1}, 1} - C \right] \quad (6)$$

Nous pouvons noter que la valeur de l'information du réseau est la somme des valeurs de l'information générées par chaque station.

En intégrant l'hypothèse de vulnérabilité uniforme (voir section 2.2) dans l'équation (6), nous pouvons réécrire la VEI comme suit :

$$\begin{aligned} VEI_n^0 &= \sum_{y=1}^n \frac{P}{n+1} \cdot \left[\left(1 - \frac{y}{n+1} \right) \cdot \delta - C \right] \\ \Leftrightarrow VEI_n^0 &= P \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\delta}{2} - C \right) \end{aligned} \quad (7)$$

En intégrant l'hypothèse de vulnérabilité décroissante (voir section 2.2) dans l'équation (6), nous pouvons réécrire la VEI comme suit:

$$VEI_n^- = \sum_{y=1}^n \frac{P}{n+1} \cdot \left[\int_{\frac{y}{n+1}}^1 -2\delta l + 2\delta dl - C \right]$$

$$\Leftrightarrow VEI_n^- = P \left(\frac{n}{n+1} \right) \left[\delta \left(\frac{2n+1}{6n+6} \right) - C \right] \quad (8)$$

En intégrant l'hypothèse de vulnérabilité croissante (voir section 2.2) dans l'équation (6), nous pouvons réécrire la VEI comme suit :

$$VEI_n^+ = \sum_{y=1}^n \frac{P}{n+1} \cdot \left[\int_{\frac{y}{n+1}}^1 2\delta l dl - C \right]$$

$$\Leftrightarrow VEI_n^+ = P \left(\frac{n}{n+1} \right) \left[\delta \left(\frac{4n+5}{6n+6} \right) - C \right] \quad (9)$$

3.3. Discussion

Dans les trois scénarios, nous notons que la VEI peut avoir une valeur négative si le coût de l'action est excessif, respectivement quand le coût est supérieur à $\frac{\delta}{2}$, $\delta \left(\frac{2n+1}{6n+6} \right)$, et $\delta \left(\frac{4n+5}{6n+6} \right)$. Dans ce cas, il n'est pas préférable de mettre en place l'action puisque le coût est supérieur au dommage évité grâce à celle-ci.

Nous notons, que pour les scénarios de vulnérabilité décroissante et croissante, la condition pour avoir une VEI positive dépend du nombre de stations de surveillance. Pour le scénario de vulnérabilité décroissante, nous notons que la fonction $\left(\frac{2n+1}{6n+6} \right)$ est croissante avec n (voir note de bas de page 3). Par conséquent si la condition est respectée pour $n=1$ elle le sera quelle que soit n . Ainsi la condition $C < \frac{1}{4} \delta$ est suffisante pour avoir une VEI positive.

Dans le scénario de vulnérabilité croissante, nous notons que la fonction $\left(\frac{4n+5}{6n+6} \right)$ est décroissante et converge vers $\left(\frac{2}{3} \right)$ (voir note de bas de page 4). La condition $C < \frac{2}{3} \delta$, obtenue pour n tendant vers l'infini, est donc suffisante pour obtenir une valeur positive pour la VEI.

Quand les conditions de positivité de la VEI sont respectées, nous trouvons, pour les scénarios 1 et 2, que la VEI augmente à taux décroissant avec le nombre de stations. Ce n'est pas le cas pour le troisième scénario (voir Annexe).

³ $\frac{\partial \left(\frac{2n+1}{6n+6} \right)}{\partial n} = \frac{1}{6(n+1)^2} > 0$

⁴ $\frac{\partial \left(\frac{4n+5}{6n+6} \right)}{\partial n} = -\frac{1}{6(n+1)^2} < 0$; $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{4n+5}{6n+6} \right) = \frac{4n}{6n} = \frac{2}{3}$

Ces résultats montrent que l'optimisation physique des réseaux ne permet pas d'optimiser la VEI, ce qui sera l'objectif de la section suivante.

4. Optimisation économique du réseau

4.1. Considérations économiques

Dans la section précédente, nous avons vu que la VEI pouvait être négative selon la valeur du coût C . La raison est que le réseau est optimisé uniquement en tenant compte de considérations physiques, hydrologiques. Ainsi, pour des stations de surveillance localisées très près de l'exutoire, le coût de l'action peut être supérieur au dommage évité.

Afin d'optimiser la VEI, la localisation des stations doit tenir compte de considérations économiques, à savoir le coût de l'action et le dommage environnemental. La localisation de la station $l_{y/n}$ doit, tout d'abord, respecter la condition suivante :

$$\int_{l_{y/n}}^1 v(l) dl > C \quad \forall n \geq 1; 1 \leq y \leq n \quad (10)$$

Si cette condition n'est pas respectée, l'action pour stopper le dommage n'est pas économiquement rationnelle.

La structure du réseau doit aussi prendre en compte la vulnérabilité le long de la rivière. L'objectif du réseau ne doit plus être de minimiser le temps de détection de la pollution, mais le dommage occasionné par cette pollution. Une pollution qui génère moins de dommage peut être détectée plus tard.

Ainsi, l'équation (4) de la Section 2.2 se réécrit comme suit :

$$\text{Min } D = \sum_{y=1}^{n+1} \int_{l_{(y-1)/n}}^{l_{y/n}} D_{l_x, l_{y/n}} dl_x \quad \forall n \geq 1 \quad (11)$$

4.2. Vulnérabilité uniforme

4.2.1. Localisation des stations de surveillance

Avec l'hypothèse : $v^0(l) = \delta$, la condition (10) devient :

$$l_{y/n}^0 < 1 - \frac{C}{\delta} \quad \forall n \geq 1; 1 \leq y \leq n \quad (12)$$

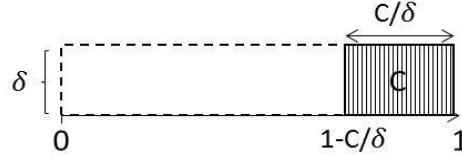


Figure 5. Parties de la rivière où les stations peuvent être localisées (partie blanche) ou non (partie hachurée) dans le scénario 1

Une pollution détectée à la limite gauche de la zone hachurée, en $1-C/\delta$, n'aurait pas d'intérêt puisque le coût de l'action qui serait mise en place serait identique au dommage évité grâce à cette action.

Alors, il n'y a pas de station si :

$$1 - \frac{C}{\delta} < 0 \quad \Leftrightarrow \quad C < \delta \quad (13)$$

Dans le scénario de vulnérabilité uniforme, minimiser le temps de détection ou le dommage revient au même. La démonstration de la section 3.1 reste valide. Ainsi, les stations sont localisées à égale distance dans la partie de la rivière qui respecte la condition (12) et illustrée dans figure 5.

La localisation des stations de surveillance de l'équation (5) devient :

$$l_{y/n}^{*0} = \frac{y}{n+1} \left(1 - \frac{C}{\delta}\right) \quad \forall n \geq 1; 1 \leq y \leq n \quad (14)$$

4.2.2. Valeur économique de l'information

La VEI de l'équation (3) devient :

$$\begin{aligned} VEI_n^{*0} &= \sum_{y=1}^n \frac{P}{n+1} \left(1 - \frac{C}{\delta}\right) \cdot \left[\left(1 - \frac{y}{n+1} \left(1 - \frac{C}{\delta}\right)\right) \cdot \delta - C \right] \\ &\Leftrightarrow VEI_n^{*0} = P \left(\frac{n}{n+1}\right) \left(\delta - 2C + \frac{C^2}{\delta}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

La condition (12) assure que la VEI de l'équation (15) est toujours positive. De plus, elle s'accroît à taux décroissant avec n . En effet :

$$\begin{aligned} \frac{\partial VEI_n^{*0}}{\partial n} &= \frac{P}{(n+1)^2} \left(\delta - 2C + \frac{C^2}{\delta}\right) > 0 \\ \frac{\partial^2 VEI_n^{*0}}{\partial n^2} &= -P \frac{2}{(n+1)^3} \left(\delta - 2C + \frac{C^2}{\delta}\right) < 0 \end{aligned}$$

Ainsi le bénéfice généré par un accroissement du nombre de stations est de plus en plus faible. Cela implique que dans une perspective coût-bénéfice en intégrant le coût de la mesure, ce qui n'est pas l'objet de cet article, accroître indéfiniment le nombre de stations ne serait pas rationnel.

4.3. Vulnérabilité décroissante

4.3.1. Localisation des stations de surveillance

Avec l'hypothèse : $v^-(l) = -2\delta l + 2\delta$, la condition (10) devient :

$$l_{y/n}^- < 1 - \sqrt{\frac{C}{\delta}} \quad \forall n \geq 1; 1 \leq y \leq n \quad (16)$$

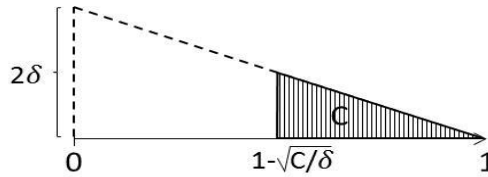


Figure 6. Parties de la rivière où les stations peuvent être localisées (partie blanche) ou non (partie hachurée) dans le scénario 2

Il n'y a donc pas de station si :

$$1 - \sqrt{\frac{C}{\delta}} < 0 \quad \Leftrightarrow \quad C < \delta \quad (17)$$

Pour localiser les stations de surveillance dans la partie de la rivière respectant la condition (16), illustrée par la figure 6, le programme d'optimisation peut s'écrire comme suit :

$$\text{Min } D^- = \sum_{y=1}^{n+1} \int_{l_{(y-1)/n}}^{l_{y/n}} \left[\int_{l_x}^{l_{y/n}} -2\delta l + 2\delta dl \right] dl_x$$

Avec deux stations localisées en $l_{(y-1)/n}$ et $l_{(y+1)/n}$, la localisation optimale $l_{y/n}$ de la $y^{\text{ème}}$ station se calcule ainsi :

$$\text{Min } D^- = \int_{l_{(y-1)/n}}^{l_{y/n}} \left[\int_{l_x}^{l_{y/n}} -2\delta l + 2\delta dl \right] dl_x + \int_{l_{y/n}}^{l_{(y+1)/n}} \left[\int_{l_x}^{l_{(y+1)/n}} -2\delta l + 2\delta dl \right] dl_x$$

$$\frac{\partial D^-}{\partial l_{y/n}} = -3l_{y/n}^2 + (4 + 2l_{(y-1)/n})l_{y/n} - 2l_{(y-1)/n} + l_{(y+1)/n}^2 - 2l_{(y+1)/n} = 0$$

$$\frac{\partial^2 D^-}{\partial l_{y/n}^2} = -6 \cdot \frac{l_y}{n} + 2 \frac{l_{y-1}}{n} + 4 > 0 \quad (18)^5$$

⇔

$$l_{y/n}^{*-} = \frac{1}{3} \left[2 + l_{(y-1)/n}^{*-} - \sqrt{l_{(y-1)/n}^{*-2} - 2l_{(y-1)/n}^{*-} + 3l_{(y+1)/n}^{*-2} - 6l_{(y+1)/n}^{*-} + 4} \right],$$

$$\forall n \geq 1; 1 \leq y \leq n \quad (19)$$

4.3.2. Valeur économique de l'information

La VEI de l'équation (3) devient :

$$VEI_n^{*-} = \sum_{y=1}^n P(i_{l_{y/n}^{*-}}) \cdot [D_{l_{y/n}^{*-},1}^- - C]$$

⇔

$$VEI_n^{*-} = P \sum_{y=1}^n (l_{y/n}^{*-} - l_{(y-1)/n}^{*-}) \cdot [\delta + \delta l_{y/n}^{*-2} - 2\delta l_{y/n}^{*-} - C] \quad (20)$$

Avec la localisation des stations de surveillance calculée par l'équation (19).

4.4. Vulnérabilité croissante

4.4.1. Localisation des stations de surveillance

Avec l'hypothèse: $v^+(l) = 2\delta l$, la condition (10) devient :

$$l_{y/n}^+ < \sqrt{1 - \frac{C}{\delta}} \quad \forall n \geq 1; 1 \leq y \leq n \quad (21)$$

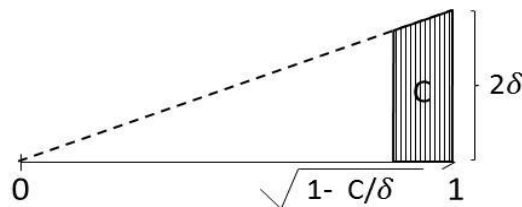


Figure 7. Parties de la rivière où les stations peuvent être localisées (partie blanche) ou non (partie hachurée) dans le scénario 3

⁵ Cette condition devra être vérifiée dans le cas d'une vulnérabilité décroissante, pour s'assurer que la localisation des stations minimise le dommage.

Il n'y a donc pas de station si :

$$1 - \frac{C}{\delta} < 0 \Leftrightarrow C < \delta \quad (22)$$

Pour localiser les stations de surveillance dans la partie de la rivière respectant la condition (21), illustrée par la figure 7, le programme d'optimisation s'écrit :

$$\text{Min } D^+ = \sum_{y=1}^{n+1} \int_{l_{(y-1)/n}}^{l_{y/n}} \left[\int_{l_x}^{l_{y/n}} 2\delta l \, dl \right] dl_x$$

Avec deux stations localisées en $l_{(y-1)/n}$ et $l_{(y+1)/n}$, la localisation optimale $l_{y/n}$ de la $y^{\text{ème}}$ station de surveillance se calcule comme suit :

$$\text{Min } D^+ = \int_{l_{(y-1)/n}}^{l_{y/n}} \left[\int_{l_x}^{l_{y/n}} 2\delta l \, dl \right] dl_x + \int_{l_{y/n}}^{l_{(y+1)/n}} \left[\int_{l_x}^{l_{(y+1)/n}} 2\delta l \, dl \right] dl_x$$

$$\frac{\partial D^+}{\partial l_{y/n}} = 3l_{y/n}^2 - 2l_{y/n}l_{(y-1)/n} - l_{(y+1)/n}^2 = 0$$

$$\frac{\partial^2 D^+}{\partial l_{y/n}^2} = 6.l_{y/n} - 2l_{(y-1)/n} > 0$$

\Leftrightarrow

$$l_{y/n}^{*+} = \frac{1}{3} \left[l_{(y-1)/n}^{*+} + \sqrt{l_{(y-1)/n}^{*+2} + 3l_{(y+1)/n}^{*+2}} \right] \quad \forall n \geq 1 ; 1 \leq y \leq n \quad (23)$$

4.4.2. Valeur économique de l'information

La VEI de l'équation (3) devient :

$$\text{VEI}_n^{*+} = \sum_{y=1}^n P(i_{l_{y/n}^{*+}}) \cdot [D_{l_{y/n}^{*+}}^+ - C]$$

\Leftrightarrow

$$\text{VEI}_n^{*+} = P \sum_{y=1}^n (l_{y/n}^{*+} - l_{(y-1)/n}^{*+}) \cdot [\delta - \delta l_{y/n}^{*+2} - C] \quad (24)$$

avec la localisation des stations de surveillance calculée par l'équation (23).

5. Réseaux physiquement vs économiquement optimisés

Nous comparons maintenant la valeur de l'information d'un réseau physiquement optimisé (Section 3), et d'un réseau économiquement optimisé (Section 4).

Nous résoudrons le ratio des deux VEI algébriquement uniquement pour le scénario 1, cas d'une vulnérabilité uniforme. Pour les trois scénarios, nous observerons la différence entre les VEI par une simulation, avec les valeurs de paramètre choisies arbitrairement suivantes :

$$P = 10\% ; \delta = 10 ; C = 2 \quad (25)$$

Les valeurs choisies (25) permettent le respect des conditions de positivité de toutes les VEI.

5.1. Vulnérabilité uniforme

Pour l'optimisation économique, les localisations des stations de surveillance sont calculées par l'équation (14). Les résultats obtenus avec les valeurs (25) sont représentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Localisations économiquement optimisées des stations pour le scénario 1

n	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	0,400				
2	0,267	0,533			
3	0,200	0,400	0,600		
4	0,160	0,320	0,480	0,640	
5	0,133	0,267	0,400	0,533	0,667

Nous déduisons de (7) et (15) :

$$\frac{VEI_n^{*0}}{VEI_n^0} = \frac{P \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\delta - 2C + \frac{C^2}{\delta} \right)}{P \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\delta}{2} - C \right)} = \frac{\left(\delta - 2C + \frac{C^2}{\delta} \right)}{\left(\frac{\delta}{2} - C \right)} = \frac{(\delta - C)^2}{\delta \left(\frac{\delta}{2} - C \right)}$$

avec $C < \frac{\delta}{2}$.

Nous notons que le ratio des VEI des réseaux économiquement et physiquement optimisés ne dépend pas du nombre de stations.

Le ratio décroît avec le dommage δ et croît avec le coût C . En effet, avec la condition (12) nous trouvons :

$$\frac{\partial \left(\frac{VEI_n^{*0}}{VEI_n^0} \right)}{\partial \delta} = \frac{C^3 - \delta C^2}{\left(\frac{\delta^2}{C} - \delta C \right)} < 0$$

$$\frac{\partial \left(\frac{VEI_n^{*0}}{VEI_n^0} \right)}{\partial C} = \frac{C \delta^2 - \delta C^2}{\left(\frac{\delta^2}{C^2} - \delta C \right)} > 0$$

Avec les valeurs des paramètres (25), nous trouvons que l'optimisation économique peut multiplier la valeur de l'information par 2.133. Le tableau 2 et la figure 8 indiquent la VEI d'un réseau physiquement et économiquement optimisés en fonction du nombre de stations.

Tableau 2. Différence entre les deux VEI pour le scénario 1

N	VEI	VEI*	VEI*/VEI
0	0	0	-
1	0,150	0,320	2,1333
2	0,200	0,427	2,1333
3	0,225	0,480	2,1333
4	0,240	0,512	2,1333
5	0,250	0,533	2,1333

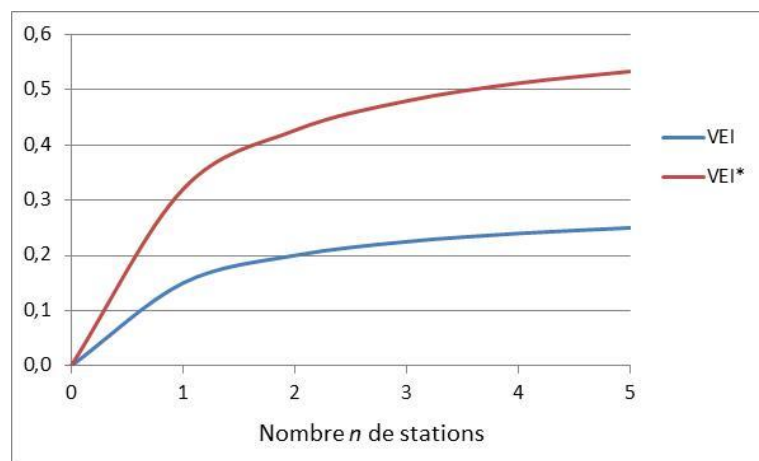


Figure 8. Valeur économique de l'information d'un réseau physiquement (VEI) vs économiquement (VEI*) optimisés pour le scénario 1

La figure 8 illustre qu'en valeur absolue, plus le nombre de stations est élevé plus la localisation a besoin d'être choisie de façon rationnelle en tenant compte des considérations économiques.

5.2. Vulnérabilité décroissante

L'équation (19) et les valeurs des paramètres (25) nous donnent les localisations économiquement optimisées des stations représentées dans le tableau 3. La condition (16) est respectée.

Tableau 3. Localisations économiquement optimisées des stations pour le scénario 2

N	L₁	L₂	L₃	L₄	L₅
1	0,245				
2	0,160	0,339			
3	0,119	0,247	0,389		
4	0,095	0,195	0,303	0,420	
5	0,079	0,161	0,248	0,341	0,441

En comparant les tableaux 1 et 3, nous notons qu'avec une vulnérabilité décroissante, les stations sont localisées logiquement plus en amont.

Les résultats (8) et (20), ainsi que les valeurs des paramètres (25), nous permettent de comparer les VEI pour le scénario 2. Les résultats sont représentés dans le tableau 4 et la figure 9.

Tableau 4. Différence entre les deux VEI pour le scénario 2

N	VEI	VEI*	VEI*/VEI
0	0	0	-
1	0,025	0,091	3,6262
2	0,052	0,123	2,3780
3	0,069	0,140	2,0386
4	0,080	0,150	1,8805
5	0,088	0,157	1,7890

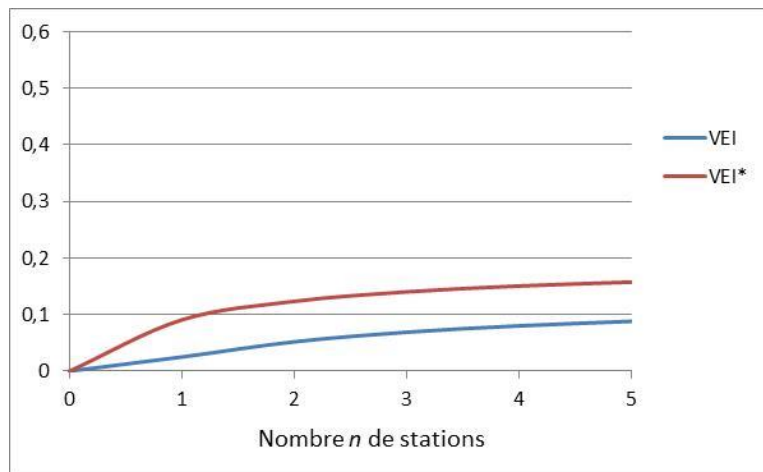


Figure 9. Valeur économique de l'information d'un réseau physiquement (VEI) vs économiquement (VEI*) optimisés pour le scénario 2

En comparant les figures 8 et 9, nous notons que la valeur économique de l'information est plus faible lorsque la vulnérabilité du milieu est décroissante. En valeur absolue, la perte de VEI relative à une localisation optimisée physiquement est moins importante que dans le cas du scénario 1. En terme relatif, la perte reste élevée mais décroît avec le nombre de stations.

5.3. Vulnérabilité croissante

L'équation (23) et les valeurs des paramètres (25) nous donnent les localisations optimisées économiquement des stations de surveillance indiquées dans le tableau 5.

Tableau 5. Localisations économiquement optimisées des stations pour le scénario 3

n	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	0,516				
2	0,380	0,658			
3	0,308	0,533	0,724		
4	0,262	0,453	0,616	0,761	
5	0,230	0,398	0,540	0,668	0,785

Lorsque la vulnérabilité est croissante, les stations de surveillance sont logiquement localisées plus à l'aval que pour les deux premiers scénarios.

Les résultats (9) et (24), ainsi que les valeurs des paramètres (25), nous permettent de comparer les VEI pour le scénario 3. Les résultats sont représentés dans le tableau 6 et la figure 10.

Tableau 6. Différence entre les deux VEI pour le scénario 3

n	VEI	VEI*	VEI*/VEI
0	0	0	-
1	0,275	0,275	1,001
2	0,348	0,351	1,009
3	0,381	0,386	1,012
4	0,400	0,406	1,014
5	0,412	0,419	1,016

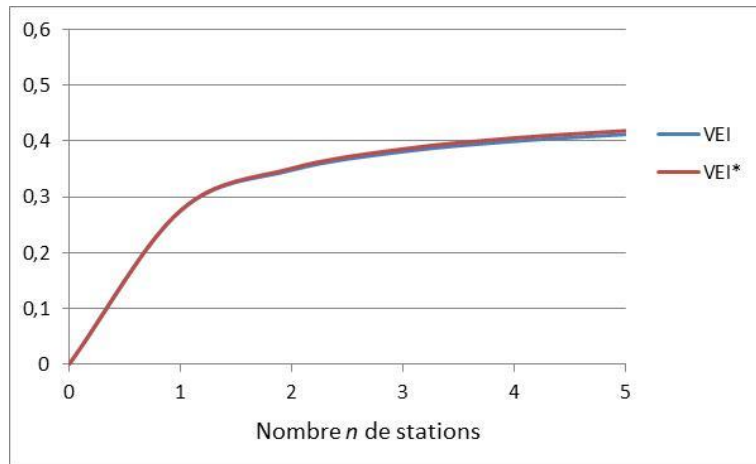


Figure 10. Valeur économique de l'information d'un réseau physiquement (VEI) vs économiquement (VEI*) optimisés pour le scénario 3

Nous concluons qu'avec une vulnérabilité croissante, la prise en compte de considérations économiques pour localiser les stations de surveillance a peu d'impact sur la valeur de l'information. Une optimisation physique de la localisation des stations peut donc se justifier, dans le cas où l'optimisation économique serait plus coûteuse à mettre en place.

En observant les tableaux 2, 4, et 6, nous notons que les rapports entre les valeurs de l'information économiquement et physiquement optimisées sont constants, décroissant et croissant, respectivement pour les scénarios de vulnérabilité uniforme, décroissante et croissante. L'écart entre les VEI physiquement et économiquement optimisées dépend des différences de localisation des stations de mesure. La première différence de localisation vient du fait que pour l'optimisation économique une zone à l'aval sera exclue (condition (10)), la seconde est que pour une vulnérabilité décroissante les stations seront plus en amont et pour la vulnérabilité croissante plus à l'aval. Ainsi, pour la vulnérabilité décroissante, lorsque le nombre de stations augmente, les stations étant préférentiellement localisées en amont, la contrainte d'exclusion à l'aval pèse de moins en moins, d'où un rapport des VEI décroissant. Inversement, pour la vulnérabilité croissante, les stations étant positionnées de façon préférentielle à l'aval, la contrainte d'exclusion à l'aval pèse de plus en plus, d'où un rapport des VEI croissant. Pour le scénario de vulnérabilité uniforme, la contrainte d'exclusion à l'aval joue de la même façon quel que soit le nombre de stations, avec des stations qui seront positionnées à égale distance.

La comparaison de ces mêmes tableaux 2, 4 et 6, nous informe que la valeur de l'information économiquement optimisée est plus élevée dans le cas du scénario de vulnérabilité uniforme, et plus faible dans le cas du scénario de vulnérabilité décroissante. Comme l'explique Destandau et Diop (2016), une valeur de l'information élevée exprime une plus grande incertitude, ce que l'on retrouve dans le cas d'une vulnérabilité uniforme où le concepteur/gestionnaire du réseau n'a aucune information sur l'endroit où il serait préférable de positionner les stations. Nous pouvons également ajouter que la condition d'exclusion à l'aval (10) aura une incidence différente selon le scénario dans notre simulation. En effet, elle impliquera un positionnement des stations en $[0 ; 0,80]$, $[0 ; 0,55]$, et $[0 ; 0,89]$ respectivement pour les scénarios de vulnérabilité uniforme (condition (12)), décroissante (condition

(16)) et croissante (condition (21)). Ainsi, pour le scénario de vulnérabilité décroissante, l'incertitude sur le positionnement des stations est beaucoup moins élevée en raison de la zone de non-exclusion plus étroite, d'où la valeur de l'information plus faible.

6. Conclusion

Apporter de meilleures réponses aux défis environnementaux, c'est tout d'abord mieux informer le décideur public. Dans le cas de la pollution des milieux aquatiques, l'information sur la qualité est donnée par des réseaux de surveillance dont la conception nécessite de faire des choix en termes de localisation des stations de mesure notamment. Ces choix des concepteurs/gestionnaires de réseau pourront ainsi impacter significativement les politiques environnementales qui en découleront.

Dans cet article, nous combinons les deux types de littérature sur les réseaux de surveillance de la qualité de l'eau. Dans le premier type de littérature, les auteurs cherchent à optimiser « physiquement » les réseaux, tandis que dans le second type, les auteurs estiment la valeur économique de l'information générée par un réseau prédéfini. Dans cet article, nous cherchons à optimiser les réseaux en maximisant la valeur économique de l'information, ce que nous nommons l'optimisation « économique ». Ce travail n'avait jamais été fait auparavant. En s'appuyant sur trois scénarios de vulnérabilité des milieux aquatiques, nous étudions le bénéfice d'une telle optimisation « économique » par rapport à une optimisation « physique » traditionnelle.

Pour cela, nous supposons un réseau de surveillance ayant pour seul objectif la détection de pollutions accidentelles potentielles sur une rivière. La conception du réseau consiste à déterminer la localisation optimale des stations de surveillance le long de cette rivière. Nous développons un modèle théorique pour comparer la valeur économique de l'information d'un réseau physiquement optimisé, avec uniquement des considérations hydrologiques, et d'un réseau dont les localisations des stations ont été choisies pour maximiser cette valeur économique de l'information.

Nos résultats montrent que l'avantage d'optimiser la valeur économique de l'information comparativement à une optimisation physique des réseaux est relatif au contexte, à savoir le nombre de stations et le scénario de vulnérabilité. Ainsi, en fonction du coût additionnel d'un réseau économiquement optimisé, l'optimisation physique pourrait être recommandée.

Notre modèle couple une problématique de localisation de stations de mesure et un modèle bayésien pour déterminer la valeur de l'information dans un contexte de décision. Ainsi, deux conditions doivent être remplies pour que notre modèle puisse être utilisé et présente un intérêt. Tout d'abord, il faut que l'information récoltée serve à une décision de court/moyen terme. Pour un réseau de surveillance visant à observer l'évolution de la qualité sur le long terme à titre juste « informatif », la valeur de l'information ne pourra être calculée avec notre méthode. De plus, si l'objectif de la mesure est de détecter une pollution accidentelle au niveau d'une source précise, il faudra positionner la station à l'aval immédiat de cette source, il n'y aura pas de problématique de localisation. Ce qui semble apparaître comme une limite à notre

démarche, révèle aussi le fait que notre réflexion peut s'appliquer à d'autres domaines dès lors que la structure d'une information impacte des décisions.

Dans cet article, la conception du réseau n'est vue que dans sa dimension spatiale, à savoir la détermination du nombre de stations de surveillance et leur localisation. Cette hypothèse nous amène à supposer qu'il ne peut y avoir d'erreur dans la détection. S'il existe une pollution au niveau de la station de surveillance, elle sera détectée. La dimension temporelle, à savoir la question de la fréquence de la mesure au niveau de chaque station, pourrait être abordée en considérant qu'une pollution accidentelle pourrait ne pas être détectée au niveau des stations avec une probabilité α . Cette probabilité pouvant être réduite en augmentant la fréquence de la mesure. Cette nouvelle hypothèse augmentera l'incertitude sur les états de la nature, puisqu'une pollution émise pourra ne pas être détectée, et une pollution détectée par une station pourra avoir été émise en amont de stations précédentes qui ne l'auront pas détectée. Ceci sera l'objet d'un prochain article.

Annexe

* Vulnérabilité uniforme: Condition de positivité de la VEI: $C < \frac{\delta}{2}$.

Nous trouvons ainsi :

$$\frac{\partial VEI_n^0}{\partial n} = \frac{P}{(n+1)^2} \cdot \left(\frac{\delta}{2} - C \right) > 0$$
$$\frac{\partial^2 VEI_n^0}{\partial n^2} = -\frac{2P}{(n+1)^3} \cdot \left(\frac{\delta}{2} - C \right) < 0$$

* Vulnérabilité décroissante : Condition de positivité de la VEI: $C < \frac{1}{4} \delta$.

Nous trouvons ainsi :

$$\frac{\partial VEI_n^-}{\partial n} = \frac{P}{(n+1)^2} \cdot \left[\delta \left(\frac{3n+1}{6n+6} \right) - C \right] > 0 \text{ (voir note de bas de page}^6\text{)}$$
$$\frac{\partial^2 VEI_n^-}{\partial n^2} = -\frac{2P}{(n+1)^3} \left[\delta \left(\frac{n}{2n+2} \right) - C \right] \leq 0 \text{ (voir note de bas de page}^7\text{)}$$

* Vulnérabilité croissante : Condition de positivité de la VEI: $C < \frac{2}{3} \delta$.

Nous trouvons ainsi :

$$\frac{\partial VEI_n^+}{\partial n} = \frac{P}{(n+1)^2} \cdot \left(\delta \left(\frac{3n+5}{6n+6} \right) - C \right)$$
$$\frac{\partial^2 VEI_n^+}{\partial n^2} = -\frac{2P}{(n+1)^3} \left[\delta \left(\frac{n+2}{2n+2} \right) - C \right]$$

La condition $C < \frac{2}{3} \delta$ n'est pas suffisante pour garantir que la fonction VEI sera croissante avec le nombre de stations. La condition $C < \delta \left(\frac{3n+5}{6n+6} \right)$ (voir note de bas de page ⁸) est nécessaire.

De la même façon, le signe de la dérivée seconde dépendra de la valeur de C comparativement à $\delta \left(\frac{n+2}{2n+2} \right)$ (voir note de bas de page ⁹).

⁶ Pour $n \geq 1$, $\left(\frac{3n+1}{6n+6} \right) > \frac{1}{4}$, alors: $C < \delta \left(\frac{3n+1}{6n+6} \right)$.

⁷ Pour $n \geq 1$, $\left(\frac{n}{2n+2} \right) \geq \frac{1}{4}$, alors: $C \leq \delta \left(\frac{n}{2n+2} \right)$.

⁸ Donc pour $n \geq 1$, $\left(\frac{3n+5}{6n+6} \right) \leq \frac{2}{3}$.

⁹ La condition de positivité de la VEI n'est pas suffisante car $\frac{n+2}{2n+2} < \frac{2}{3}$ quand $n > 2$.

Références bibliographiques

- Alvarez-Vazquez L.J., Martinez A., Vazquez-Mendez M.E., Vilar M.A. [2006], Optimal location of sampling points for river pollution control. *Mathematics and Computers in Simulation*, 71(2), 149-160.
- Bouma J.A., Kuik O., Dekker A.G. [2011], Assessing the value of Earth Observation for managing coral reefs: An example from the Great Barrier Reef. *Science of The Total Environment*, 409(21), 4497-4503.
- Bouma J.A., Van Der Woerd H.J., Kuik O.J. [2009], Assessing the value of information for water quality management in the North Sea. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 1280-1288.
- Corbel P. [2013], Le concept de chaîne de valeur dans l'économie de la connaissance : une réflexion sur ses limites et son potentiel d'évolution, in: Hermel P. and Corbel P. (eds.), *Le management des évolutions organisationnelles et stratégiques*, L'Harmattan, 225-245.
- Destandau F., Diop A.P. [2016], An analyse of the value of additional information provided by water quality measurement network. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(8), 767-776.
- European Commission [2012], Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0672&from=FR>. Accessed 13 Apr 2018.
- Harmancioglu N.B., Fistikoglu O., Ozkul S.D., Singh V.P., Alpaslan M.N. [1999], *Water Quality Monitoring Network Design*, Springer Netherlands, Dordrecht.
- Jeuland M., Hansen K., Doherty H., Eastman L.B., Tchamkina M. [2019], The economic impacts of water information systems: A systematic review. *Water Resources and Economics*, 26.
- Lawrence D.B. [2012], *The Economic Value of Information*, Springer Science & Business Media.
- Liu Y., Zheng B., Wang M., Xu Y., Qin Y. [2014], Optimization of sampling frequency for routine river water quality monitoring. *Science China Chemistry*, 57(5), 772-778.
- Macauley M, Laxminarayan R [2010], Valuing information: methodological frontiers and new applications for realizing social benefits. *Space Policy*, 26, 549-551.
- Park S.Y., Choi J.H., Wang S., Park S.S. [2006], Design of a water quality monitoring network in a large river system using the genetic algorithm. *Ecological Modelling*, 199(3), 289-297.
- Porter [1988], *L'avantage concurrentiel*, InterEditions, Paris.
- Sanders T.G., Ward R.C., Loftis J.C., Steele T.D., Adrian D.D., Yejevich V. [1983], *Design of Networks for Monitoring Water Quality*, Water Resources Publication.
- Stigler G.J. [1961], The Economics of Information, *Journal of Political Economy*, 69(3), 213-225.

Telci I.T., Nam K., Guan J., Aral M.M. [2009], Optimal water quality monitoring network design for river systems, *Journal of Environmental Management*, 90(10), 2987-2998.

Yokota F., Thompson K.M. [2004], Value of Information Analysis in Environmental Health Risk Management Decisions: Past, Present, and Future, *Risk Analysis*, 24(3), 635-650.