

Cartographie multicritère des risques urbains induits par les changements climatiques

Exemple pour le risque de contamination par l'eau potable

Florent Joerin, Salem Chakhar, Christelle Legay, Annie Lebel, Simon Bernard Bikay Bi Baniny, Geneviève Cloutier, Manuel Rodriguez, Martial Labarthe

Centre de recherche en aménagement du territoire, Université Laval, Québec, Canada
Prénom.Nom@crad.ulaval.ca

Remarque préliminaire

Cette contribution est initiée par une collaboration des auteurs autour de la réalisation d'un mémoire d'étude : *Eau et climat... l'enjeu urbain, Localiser le risque pour mieux aménager le territoire*, S. B. Bikay Bi Baniny, D. Dupont, A. Lebel, J. Marcotte, Mai 2011, Essai-Laboratoire d'aménagement et de développement, École supérieure d'aménagement et de développement régional, Faculté d'aménagement, d'architecture et d'arts visuels, Université Laval, Québec, Canada, 77 pages

Introduction

La gestion du risque, le risque climatique au premier chef, passe, comme le souligne Dauphiné (2001), par une stratégie pour maîtriser l'aléa, l'inconnu, ou encore par une tentative de pallier les vulnérabilités, de façon à éviter les catastrophes ou à en limiter les effets. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le GIEC, relie la notion de vulnérabilité à trois composantes interdépendantes : 1) l'exposition des systèmes (organisation, collectivité, gouvernement, etc.) aux effets potentiels des changements climatiques; 2) la réponse de ces systèmes aux variations climatiques ou à d'autres éléments; 3) la capacité des sociétés à adapter ces systèmes aux changements biophysiques et sociaux (GIEC, 2007). Adapter signifiant ici accommoder « des systèmes naturels ou des systèmes humains aux stimuli climatiques réels ou prévus ou à leurs effets, afin d'en atténuer les inconvénients ou d'en exploiter les avantages » (Lemmen et Warren, 2008 : 442).

Afin de favoriser l'adaptation des territoires urbains, la planification publique se présente comme un outil pertinent. Toutefois, dans le contexte des changements climatiques, cette planification est particulièrement complexe étant donné le haut niveau d'incertitude et le peu d'information précise concernant les formes que pourraient prendre leurs effets à l'échelle locale.

Parce qu'elles concentrent les activités et les populations, les villes constituent des milieux particulièrement vulnérables aux changements climatiques. En dépit de ce constat, les institutions publiques sont encore au tout début de la réflexion sur les façons de s'adapter (Blanco et Alberti, 2009). L'identification des risques, la hiérarchisation des priorités et même le portrait des impacts du climat sur les activités, le cadre physique et les individus restent à faire.

Comment choisir l'instrument technique ou politique d'adaptation le plus approprié pour chaque contexte? Doit-on se servir des modèles climatiques, des normes, des mesures fiscales, de l'information?

Généralement, les auteurs s'intéressant à l'adaptation de la ville reconnaissent l'intérêt de travailler de façon intersectorielle et à différentes échelles. Plus particulièrement, il est souligné par un nombre croissant d'auteurs que le partage d'informations et de connaissances entre les experts scientifiques et les praticiens de la ville doit être une priorité (Lemos et Agrawal, 2006; Adger et al., 2003).

Les stratégies de gouvernance auraient ainsi une efficacité renforcée lorsqu'elles prennent appui sur la collaboration de partenaires issus de secteurs variés. Certaines équipes de recherche proposent, par exemple, des modèles intégrés d'évaluation des changements climatiques (Dawson et al., 2007; De Perthuis et al., 2010). Le caractère intégré de ces modèles tient au fait qu'ils combinent différents instruments d'évaluation à différents niveaux ou échelles : des scénarios régionaux et nationaux sont mis en dialogue avec des modèles économétriques, des analyses de coûts-bénéfices, etc. L'association de ces diverses mesures appréhende les interactions potentielles entre les activités socio-économiques à l'échelle urbaine et les transformations du climat.

L'évaluation multicritère du risque que nous présentons s'inscrit dans une approche de planification de l'adaptation aux changements climatiques qui partage cet objectif d'intégration des instruments. Cette approche, qui se raffine au fur et à mesure de sa mise en œuvre, a démarré en 2010 et elle a pour terrain d'étude l'agglomération de Québec, au Canada. La première étape du projet, aujourd'hui terminée, a été consacrée à la formulation d'un diagnostic participatif concernant l'impact des changements climatiques sur le système urbain. La seconde, qui est en cours, vise l'identification de secteurs cibles au sein de l'agglomération. Ces secteurs, de la surface approximative d'un quartier, sont définis comme des cibles parce qu'ils combinent, d'une part, plusieurs risques importants (liés à différents enjeux tels que le transport, l'eau potable ou les îlots de chaleur) et d'autre part, parce qu'ils font l'objet d'une forte dynamique urbaine indiquant respectivement la pertinence et l'opportunité de mettre en œuvre en ces lieux des mesures d'adaptation aux changements climatiques. La troisième étape sera consacrée, quant à elle, à la réalisation d'un processus de design urbain participatif afin de proposer, dans chaque secteur cible, des mesures d'adaptation.

Après un bref état de l'art sur l'utilisation de l'analyse multicritère pour évaluer des niveaux de risque, l'article décrit notre propre méthodologie d'évaluation. Cette proposition méthodologique sera illustrée par l'évaluation des risques liés à l'eau et, plus particulièrement encore, du risque de la contamination de la population par une pollution microbiologique de l'eau potable dans l'agglomération de Québec.

Etat de l'art sur la mesure multicritère du risque

L'objectif de cette section est de présenter quelques travaux récents qui ont opté pour l'utilisation de l'analyse multicritère pour traiter de problèmes de gestion du risque. Remarquons d'emblée que ces travaux n'abordent pas nécessairement les risques dus aux changements climatiques. Leur intérêt ici concerne essentiellement leurs aspects méthodologiques. Remarquons également que les travaux sélectionnés sont ceux dont le risque étudié se caractérise par sa distribution spatiale qui doit être prise en compte de façon explicite. Notons enfin qu'un tableau récapitulatif des caractéristiques des études recensées est donné en fin de section.

Giupponi et al. (1999) s'intéressent au problème de pollution agricole due aux différents systèmes de culture dans la région de Venise en Italie. Deux types de culture (ordinaire et éco-compatible) ont été identifiés (en se basant sur la directive de l'ECAP¹). Ces deux types ont été évalués et comparés en termes de risque de pollution sur les ressources en eau, en prenant en compte quatre facteurs de risque : (i) la pollution sur l'eau potable, (ii) la toxicité pour les mammifères, (iii) la toxicité pour la vie aquatique et (iv) l'eutrophisation. Les cartes obtenues ont ensuite été superposées avec la carte de vulnérabilité de la zone d'étude. Le résultat de l'étude montre l'efficacité de la politique éco-compatible pour la réduction du risque sur les ressources (surfactive et souterraine) en eau.

Torrieri et al. (2002) proposent pour leur part un système d'aide à la décision destiné aux décideurs pour faire face à l'incertitude et au risque en matière de planification urbaine. L'objectif du système

¹ European Common Agricultural Policy.

est d'« anticiper correctement » les événements extraordinaires et d'agir de façon plus efficace. Le système suit une méthodologie en quatre phases : (i) identification des problèmes, (ii) définition des scénarios, (iii) évaluation des scénarios et (iv) analyse de sensibilité. La troisième phase de la méthodologie fait appel à la méthode multicritère NAIADE2 (voir Munda, 1995) pour évaluer les différents scénarios. Cette méthode utilise aussi bien des données exactes que stochastiques ou floues. Dans la quatrième phase, la méthode multicritère Régime (Nijkamp et al., 1991) a été utilisée pour tester la stabilité et la robustesse des résultats obtenus. La méthodologie proposée dans Torrieri et al. (2002) est illustrée via une application dans la région volcanique de Vesuvio près de la ville de Naples en Italie. Notons enfin que le travail de Torrieri et al. (2002) retient tout particulièrement notre attention par le fait que dans ce cas comme dans le nôtre, les événements étudiés sont hautement imprévisibles et les données sont généralement incertaines.

Dans un autre contexte, Mancini et al. (2009) ont travaillé sur l'évaluation du risque engendré par l'extraction du sel dans la ville de Tuzla (Bosnie et Herzégovine) en utilisant un système d'information géographique (SIG). Selon les auteurs, l'activité d'extraction intensive est à l'origine de plusieurs problèmes comme la déformation du terrain, l'apparition des fractures surfaciques et souterraines et la diminution très rapide du niveau d'eau dans la nappe souterraine. Plusieurs cartes représentant les risques relatifs aux facteurs précédents ont été générées. La carte du risque global est obtenue par la combinaison des cartes précédentes afin d'être superposée sur une carte de vulnérabilité. Cette opération est réalisée en appliquant une méthode multicritère simple (Pairwise Comparaison Approach) proposée par Bana E Costa et al. (2003, 2006).

De leur côté, Fattal et al. (2010) abordent le problème de la pollution côtière et maritime par hydrocarbures. Les auteurs remarquent que la plupart des études précédentes sur le sujet focalisent essentiellement sur la vulnérabilité environnementale. Ils proposent alors une approche alternative, qui prend en compte conjointement les facteurs environnemental, social et économique pour évaluer ce qu'ils appellent une vulnérabilité globale. Cette approche est composée de trois étapes : (i) le calcul de la vulnérabilité environnementale, (ii) le calcul de la vulnérabilité socio-économique, et (iii) le calcul de la vulnérabilité globale. Cette dernière est le résultat d'une somme pondérée des indices de vulnérabilité environnementale et socio-économique. L'approche est illustrée à travers une application sur l'île de Noirmoutier dans les côtes atlantiques de la France.

Filho et al. (2010) s'intéressent au problème d'évaluation et de gestion du risque géotechnique et environnemental des oléoducs. L'application concerne un oléoduc allant de Sao Paulo à Brasilia au Brésil et traversant trois municipalités dans le nord-est de l'état de Sao Paulo. Les critères considérés touchent essentiellement l'érosion pluviale, les mouvements de terrain, l'altération des sols et les activités anthropiques. L'approche proposée par Filho et al. (2010) comporte sept étapes. Les indices du risque sont calculés (lors de la cinquième étape) en utilisant une analyse multicritère (les auteurs ne précisent pas quelle méthode a été utilisée) avec pondération numérique des paramètres (Maystre et al., 1994).

S'intéressant à la vulnérabilité de la faune du Danemark en lien avec différents types de polluants, Lahr et al. (2010) ont produit une carte du risque global en combinant, comme Mancini et al. (2009), plusieurs cartes de vulnérabilité relatives aux différentes substances toxiques. Le risque global est évalué pour chaque pixel par une opération de multiplication de différentes valeurs de vulnérabilité partielle. L'analyse multicritère intervient lors de la construction des cartes de vulnérabilité. Notons que les auteurs ne précisent pas qu'elle est la méthode multicritère utilisée. Deux points méritent d'être évoqués dans le papier de Lahr et al. (2010): (i) pour construire leurs modèles, les auteurs ont combiné les informations données par des experts avec celles disponibles dans la littérature spécialisée (cf. De Lange et al., 2009); et (ii) les auteurs ont considéré différentes stratégies pour

² Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environment.

étudier l'effet de la présence de plusieurs polluants simultanément (pas d'effet, concentration des polluants, antagonisme, synergie).

Dans Mercat-Rommens et al. (2010) les auteurs s'intéressent à la gestion post-accidentelle du risque nucléaire dans la région Sud-Est de la France. Ce travail a été effectué dans le cadre du projet PRIME3 dont l'objectif est de cartographier et caractériser l'état de l'environnement d'un territoire contaminé par une pollution radioactive accidentelle. Les auteurs proposent une méthodologie en quatre étapes. La première étape est celle de l'identification des enjeux territoriaux (i). Son objectif est d'analyser et de comprendre les processus géographiques, économiques et sociaux qui conditionnent l'organisation et la gestion du territoire afin d'en identifier les enjeux et les évolutions possibles. La seconde étape est l'identification des critères d'évaluation (ii). Il s'agit d'identifier, pour chacun des enjeux établis dans l'étape précédente, une liste des critères aussi représentatifs que possible. L'évaluation de différents critères est la troisième étape (iii). Il s'agit du calcul ou de la recherche de valeurs pour les différents critères, pour un ou plusieurs scénarios fictifs de rejet accidentel d'un radio-isotope affectant la zone considérée, dans différentes conditions (météorologie, date d'occurrence). Enfin, la quatrième étape est celle de l'évaluation multicritère (iv). Il s'agit de l'application de la méthode de classification multicritère ELECTRE TRI (cf. Figueira et al., 2005) afin d'affecter chaque commune de la zone d'étude à l'une des catégories d'une échelle de « sensibilité radioécologique » croissante.

Cette démarche a été reprise récemment dans Chakhar et al. (2011). Dans cette nouvelle version, la méthode ELECTRE TRI a été remplacée par la méthode DRSA4 proposée par Greco et al. (2001). DRSA se caractérise par le fait (i) qu'elle ne nécessite pas la définition de paramètres de préférence (tels que l'importance relative des critères) comme c'est le cas avec ELECTRE TRI, et (ii) qu'elle modélise les préférences des décideurs sous forme de règles de type « Si... ALORS... », qui sont plus faciles à comprendre.

Une limite des deux travaux précédents réside dans le fait que les auteurs ne tiennent pas compte de manière explicite de la présence de plusieurs décideurs. En fait, dans ces deux travaux, les avis de tous les décideurs ont été soit agrégés de façon informelle par le chef du projet avant de procéder à l'évaluation multicritère (dans Mercat-Rommens et al. 2010), soit simplement ignorés (dans Chakhar et al., 2011). Pour éviter ce problème, Chakhar et Saad (2011) ont étendu la méthode DRSA afin qu'elle puisse s'appliquer au contexte de décision de groupe.

Bien que ne faisant pas directement référence à l'application de l'analyse multicritère, mentionnons aussi le papier de Saidi et al. (2011) concernant la mesure du risque de contamination des nappes phréatiques dans une zone aride à semi-aride en Tunisie. Dans cette étude, les auteurs utilisent un indice, relativement courant dans le domaine, nommé DRASTIC (voir Aller et al., 1987) qui peut être vue comme une somme pondérée de sept paramètres ou critères (ex. type de sol, profondeur de la nappe, pente, etc.). En effet, en pratique, chaque paramètre est représenté sous forme d'une carte et ces cartes sont par la suite superposées, en considérant leur pondération, pour obtenir une carte du risque global.

Enfin, dans Tilio et al. (2011) les auteurs proposent une approche multicritère pour la prévention et l'atténuation des risques sismiques. L'article souligne que les approches existantes se basent sur des stratégies de réduction de la vulnérabilité des constructions. Les auteurs préconisent néanmoins que la prévention du risque prenne en compte non seulement les aspects physiques (constructions et routes), mais également les aspects social, économique et politique. Ils parlent alors d'une

³ Projet de Recherche sur les Indicateurs de la sensibilité radioécologique et les méthodes Multicritères appliqués l'Environnement d'un territoire industriel.

⁴ Dominance-Based Rough Set Approach.

« vulnérabilité » qui englobe tout le système urbain d'une ville. Par la suite, le concept de « résilience d'une ville » est introduit afin de proposer une approche multicritère d'évaluation des villes résilientes et ainsi améliorer la réponse du système urbain aux risques sismiques. L'approche reprend les phases du modèle de décision de Simon (à savoir : intelligence, conception, choix et implémentation), avec une prise en compte explicite de la dimension spatiale lors de la définition des critères et des alternatives. La méthode AHP de Saaty (1980) est utilisée pour la définition des poids et l'agrégation des critères. L'application porte sur la ville Marsicovetere (dans le sud de l'Italie).

Réf.	Type de risque	Méthode multicritère	Utilisation d'un SIG	Plusieurs décideurs	Prise en compte de l'incertitude	Région/Pays
Giupponi et al. (1999)	Pollution agricole	Non précisée	Oui	Non	Non	La région de Venise en Italie
Torrieri et al. (2002)	Risque volcanique	NAIADE, Regime	Non	Oui	Oui	Région volcanique de Vesuvio en Italie
Mancini et al. (2009)	Risque engendré par l'extraction du sel	Pairwise Comparaison Approach	Oui	Non	Non	La ville de Tuzla (Bosnie et Herzégovine)
Fattal et al. (2010)	Pollution côtière et maritime par des hydrocarbures	Somme pondérée	Non	Non	Non	L'île Noirmoutier dans les côtes atlantiques de la France.
Filho et al. (2010)	Risque géotechnique et environnemental des oléoducs	ELECTRE (non précisée)	Oui	Non	Non	Nord-est de l'état de Sao Paulo (Brésil)
Lahr et al. (2010)	vulnérabilité de la faune	Non précisée	Oui mais non discuté	Oui	Non	Danemark
Mercat-Rommens et al. (2010)	Risque nucléaire	ELECTRE TRI	Oui	Implicitement	Non	Sud-Est de France
Chakhar et al. (2011)	Risque nucléaire	DRSA	Oui	Non	Non	Sud-Est de France
Chakhar et Saad (2011)	Risque nucléaire	DRSA pour la décision de groupe	Oui	Oui	Non	Sud-Est de la France
Saidi et al. (2011)	Risque des activités anthropogéniques sur la gestion des nappes phréatiques	DRASTIC (somme pondérée)	Oui	Non	Non	Région de Souassi dans le Sahel Tunisien
Tilio et al. (2011)	Risque sismique	AHP	Oui mais non discuté	Non	Non	Ville de Marsicovetere (sud de l'Italie)

Tableau 1. Caractéristiques des approches discutées

Changements climatiques et risques liés à l'eau

Il est maintenant reconnu que les ressources en eau douce seront particulièrement touchées par les changements climatiques (Bates et al., 2008). À l'échelle mondiale, les changements climatiques prévus se traduiront principalement par une hausse de la température moyenne, une modification du régime des précipitations, de la variabilité saisonnière (température, précipitation) ainsi que de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (ex., fortes pluies, pluies hivernales, sécheresses et tempêtes) (Lemmen et Warren, 2004 ; GIEC, 2007). Ces changements affecteront

directement ou indirectement les systèmes naturel et humain (cadre bâti, économie, etc.) (GIEC, 2007).

Les modifications de la température et des précipitations perturberont les régimes de crues, les débits et les niveaux moyens des lacs et des cours d'eau ainsi que les écoulements souterrains (par la modification du régime de ruissellement, l'augmentation de l'évapotranspiration, etc.) (Bates et al., 2008 ; Ouranos, 2010a).

La réduction des débits et des niveaux des sources d'eau (de surface ou souterraine) affectera plus particulièrement la quantité d'eau disponible à des fins de potabilisation et pourra donc être à l'origine de pénuries d'eau (Environnement Canada, 2004). Les perturbations prévues auront également des effets sur la qualité des sources d'eau. Par exemple, de faibles débits et niveaux d'eau accompagnés d'une hausse de la température favoriseront la concentration de polluants chimiques ainsi que le développement de microorganismes et d'algues dans l'eau (Ouranos, 2004 ; Lemmen et Warren, 2004). Il est aussi à prévoir que de bas niveaux d'eau nécessiteront la réalisation de travaux de dragage afin d'assurer le maintien de la navigation dans les ports. Ces travaux entraîneront une remise en suspension des sédiments marins et par conséquent celle des contaminants chimiques (Lemmen et Warren, 2004). Les épisodes de fortes précipitations devraient accentuer l'érosion des rives et le lessivage des sols (dû au ruissellement des eaux de pluies) entraînant ainsi un apport plus important de contaminants chimiques et microbiologiques (ex., pesticides, fèces d'animaux) dans les eaux de surface et souterraine (Ouranos, 2004 ; Lemmen et Warren 2004). L'augmentation significative du niveau des mers et des océans constituent également une des conséquences prévues (et déjà observée) des changements climatiques. De cette augmentation découlera une remontée des eaux salines dans les eaux douces, laquelle pourra directement affecter les sources d'approvisionnement en eau brute des usines de traitement d'eau potable (UTE) (Meuleman et al., 2007 ; Bates et al., 2008). L'augmentation des températures moyennes et les périodes de canicule seront associées à une augmentation de la demande en eau laquelle engendrera également un stress sur les ressources hydriques.

Assurer un approvisionnement en eau, potable et consommable (sans couleur, ni goût ni odeur sans danger pour la santé humaine et en quantité suffisante) constitue un enjeu majeur pour les municipalités et plus particulièrement encore dans un contexte de changements climatiques (WHO, 2008). En milieu urbain, l'approvisionnement en eau potable se divise en plusieurs étapes telles que le prélèvement de l'eau à la source (en surface ou souterraine) nommée eau brute, le traitement de l'eau brute à des fins de potabilisation et la distribution de l'eau potable à travers le réseau d'aqueduc (Mailhot et Duchesne, 2005). Chacune de ces étapes est susceptible d'être affectée (directement et/ou indirectement) par les impacts des changements climatiques. Par conséquent, la disponibilité (quantité distribuée) et la qualité de l'eau potable en milieu urbain pourraient être compromises (Mailhot et Duchesne, 2005 ; Ouranos, 2010a).

La dégradation ainsi que la grande variabilité de la qualité (microbiologique et physico-chimique) des sources d'eau affecteront notamment la performance des traitements réalisés (Mailhot et Duchesne, 2005 ; Meuleman et al., 2007 ; Ouranos, 2010a). L'ajustement de certaines conditions opérationnelles pour parer à une plus faible qualité de l'eau brute pourrait également affecter la qualité de l'eau potable produite. Par exemple, une augmentation de la dose de désinfectant (afin d'éviter une pollution microbiologique) pourrait entraîner une diminution de la qualité chimique (ex., formation de sous-produits de la désinfection) mais également de la qualité organoleptique (ex., dose de chlore plus importante) de l'eau potable (Delpla et al., 2009 ; Proulx et al., 2010).

Les changements climatiques peuvent aussi affecter la qualité de l'eau lors de sa distribution (c.-à-d., lors de son transport dans le réseau d'aqueduc). Par exemple, une augmentation de la température de l'air influera sur celle de l'eau lors de sa distribution en réseau et pourra ainsi favoriser le développement de microorganismes mais aussi les réactions chimiques (ex., réaction entre le chlore et la matière organique résultant à la formation des sous-produits de la chloration) (Meuleman et al.,

2007 ; Delpla et al., 2009). La distribution de l'eau potable pourra être également perturbée par certaines conséquences d'évènements météorologiques extrêmes telles que le bris ou la destruction d'infrastructures des réseaux d'aqueduc ou encore une pollution microbiologique de ces réseaux par le débordement des réseaux d'eaux usées et/ou pluviales (Lemmen et Warren, 2004).

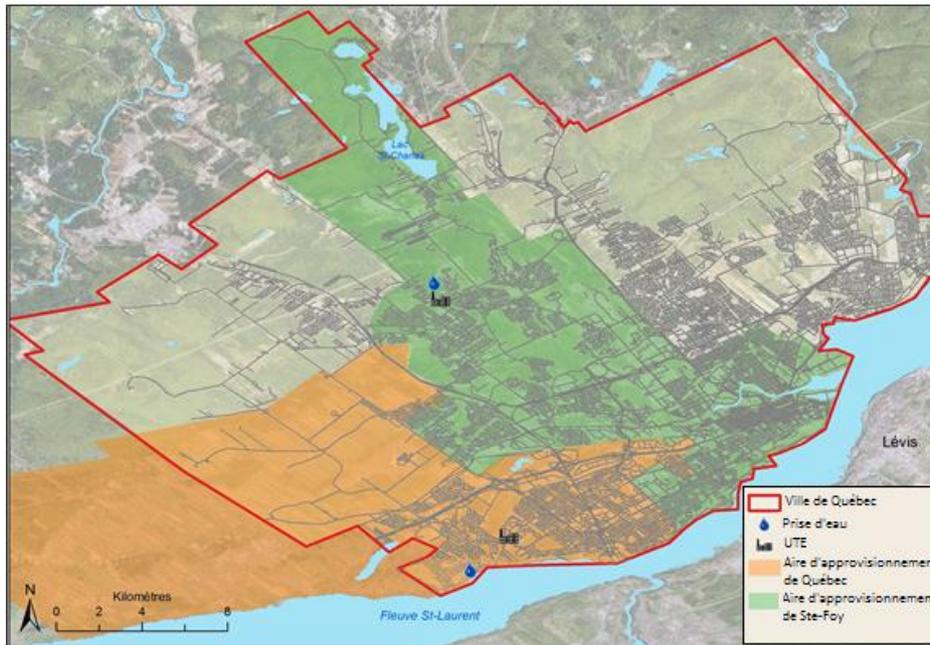
Parmi les changements climatiques, ce sont principalement les évènements extrêmes météorologiques et non les modifications de moyennes qui affecteront le plus l'approvisionnement en eau potable en milieu urbain (Lemmen et Warren, 2004 ; Mailhot et Duchesne, 2005). L'impact de ces évènements dépendra principalement de leur fréquence, durée et intensité. Étant donné qu'il est peu réalisable de prévoir ces évènements, les municipalités doivent déterminer la vulnérabilité de leur approvisionnement en eau potable afin d'anticiper et de s'adapter à ce type d'évènements (Ouranos, 2010b).

En résumé, dans la diversité des risques associés à la consommation d'eau, le plus préoccupant serait celui de la contamination de la population par une pollution microbiologique de l'eau (WHO, 2008), qui résulte principalement d'évènements climatiques et météorologiques (dits extrêmes). C'est pour ces raisons que ce risque de contamination par une pollution microbiologique de l'eau potable lors d'évènements de fortes précipitations (sélectionnés parmi différents évènements météorologiques extrêmes possibles) font l'objet de la présente illustration.

Contexte: quelques mots sur Québec et son système d'eau potable

Le territoire de la ville de Québec (Province de Québec, Canada) comprend un peu moins de 500 000 habitants pour une superficie d'environ 450 km² (Statistique Canada, 2007). La région à l'étude est naturellement (c.-à-d., sans l'influence des changements climatiques) soumise à une importante variabilité climatique durant l'année. La société québécoise est relativement bien adaptée à cette variabilité. Cependant, sa vulnérabilité face aux changements climatiques (principalement pour les évènements extrêmes) n'en est pas amoindrie (Lemmen et Warren, 2008). Les principaux changements climatiques prévus pour la région métropolitaine de Québec sont l'augmentation des précipitations moyennes et des températures moyennes (principalement en hiver) ainsi que la modification de la variabilité de la température (diminution en hiver et augmentation en été). L'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des évènements climatiques extrêmes (ex., fortes précipitations) est également attendue (Ouranos, 2010a).

L'exemple d'évaluation des risques présenté dans cet article concerne plus particulièrement deux aires d'approvisionnement en eau potable de la ville de Québec : celle de Ste-Foy et de Québec (Carte 1). Ces deux aires diffèrent dans la taille (276 000 habitants pour Québec et 106 000 habitants pour Ste-Foy (Ville de Québec, 2010)) et dans les caractéristiques socio-économiques (âge, revenu, etc.) de leur population, lesquelles varient également à l'intérieur de chacune des deux aires.



Carte 1 : Localisation des aires d'approvisionnement en eau potable de Québec et de Ste-Foy (Source : Dominique Dupont, ESAD, Université Laval, 2011)

Ces deux aires sont approvisionnées par des sources d'eau brute différentes. La prise d'eau brute de l'aire de Ste-Foy est localisée au niveau du fleuve St-Laurent (Carte 1). Étant donné la vaste étendue du bassin versant du fleuve St-Laurent, la qualité de l'eau de ce dernier est soumise à une forte pression anthropique (rejets industriels et domestiques, activités agricoles, etc.). L'aire de Québec est quant à elle alimentée par la rivière St-Charles dont le bassin versant est significativement plus petit que celui du fleuve St-Laurent (CMQ, 2010b). Avec plus de 70% de couverture forestière sur le territoire de son bassin versant, la prise d'eau brute de l'aire de Québec subit également une pression anthropique non négligeable (CBRSC, 2007; CMQ, 2010b).

Étant donné que ces deux sources d'eau diffèrent dans le débit, la taille, la qualité ainsi que dans l'échelle et la nature de leur bassin versant, leur vulnérabilité face aux changements climatiques est de différentes nature et intensité. Par exemple, la variabilité plus élevée du débit et du niveau de l'eau de la prise d'eau brute de l'aire de Québec (due à la plus petite taille du bassin versant) entraîne une vulnérabilité plus importante face à des événements extrêmes telles que des sécheresses ou de fortes pluies (Rousseau et al., 2004; CMQ, 2010b). D'autre part, les changements climatiques pourraient entraîner une remontée du front salin au niveau du fleuve St-Laurent pouvant ainsi affecter la prise d'eau brute de Ste-Foy (Ouranos, 2004; Rousseau et al., 2004; CMQ, 2010a).

Chacune des deux aires à l'étude est constituée d'une UTE (usine de traitement de l'eau) dont la quantité d'eau produite est différente (142 000 m³/jour pour Québec et de 60 000 m³/jour pour Ste-Foy (Ville de Québec, 2010). Étant donné que le type de traitements (primaires et secondaires) appliqués à l'eau brute ainsi que leur efficacité varient entre les deux UTE, leur capacité à faire face à une dégradation de la qualité de la source d'eau sera également différente.

Les caractéristiques du réseau d'aqueduc varient également entre les aires de Québec et de Ste-Foy telles que la nature, l'âge et l'état des canalisations, le nombre et la capacité des réservoirs de stockage de l'eau, les conditions de stockage de l'eau et de désinfection dans les réservoirs (ex., temps de séjour de l'eau potable dans les réservoirs, dose de chlore ajoutée). Par conséquent, les effets des changements climatiques sur la qualité de l'eau distribuée peuvent varier entre les deux aires. De plus, les caractéristiques de la distribution (ex., concentration de désinfectant résiduel, état des canalisations) fluctuent au sein même de chacune des deux aires entraînant une variabilité spatiale intra-aire d'approvisionnement de la qualité de l'eau distribuée ainsi que de sa vulnérabilité face à des événements extrêmes.

Méthode d'évaluation du risque de contamination par l'eau potable

La mesure d'un risque nécessite tout d'abord d'adopter une définition de cette notion parmi les nombreuses possibles. Celle que nous privilégions définit le risque comme la combinaison (et non le produit) d'un aléa et d'une vulnérabilité (Adger, 2006). L'aléa mesure la vraisemblance qu'un événement ait lieu et la vulnérabilité mesure la gravité des conséquences de l'événement. Notons d'emblée que le niveau de vraisemblance associé à l'aléa ne résulte pas nécessairement d'un calcul probabiliste mais plutôt, selon notre approche, d'une analyse multicritère. Le résultat visé est une carte de risque (une par type de risque) montrant en quels lieux celui-ci est le plus intense.

Modélisation des dynamiques de risque

Pour les raisons évoquées en introduction, soit essentiellement la grande incertitude autour des effets des changements climatiques sur les milieux, la mesure des niveaux de risque nécessite un très important travail de structuration. Ce travail apparaît même comme l'étape la plus importante du processus d'évaluation.

Dans un premier temps, il s'agit d'identifier les mécanismes générateurs de danger et pour ce faire, nous suggérons de réaliser un modèle systémique des mécanismes de production de risque. Ce modèle respecte une certaine formalisation afin que la description de l'ensemble des risques urbains induits par les changements climatiques partage une structure commune.

Cette structure s'organise autour de trois notions principales : les événements, les conséquences et les composantes territoriales.

Une composante territoriale est simplement un constituant du système territoriale. Il peut s'agir d'infrastructures, de population, de services ou même d'une composante légale tel qu'un règlement ou encore d'un service (de transport par exemple).

Un événement consiste simplement pour nous en une modification (observable) de l'état d'un système. On parlera d'un changement, plutôt que d'un événement, lorsque la durée de la modification est inconnue, très grande ou sans fin.

Un événement sera dit climatique s'il concerne une modification du système climatique, telles qu'une sécheresse, une vague de chaleur ou une pluie intense. De manière similaire, un événement territorial décrit une modification du système territorial. Il peut s'agir par exemple d'une inondation, d'une panne d'électricité, d'un îlot de chaleur, etc. Les systèmes étant composés de sous-systèmes, la nature d'un événement territorial pourrait être précisée (un événement de santé publique, de mobilité, etc.).

Lorsqu'un événement affecte une composante territoriale, on parle alors d'une conséquence qui correspond à la modification durable ou réversible, positive ou négative d'une composante territoriale. Les événements peuvent générer aussi d'autres événements.

La figure 1 présente le schéma systémique décrivant le risque de contamination de la population par une pollution microbiologique de l'eau potable lorsque l'événement climatique est une forte pluie. Ce schéma montre ainsi que l'événement climatique « forte pluie » génère deux événements territoriaux, à savoir un débordement d'eau usée et un ruissellement d'eau de surface qui génèrent eux-mêmes une pollution microbiologique et finalement une contamination. Ces événements territoriaux affectent des composantes territoriales telles que la source d'eau potable (un lac ou un fleuve dans ce cas), le réseau d'approvisionnement de l'eau potable ou la population.

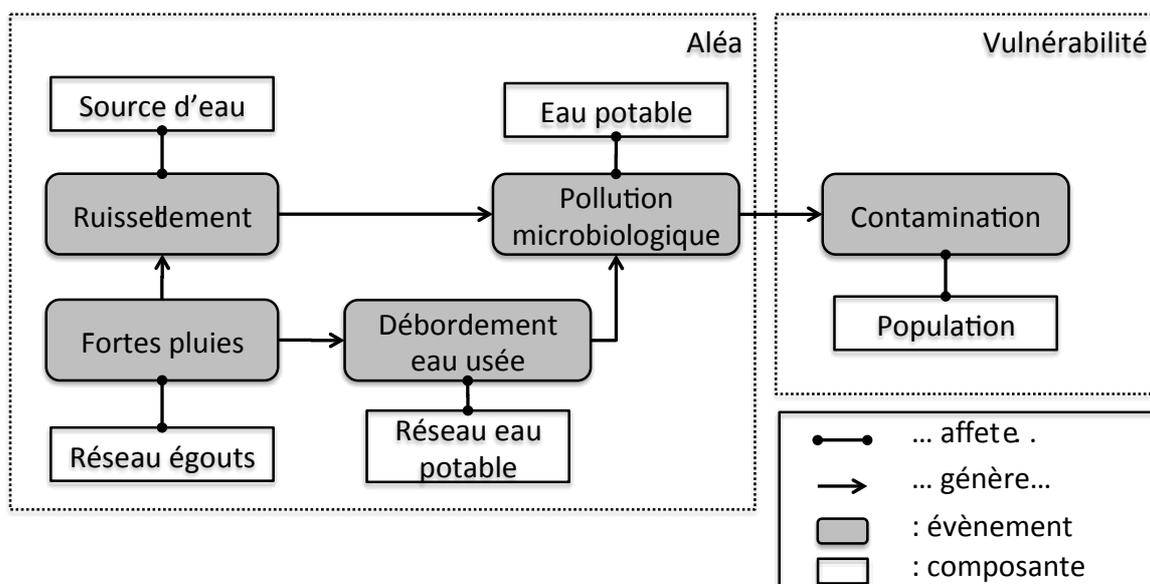


Figure 1 : Modèle systémique causal du risque de contamination de la population par une pollution microbologique de l'eau potable lors de fortes pluies.

On observe aussi sur le schéma de la figure 1 que le système est décomposé en deux parties selon qu'il contribue à l'émergence d'un aléa ou d'une vulnérabilité. Dans ce cas, l'aléa est celui d'une pollution microbologique qui peut prendre deux formes : une pollution de la source et une pollution de l'eau potable par le ruissellement et l'introduction d'eaux usées dans le réseau d'eau potable. La vulnérabilité est ici celle de la population exposée à l'eau potable polluée.

Facteurs de risque

L'étape suivante consiste à identifier des sources d'information concernant les facteurs de risque, ou plus précisément, les facteurs d'aléa et de vulnérabilité.

Il est ainsi apparu que l'aléa est influencé par trois facteurs principaux : la qualité de l'eau potable, la qualité du traitement et la qualité de l'infrastructure. Ces trois facteurs principaux sont sous l'influence de facteurs secondaires. La qualité de l'eau potable est par exemple déterminée par la présence de coliformes fécaux ou le niveau de turbidité. Relevons au passage que ces facteurs secondaires sont mesurés d'une part en considérant les valeurs moyennes et d'autre part, les écarts-type. Les moyennes traduisent la qualité générale de l'eau potable, alors que les écarts-type donnent une indication de sa variabilité.

Qualité de l'eau brute		Qualité du traitement		Qualité de l'infrastructure	
A ₁ : Coliformes fécaux (UFC/ 100 ml)	moyenne	B ₁ : BHAA (UFC / ml) : bactéries hétérotrophes aérobies et anaérobies	moyenne	C ₁ : Âge de l'usine	
A ₂ : Coliformes fécaux (UFC/ 100 ml)	écart-type	B ₂ : Chlore résiduel (mg/l)	moyenne	C ₂ : Âge des réseaux	
A ₃ : Turbidité (UNT)	moyenne	B ₃ : Chlore résiduel (mg/l)	écart-type	C ₃ : Nombre de maisons construites il y a plus de 50 ans	
Turbidité (UNT)	écart-type				
Vulnérabilité					
Indice de défavorisation matérielle et sociale					

Tableau 2 : Facteurs d'aléas et de vulnérabilité

Evaluation multicritère

Une fois l'important travail de structuration réalisé, l'étape d'analyse multicritère peut être entreprise. Fondamentalement, il s'agit alors d'adopter une démarche permettant d'agrèger pas à pas des facteurs d'aléas (secondaires et principaux) et de vulnérabilité, puis ensuite de combiner ces deux composantes dans la mesure du risque.

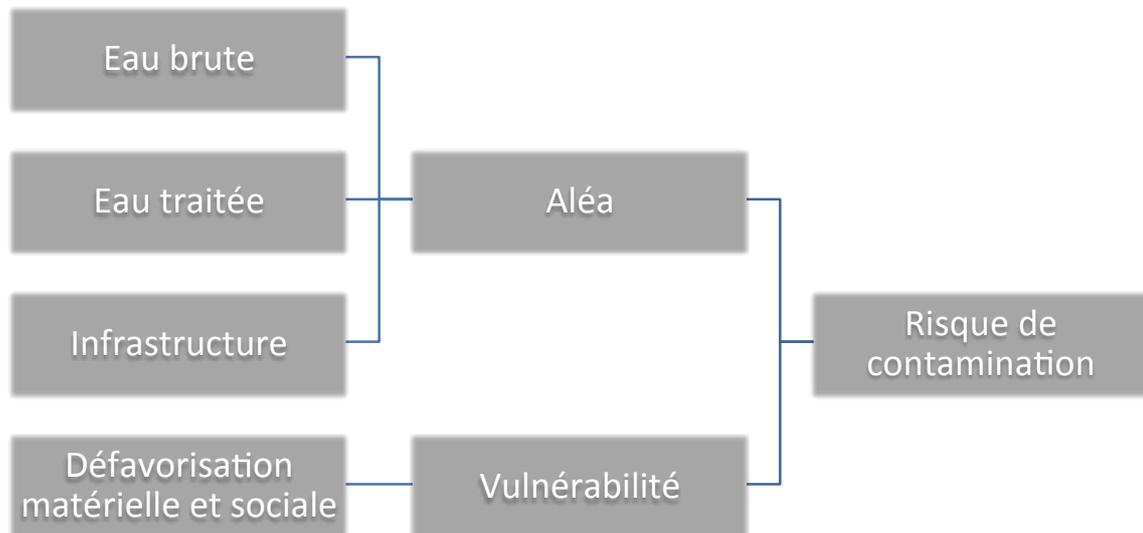


Figure 2 : Structure d'évaluation du risque de contamination de la population par une pollution microbologique de l'eau potable

Pour l'exemple de la contamination microbologique par l'eau potable, la mesure de la vulnérabilité ne nécessite pas l'utilisation d'une procédure d'évaluation multicritère puisqu'elle ne se base que sur un seul indice, celui de la défavorisation matérielle et sociale. Relevons toutefois d'emblée une limite de l'approche puisque cet indice agrège lui-même une multitude de données par l'application d'une analyse par composantes principales, soit un mode d'agrégation statistique qui ne prend pas en compte l'existence d'un point de vue ou de valeurs dans son évaluation, autrement dit, s'inscrivant dans une approche essentiellement différente d'une analyse multicritère. Toutefois, cet indice est devenu très populaire dans les milieux québécois concernés par les questions de santé publique et son interprétation est familière, ce qui constitue un avantage important pour l'appropriation de la méthode proposée.

Comme nous l'avons vu, la mesure du niveau d'aléa doit prendre en compte trois facteurs principaux et dix facteurs secondaires. Pour ce faire, nous avons choisi d'appliquer une moyenne pondérée dite prudente. Cette version de la moyenne pondérée ne corrige pas les défauts connus de cette méthode, concernant notamment l'impossibilité de limiter les mécanismes de compensations. Toutefois, considérant la complexité du processus général, nous avons choisi, pour cette première mise en œuvre, de nous en tenir à cette méthode couramment utilisée par les acteurs territoriaux, (avec plus ou moins de pertinence ceci dit). Dans les versions ultérieures, nous envisageons d'utiliser la méthode DRSA (Greco et al., 2001), Electre TRI (Figueira et al., 2005) ou Macbeth (Bana e Costa et al., 2006). Il se pourrait d'ailleurs que différentes méthodes d'évaluation multicritère soient utilisées selon la nature du risque.

La méthode de la moyenne pondérée prudente se distingue par l'ajout d'une étape de calcul, celle des écarts-équivalents qui permet aux acteurs de considérer l'effet d'ensemble du système de préférence formulé à l'aide d'une pondération et de seuils de satisfaction. Concrètement, on demande tout d'abord aux acteurs de fixer pour chaque critère (ici les facteurs principaux et secondaires) deux seuils de satisfaction, l'une minimale et l'autre complète. Ensuite, ils peuvent, sans

que cela ne soit obligatoire, attribuer un poids à chaque critère. (Nous observons dans la pratique que les acteurs sont toutefois souvent à l'aise dans cet exercice).

Une fois ces paramètres fixés, il s'agit de calculer l'ensemble d'écart-équivalents. Ces grandeurs que l'on peut comprendre comme des taux de change entre critères et qui sont mesurées dans l'échelle d'évaluation du critère permettent de discuter avec l'acteur de la cohérence du système de préférences qu'il a établi. Souvent, l'acteur modifie quelques fois les seuils de satisfaction ou la pondération avant d'obtenir un ensemble d'écart-équivalents qui lui semble cohérent.

Dans le contexte du risque de pollution microbiologique de l'eau potable, trois experts furent consultés. Le tableau 2 présente le système de préférence qui a résulté de ces consultations pour le facteur : qualité de l'eau brute.

	Moyenne coliformes fécaux (UFC/100 ml)	Écart-type Coliformes fécaux (UFC/100 ml)	Moyenne Turbidité (UNT)	Écart-type Turbidité (UNT)
Ecart équivalent 10 %	123	19	10	25
Poids en %	40%	25%	25%	10%
S minimal :				
Alea plausible	175	130	7,23	5,68
S complète :				
Alea non plausible	77	140	2,00	1,35

Tableau 3 : Système de préférence pour l'évaluation du facteur d'aléa : qualité de l'eau brute

Notons que le seuil de satisfaction complète correspond ici à un niveau d'aléa nul, autrement dit, les experts considèrent qu'à partir de cette valeur, les conditions de l'eau potable (sa qualité) sont bonnes ce qui limite l'émergence d'un aléa. Celui-ci devient par contre nettement plus vraisemblable si la valeur s'approche du seuil de satisfaction minimal. Par ailleurs, la lecture des écarts équivalents montre qu'une quantité de plus ou moins 123 UFC dans la moyenne de coliformes fécaux est perçue comme ayant un effet semblable sur l'aléa, que plus ou moins 10 UNT en turbidité moyenne.

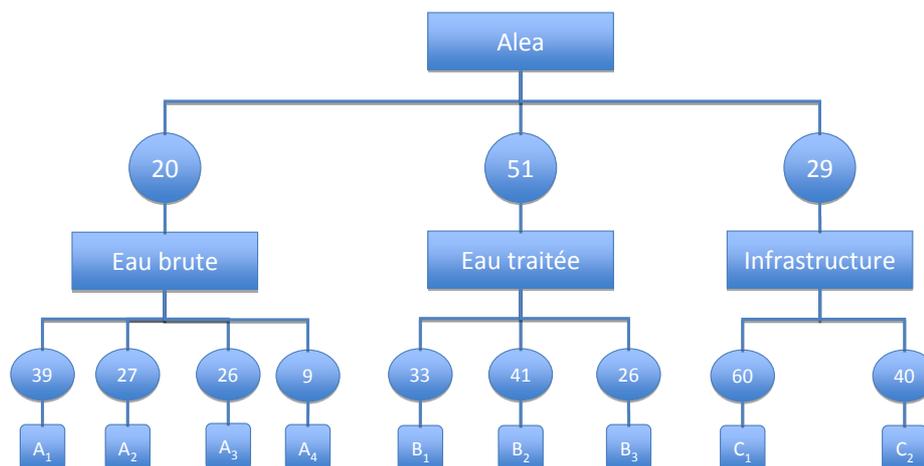


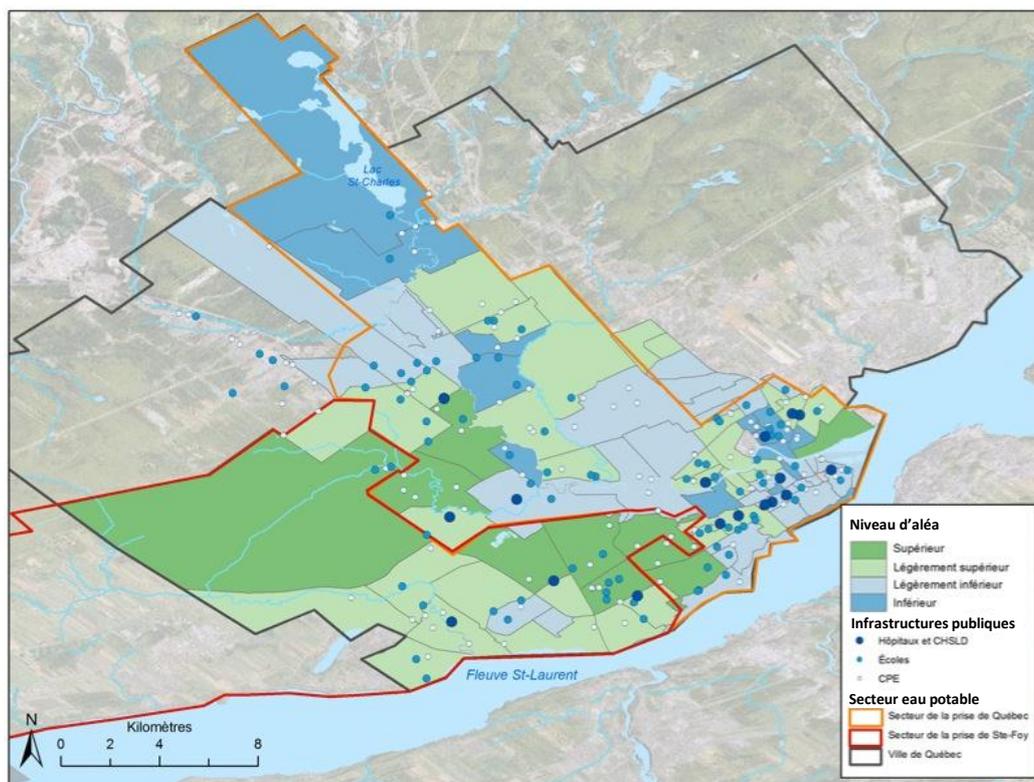
Figure 3 : Hiérarchie et pondération des facteurs et sous-facteurs pour la mesure de l'aléa de pollution microbiologique de l'eau potable

En se basant sur les équations ci-dessous, il est alors possible de calculer des niveaux d'aléa partiel (pour l'eau brute, l'eau traitée et les infrastructures), puis un niveau d'aléa global.

<p>Calcul des écarts-équivalents</p> $E_j = \frac{k(sc_j - sn_j)}{w_j}$	<p>k : constante en %. (ex : $k=10\%$ ou 20%, etc.) E_j : Ecart-équivalent sur le critère j sc_j : seuil de satisfaction complète sur l'indicateur j sn_j : seuil de satisfaction nulle sur l'indicateur j w_j : Poids de l'indicateur j [0 ;1]</p>
<p>Calcul d'une note de satisfaction partielle</p> <p>Si $N_j \leq sn_j$ $s_j = 0$</p> <p>Si $sn_j < N_j < sc_j$ $s_j = \frac{N_j - sn_j}{sc_j - sn_j}$</p> <p>Si $sc_j \leq N_j$ $s_j = 1$</p>	<p>s_j : note de satisfaction du secteur sur l'indicateur j N_j : Note sur l'indicateur j sn_j : seuil de satisfaction nulle sur l'indicateur j sc_j : seuil de satisfaction complète sur l'indicateur j</p>
<p>Calcul d'une note de satisfaction globale</p> $S = \sum_{j=1}^J s_j \cdot w_j$	<p>S : Note de satisfaction globale du secteur w_j : Poids de l'indicateur j [0 ;1]</p>

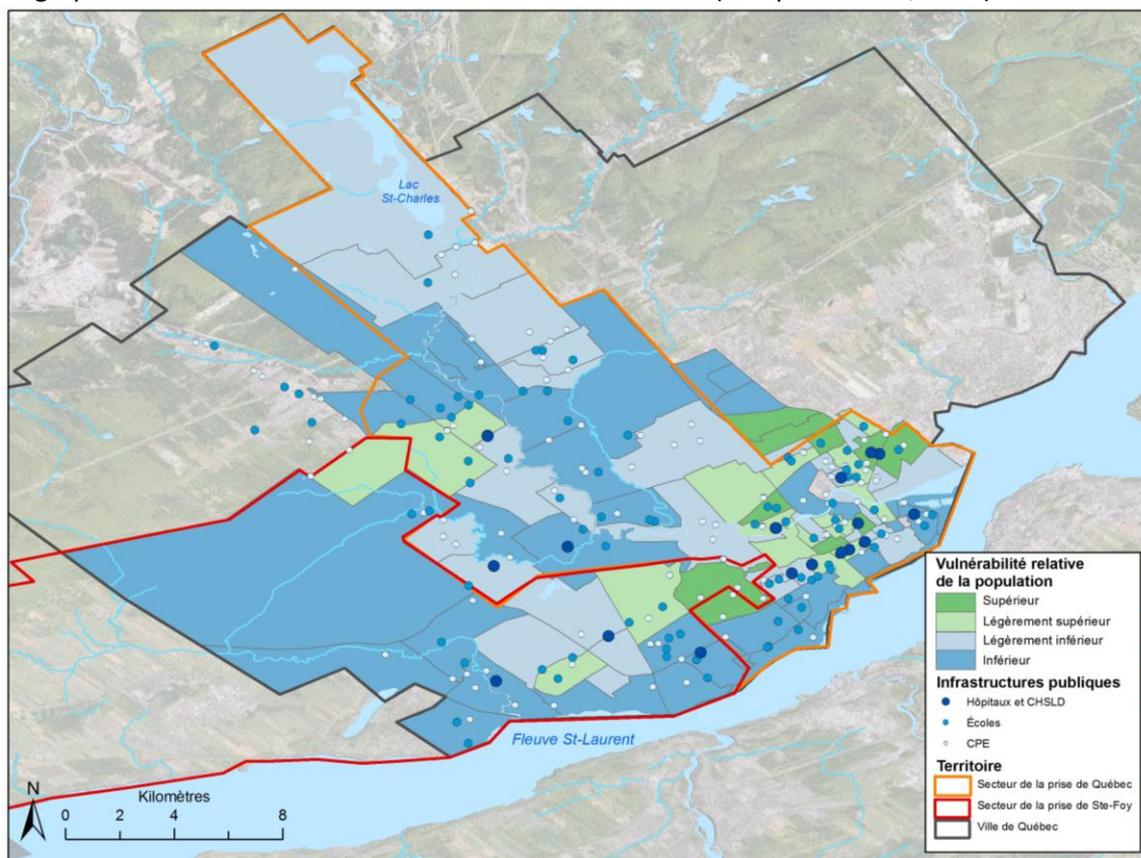
Tableau 4 : Équations utilisées dans le calcul de la moyenne pondérée dite prudente (Joerin, 2011)

La carte 2 présente ainsi le niveau d'aléa obtenu pour chaque secteur de l'agglomération de Québec. L'échelle de la mesure de cet aléa est un pourcentage. Si cette valeur est de 0 % les experts considèrent qu'en cet endroit l'aléa est peu plausible et si elle est de 100 % il est au contraire vu comme plausible. Toutefois ces valeurs sont bien moins importantes que la carte elle-même qui permet de les comparer dans l'espace, c'est pourquoi nous préférons présenter une échelle en quatre classes de supérieur à inférieur.



Carte 2: Scénario 1 (fortes pluies) : Variabilité spatiale de l'aléa de pollution microbiologique. Dominique Dupont / ESAD, Université Laval / Source fond de carte : Google Map 2011.

La carte 3 présente quant à elle les niveaux de vulnérabilités. Elle est directement produite en cartographiant l'indice de défavorisation matérielle et sociale (Pampalon et al., 2010).



Carte 3: Vulnérabilité socio-économique relative de la population à partir de l'indice de Pampalon (2010). Dominique Dupont / ESAD, Université Laval / Source du fond de carte: Google Map 2011.

A ce stade de la recherche, il nous semble que la mise à disposition de ces deux cartes, qui peuvent évidemment se superposer facilement dans un SIG, est suffisante pour aider les experts à apprécier un niveau de risque. Autrement dit, nous renonçons à évaluer ce niveau de risque essentiellement parce qu'il nous semble difficile d'appliquer une logique de compensation entre des dimensions si différentes, la vraisemblance d'un aléa d'une part, la vulnérabilité d'une population d'autre part. Notons que quelques pistes de cartographie seront explorées pour présenter les deux informations sur la même carte et faciliter ainsi leur intégration dans le raisonnement des experts.

Conclusion

La méthode d'évaluation du risque présentée dans cet article est relativement classique de quant à ses étapes : (i) identification des mécanismes de production de risque, (ii) identification de facteurs de risques, (iii) évaluation de l'aléa et de la vulnérabilité. Elle est aussi peu originale quant à la méthode d'évaluation multicritère puisque pour cette première version, il s'agit d'une application prudente de la moyenne pondérée. L'utilisation d'un SIG à différentes étapes, et principalement pour la cartographie des résultats, est moins courante, mais elle n'est pas non plus tout à fait une nouveauté. Ainsi l'originalité de notre recherche se situe plutôt dans l'ampleur de la démarche menée, qui résulte elle-même du contexte, soit celui des changements climatiques : un phénomène d'une ampleur inédite.

En effet, cette illustration d'une approche permettant d'évaluer un niveau de risque induit par les changements climatiques est selon nous assez démonstrative de l'importance du défi scientifique car malgré toutes ses simplifications, l'approche proposée nécessite des ressources considérables en termes de récolte de données et d'expertise. Or, nous nous sommes penchés ici sur l'évaluation d'un

seul risque (la contamination de la population par une pollution microbiologique de l'eau potable), résultant d'un seul évènement climatique (de fortes pluies) alors que la planification de l'adaptation aux changements climatiques nécessite la prise en compte d'une multitude de risques urbains (îlots de chaleur, glissement de terrains, panne des transports, panne d'électricité, etc.) résultant eux-mêmes d'une multitude d'évènements climatiques (sécheresse, vague de chaleur, vents violents, accumulation de neige, etc.).

Chaque type de risque étant susceptible d'interpeller différentes formes d'expertise, une évaluation globale des risques urbains engendrés par les changements climatiques passe, de notre point de vue, par la conception d'un processus global d'évaluation qui précise notamment quels experts interviennent à quelle étape de la démarche d'évaluation. Si l'expertise concernant des risques spécifiques, tel que celui traité ici, est relativement facile à trouver, celle permettant de mettre en relation ces différentes formes de risque afin d'établir des priorités est certainement plus difficile. En effet, quel acteur est en position d'établir une priorité entre un risque de santé publique et celui, par exemple, d'une interruption générale du réseau de transport ?

Selon nous, cette expertise ne pré-existe pas. Face aux changements climatiques, les acteurs territoriaux sont confrontés à l'incertain et l'inattendu et ils ne peuvent ainsi que très peu se référer à leur propre expérience. Par conséquent, le processus que nous menons et qui s'alimente des résultats présentés dans cet article doit aussi engendrer un apprentissage autoformateur pour les acteurs du territoire d'étude. Car, c'est en se confrontant à ces données, ces cartes et les questions qu'elles soulèvent quant aux formes de risques ou aux secteurs à prioriser, que petit à petit les acteurs se placeront en position de faire des choix et ainsi d'orienter la planification de l'adaptation aux changements climatiques.

Références

- Adger, W.N., S., Huq, K., Brown, D., Conway et M., Hulme, 2003, «Adaptation to Climate Change in the Developing World», *Progress in Development Studies*, 3(3): 179-195.
- L. Aller, T. Bennet, J.H. Lehr, R.J. Hacket, 1987, *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. In : US Environmental Protection Agency Report, No EPA/600/2-87-035. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory.
- Antrobus, D., 2010, «The importance of the "not-so-cool" sectors: creative solutions to reconcile environmental and economic sustainability within a floodplain», *Local Environment*, 15: 4, 295 — 308.
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof J.P., éditeurs. 2008, *Le changement climatique et l'eau. Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Secrétariat du GIEC, Genève, 236p.
- C.A Bana E Costa, P.A. Da Silva, F.N. Correia, 2003, *Multicriteria Evaluation of Flood Control Measures: The Case of Ribeira do Livramento*. The London School of Economics and Political Science, London.
- C.A. Bana E Costa, C.S Oliveira, V. Vieira, 2006, "Prioritization of bridges and tunnels in earthquake risk mitigation using multicriteria decision analysis: application to Lisbon", *Omega*, 36 (3), 442-450.
- Blanco, H. et M., Alberti, 2009, «Chapter 2. Building capacity to adapt to climate change through planning», *Progress in Planning*, vol.71, pp.158-169.
- S Chakhar, C Pusceddu, I Saad, 2011, "GIS-Based Rough Set Theory to Nuclear Risk Management". In : *17th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography*, 2-5 Septembre, 2011, Athens, Greece.
- S. Chakhar, I. Saad, 2011, "Dominance-Based Rough Set Approach for Groups in Multicriteria Classification Problems", *Decision Support Systems* (à paraître)
- Conseil de bassin de la rivière Saint-Charles (CBRS). 2007. *Faits saillants du bassin de la rivière Saint-Charles*. 14p.

- Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). 2010a. *Le fleuve Saint-Laurent dans la région métropolitaine de Québec : Survol des grands enjeux*. 24p.
- Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). 2010b. *État de la situation du bassin versant de la prise d'eau de la rivière St-Charles*. http://www.cmquebec.qc.ca/fiche_tech/default.html
- Dauphiné, A., 2001, *Risques et catastrophes*, Paris, Armand Colin.
- Dawson, R.J., Hall, J.W., Barr, S., Batty, M., Bristow, A., Carney, S., Evans, S., Ford, A. Köhler, J., Tight, M. et C.Walsh, 2007, *A blueprint for the integrated assessment of climate change in cities*, Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper, 104 p.
- Delpla I., Jung A-V., Baures E., Clement M., Thomas O. 2009, "Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production", *Environment international* 35, 1225-1233.
- H.J. De Lange, J. Lahr, J.J.C. Van Der Pol, Y. Wessels, J.H. Faber, 2009, "Ecological vulnerability in Wildlife : An Expert judgment and Multicriteria Analysis Tool Using Ecological Traits to Assess Relative Impact Pollutions", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 28(10), pp. 2233-2240.
- De Perthuis, C., S. Hallegatte et F., Le Cocq, 2010, *Économie de l'adaptation au changement climatique*, Conseil économique pour le développement durable, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.
- Environnement Canada, 2004, *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada*. Institut national de recherche scientifique, Burlington, Ontario. Rapport n°3, Séries de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Séries de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, numéro 1. 148p.
- J. Figueira, V. Mousseau, B. Roy, 2005) "ELECTRE methods". In : *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, J. Figueira, S. Greco, M. Ehrgott, editors, pp. 133-162, Springer-Verlag, New York.
- P. Fattal, M. Maanan, I. Tillier, N. Rollo, M. Robin, P. Pottier, 2010, "Coastal Vulnerability to Oil Spill Pollution : the Case of Noirmoutier Island (France)", *Journal of Coastal Research*, 26(5), pp. 879-887.
- O.A. Filho, J.N. Hirai, A.S. Oliveira, E.S. Lioti, 2010, "GIS Applied to Geotechnical and Environmental Risk Management in Brazilian Oil Pipeline", *Bull Eng Geol Environ* 69, pp. 631-641.
- C. Giupponi, B. Eiselt, P.F. Ghetti, 1999, "A Multicriteria Approach for Mapping Risks of Agricultural Pollution for Water Resources : The Venice Lagoon Watershed Case Study", *Journal of Environmental Management*, 56, pp. 259-269.
- S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski, 2001, "Rough sets theory for mul-ticriteria decision analysis", *European Journal of Operational Research*, 129(1):1-47.
- R. Greene, R. Devillers, J.E. Luther, B.G. Eddy, 2011, "GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis", *Geography Compass*, 5/6, pp. 412-432.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation* [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- J. Lahr, B. Munier, H.J. De Lange, J.F. Faber, P.N. Sorensen, 2010, "Wildlife Vulnerability and Risk Maps for Combined Pollutions", *Science of the Total Environment*, 408, pp. 3891-3898.
- Lemmen, D.S. and Warren, F.J., editors, 2004, *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective*; Government of Canada, Ottawa, ON, 174 p.
- Lemmen, D.S. et Warren, F.J. 2008, « Introduction », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada* : édition 2007, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa (ON), 21-26.
- Lemos, M. C. et A. Agrawal, 2006, «Environmental Governance», *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 31, pp. 297-325.
- Mailhot A., Duchesne S. 2005, « Impacts et enjeux liés aux changements climatiques en matière de gestion des eaux en milieu urbain » *Vertigo - La revue en sciences de l'environnement*, Hors série n°1, septembre 2005. 9p.

- F. Mancini, F. Stecchi, G. Gabbianelli, 2009, "GIS-Based assessment of Risk Due to Salt Mining Activities at Tuzla (Bosnia and Herzegovina)", *Engineering Geology*, 109, pp. 170-182.
- L.Y. Maystre, J. Pictet, Smos, 1994, *Méthodes Multicritères ELECTRE*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- C. Mercat-Rommens, S. Chakhar, E. Chojnacki, V. Mousseau, 2010, *Coupling GIS and Multi-criteria Modelling to Support Post-Accident Nuclear Risk Evaluation: An Application in the Southern France Region*, Laboratoire Génie Industriel, Ecole Centrale Paris, Cahiers de recherche CR-LGI-2010-18.
- Meuleman A.F.M., Cirkel G., Zwolsman G.J.J. 2007. "When climate change is a fact! Adaptive strategies for drinking water production in a changing natural environment." *Water Science & Technology*, 56 (4), 137–144
- G. Munda, 1995) *Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment : Theory and Application in Ecological Economics*, Physica-Verlag, Heidelberg.
- P. Nijkamp, P. Rietveld, H. Voogd, 1991) *Multicriteria Evaluation for Physical Planning*, Elsevier Science, Amsterdam
- Ouranos. 2004. *S'adapter aux changements climatiques*. 83p.
- Ouranos. 2010a. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Redaction : C. DesJarlais, M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve, Montréal, 128 p.
- Ouranos. 2010b. *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques*. Guide destiné au milieu municipal québécois, Montréal (Québec), 48 p.
- Pampalon R., Gamache P. et Hamel D, 2010. *Indice de défavorisation matérielle et sociale du Québec : suivi méthodologique de 1991 à 2006*. Publication de l'Institut nationale de santé du publique du Québec. 20p.
- Proulx F., Rodriguez M.J., Sérodes J-B. 2010, « Les goûts et les odeurs dans l'eau potable : revue des composés responsables et des techniques de mesure. », *Revue des sciences de l'eau*, 23(3), 303-323.
- Rousseau A.N., Mailhot A., Slivitzky M., Villeneuve J.P., Rodriguez M.J., Bourque A. 2004, « Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Québec. Niveau des connaissances et axes de recherche à privilégier dans une perspective de changements climatiques. », *Revue Canadienne des ressources hydriques*, 29(2), 121-134.
- T.L. Saaty, 1980) *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, USA.
- S. Saidi, S. Bouri, H. Ben Dhia, B. Anselme, 2011, « Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping : Application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel, Agricultural », *Water Management*, 98, pp. 1671-1682.
- Statistique Canada. 2007. Québec, Québec (Code2423027) (tableau). Profils des communautés de 2006, Recensement de 2006, produit n° 92-591-XWF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 13 mars 2007. (Site consulté le 19 août 2011).
<http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/dp-pd/prof/92-591/index.cfm?Lang=F>
- L. Tilio, B. Murgante, F. Di Trani, M. Vona, A. Masi, 2011, *Resilient City and Seismic Risk: A Spatial Multicriteria Approach*, In : B. Murgante et al. (Eds.): ICCSA 2011, Part I, LNCS 6782, pp. 410 – 422, 2011, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- F. Torrieri, G. Concilio, P. Nijkamp, 2002, "Decision Support Tools for Urban Contingency Policy. A Scenario Approach to Risk Management of the Vesuvio Area in Naples, Italy", *Decision Support Tools for Urban Contingency Policy*, 10(2), pp. 95-112
- Ville de Québec. 2010. *Une vision pour le développement durable de Québec*. Communication orale du Lundi 31 mai 2010.
http://www.ville.quebec.qc.ca/environnement/dev_durable/doc/Vision.pdf
- Warren, F.J. et Egginton, P.A. 2008. Information de base : concepts, aperçus», dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa (ON), 27-56.