HAL
open science

Analyse multi-échelle de la vulnérabilité des réseaux des systèmes territoriaux

Michel Nabaa, Cyrille Bertelle, Antoine Dutot, Patrick Lions, Pascal Mallet, Damien Olivier

To cite this version:

Michel Nabaa, Cyrille Bertelle, Antoine Dutot, Patrick Lions, Pascal Mallet, et al.. Analyse multi-échelle de la vulnérabilité des réseaux des systèmes territoriaux. CIST2011 - Fonder les sciences du territoire, Collège international des sciences du territoire (CIST), Nov 2011, Paris, France. pp.356-363. hal-01352901

HAL Id: hal-01352901

https://hal.science/hal-01352901v1

Submitted on 11 Aug 2016

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.

Analyse multi-échelle de la vulnérabilité des réseaux des systèmes territoriaux

AUTEURS
Michel NABAA, LITIS (France)
Cyrille BERTELLE, LITIS (France)
Antoine DUTOT, LITIS (France)
Patrick LIONS, Communauté de l'agglomération havraise (France)
Pascal MALLET, Communauté de l'agglomération havraise (France)
Damien OLIVIER, LITIS (France)

RÉSUMÉ
Le travail présenté ici a pour cadre la prévention des risques et la gestion de crises nécessitant une évacuation. La structure du réseau viaire est étudiée mais également les processus de mobilité qui s'y développent. Nous utilisons en particulier des techniques d'intelligence en essaim pour étudier la morphodynamique du réseau. La prévention des risques est considérée en analysant la vulnérabilité du réseau représenté par un multigraphe. Sa structure est étudiée à différents niveaux d'échelle, par des méthodes de calcul de la centralité d'intermédiarité et de clustering hiérarchique. La gestion de crise lors d'une évacuation a aussi été traitée et a conduit à l'étude de la dynamique des déplacements au sein du réseau routier et à un traitement et une analyse multi-échelle. Nous avons développé un modèle microscopique de trafic ainsi qu'un modèle de microévacuation permettant d'organiser une évacuation depuis l'occurrence de la crise jusqu'à l'évacuation des véhicules. Le modèle est adaptatif, il prend en compte la structure du multigraphe, la vulnérabilité des éléments à différents niveaux d'échelle, les événements inattendus lors d'une évacuation et permet d'amener des éléments de réponse aux décideurs gérant le risque.

ABSTRACT
In this work, we deal with risk prevention and crisis management requiring evacuation. Road network structure and mobility process are studied by using swarm intelligence methods. Risk prevention is considered by analyzing the vulnerability of the network represented by a multigraph, at different scale levels thanks to betweenness centrality and hierarchical clustering methods. Crisis management during an evacuation is also treated. A microscopic traffic model is developed and a micro-evacuation simulator is proposed to organize an evacuation, beginning from crisis occurrence until vehicles evacuation. Our model is adaptive, it takes into consideration multigraph structure and its elements vulnerability at different scale levels, and unexpected events during an evacuation. Finally, the developed tool helps decision makers managing risks..

MOTS CLES
Systèmes complexes, réseaux, vulnérabilité, risque, auto-organisation, détection d'organisations, SIG.

INTRODUCTION

Durant ces dernières décennies, la population a été de plus en plus exposé aux risques d'origine naturelle ou anthropique qui ont provoqué des dommages sur les populations

et leurs environnements. La perception de la notion de sécurité des hommes et des biens ne cesse d'évoluer. Alors que le sentiment de sécurité reposait éventuellement sur des croyances (Fèvre 1956), les savoirs se sont développés suite à plusieurs événements dramatiques, débouchant sur des dernières avancées en technologies de l'information et de communications et la mise en œuvre de politiques et de moyens réalisés par les États et plus particulièrement les pays industriels développés. En France, les collectivités territoriales se voient porter des responsabilités croissantes et se dotent de plus en plus de compétences sur le recensement des risques, l'information préventive des populations et l'élaboration de plans d'intervention. Dans ce cadre, la CODAH[1] a créé en 2001 la DIRM[2]. L'étude développée dans ce papier consiste à proposer une contribution autour des réseaux viaires offrant une appréhension complexe du territoire et du risque à travers une convergence transdisciplinaire. L'objet est la protection de la population et plus précisément l'étude des flux de cette même population dans son environnement. Les flux sont générés par les différents déplacements et l'environnement considéré est le réseau viaire. Ces flux modifient l'état du réseau qui lui-même les conditionne. Un des éléments recherchés est l'émergence de structure, de forme et d'auto-organisation. L'objectif principal est de fournir, par des analyses de la dynamique de la situation, des éléments d'aide à la décision permettant de planifier ce contrôle avec des informations pertinentes.

1. APPROCHE SYSTÉMIQUE DE LA VULNÉRABILITÉ TERRITORIALE PAR SES RÉSEAUX

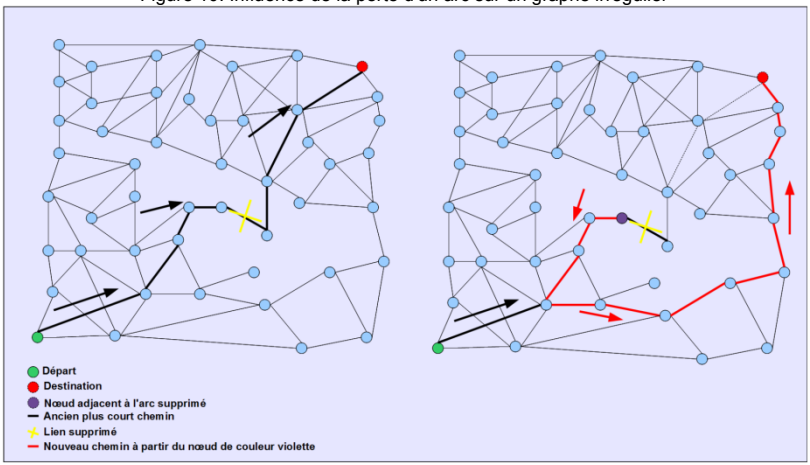
Il faut considérer la vulnérabilité au regard du territoire. En effet, cette dernière a une dimension spatiale et c'est dans ce contexte qu'elle doit être appréhendée mais qui doit être complété par l'étude des interactions entre les multiples composantes, habitant, occupant, utilisant l'espace. Un territoire est un système complexe pour lequel une approche systémique est donc possible en s'interrogeant sur l'apparition d'auto-organisations s'inscrivant dans l'espace.

Vulnérabilité et morphodynamique des réseaux routiers urbains

L'étude de la vulnérabilité du réseau routier conduit à analyser sa résistance matérielle et également étudier la résistance de sa structure face aux aléas qui l'entourent. Les atteintes potentielles de la structure peuvent aussi apporter des dysfonctionnements jusqu'à des pertes fonctionnelles du réseau. L'analyse de la structure du réseau va donc nous permettre d'identifier des tronçons de routes qui sont plus fragiles que d'autres, i.e. des lieux de passage incontournables. Ces tronçons méritent une attention particulière de la part des autorités pour faire face aux phénomènes de saturation surtout lors d'une évacuation. Hormis les dégâts matériels et structurels directs, les dommages indirects dus à la perte d'un ou de plusieurs liens fragiles rendent des parties du réseau indisponibles, ce qui compromet son fonctionnement en diminuant son efficacité dans la mise en relation entre les différentes parties du territoire. Une structure urbaine maillée en grille régulière comme celle du réseau routier de type Manhattan permet de trouver des chemins alternatifs en cas de dysfonctionnement d'une partie du réseau, sans générer de surcoût important en terme de déplacement. A contrario, un dysfonctionnement de même nature qui touche un lien faible d'un réseau de même taille mais à structure moins régulière peut obliger les véhicules à faire un détour important pour arriver à destination (voir Figure 1).

1 Communauté de l'agglomération havraise
2 Direction pour l'Information sur les risques Majeurs

Figure 10. Influence de la perte d'un arc sur un graphe irrégulier



Pour ce qui concerne le fonctionnement et l'usage du réseau routier par les véhicules, des méthodes de marche aléatoire dans le réseau ou des méthodes basées sur des EMD[3] permettent d'identifier des routes susceptibles d'être plus empruntées que d'autres par les véhicules. Les autorités doivent veiller à ce que la circulation sur ces routes soit toujours fluide. Ces deux méthodes (analyse de structure et d'usage) sont en fait complémentaires. L'analyse de la structure est une méthode pessimiste par précaution, mettant en évidence des liens faibles du réseau, même si ces liens peuvent être peu ou jamais empruntés par la population. L'analyse de la structure doit donc toujours être complétée par des méthodes d'usage du réseau routier mettant en évidence les routes susceptibles d'être les plus empruntées.

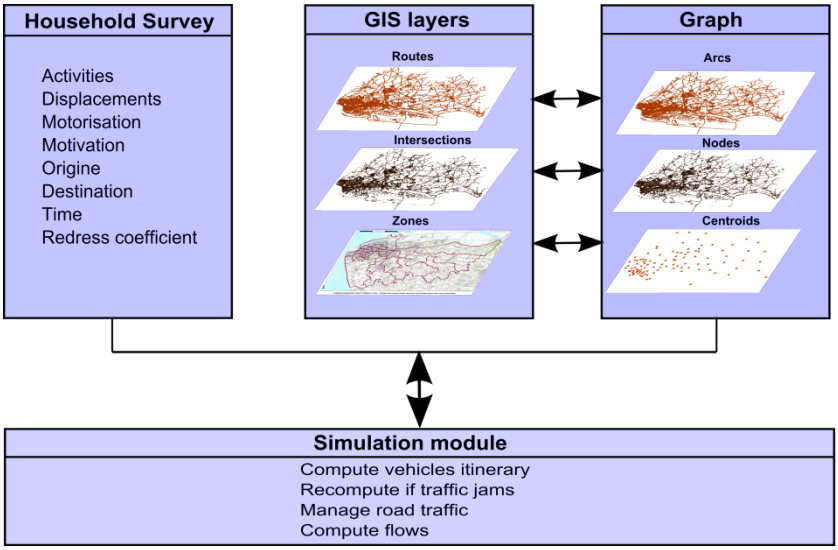
Analyse structurelle multi-échelle de la vulnérabilité des réseaux

La structure du réseau routier représentée par un multigraphe[4] orienté dans ce travail, influence les flux en situation normale comme en situation de crise. Un aléa frappe une partie du réseau routier et crée en effet un endommagement matériel, provoquant un changement dans la structure du réseau débouchant sur des dommages fonctionnels et influençant les entités qui empruntent ce réseau, d'où la notion de la vulnérabilité matérielle, structurelle et fonctionnelle développée dans (Gleyze 2005, Reghezza 2006). En effet, l'endommagement matériel dépend entre autres de l'aléa et du niveau d'exposition de l'enjeu. Il s'agit de la vulnérabilité matérielle. Le réseau routier, de par sa structure, est aussi exposé donc vulnérable. On note que la structure du réseau peut jouer un rôle positif ou négatif dans la réduction de la vulnérabilité. Un réseau à structure maillée est moins vulnérable que d'autres du fait que l'on peut souvent trouver des chemins alternatifs pour éviter des parties endommagées du réseau. À une autre échelle, l'endommagement structurel influe sur la fonction du réseau routier et donc sur les entités empruntant ce réseau, d'où le concept de la vulnérabilité fonctionnelle qui, à

3 Enquêtes Ménage Déplacements.
4 Un multigraphe est un graphe pour lequel, entre deux sommets donnés, il est possible d'avoir plusieurs arcs orientés.

son tour peut influer sur la structure du réseau. Nous analysons la structure du réseau à trois niveaux d'échelle : micro, meso et macro.
Au niveau micro, nous étudions comment un accident local peut influer sur le fonctionnement du réseau routier et ceci en mesurant, pour chaque connexion, son importance dans le réseau. Cette dernière dépend du coefficient de clustering[5] des sommets extrémités de chaque arc du multigraphe. Un arc dont les deux sommets extrémités ont un coefficient de clustering élevé offre plus de chemins alternatifs pour relier ses extrémités s'il est endommagé suite à un accident. Nous avons développé une seconde méthode permettant de quantifier le détour à faire suite à la perte éventuelle d'un arc.
Au niveau mésoscopique, nous calculons la centralité d'intermédiarité dans le multigraphe : ce calcul, adapté de la méthode de calcul de centralité dans un graphe (Freeman 1979), mesure l'importance à l'échelle mésoscopique de chaque arc dans le graphe, i.e. le nombre de plus courts chemins entre chaque pair de sommets du graphe passant par cet arc.
Au niveau macro, nous mettons en place une méthode de détection de communautés applicable aussi bien sur un graphe que sur un multigraphe qui permet de montrer les arcs inter communautés faibles sur le réseau (le lien supprimé de la Figure 1 correspond typiquement à un arc inter communautés). Ces arcs représentent donc des lieux de passage incontournables et en tant que tels, ce sont des singularités importantes dans la carte globale de vulnérabilité. Nous développons aussi une méthode de marche aléatoire sur le multigraphe, permettant d'identifier les zones du réseau susceptibles d'être plus empruntées et congestionnées que d'autres en situation normale de trafic, et ceci à partir de la structure du multigraphe.

Figure 11. Extraction d'un graphe depuis un SIG et couplage avec la micro-simulation de déplacement des véhicules



5 Le coefficient de clustering d'un sommet détermine la probabilité que deux de ses sommets voisins soient reliés

2. MODÈLES, DYNAMIQUES ET AIDE À LA DÉCISION

Modèle environnemental, graphes dynamiques et SIG

La Figure 2 décrit la méthodologie de traitement et du modèle environnemental utilisé qui extrait, de couches de SIG, un graphe sur lequel des processus dynamiques permettront de décrire des simulations. Ce traitement s'appuie sur la bibliothèque de graphe dynamique GraphStream dévéloppée au sein du laboratoire LITIS (Dutot et al 2007).

Figure 12. Clustering hiérarchique sur le graphe de l'agglomération havraise et de l'estuaire de la Seine

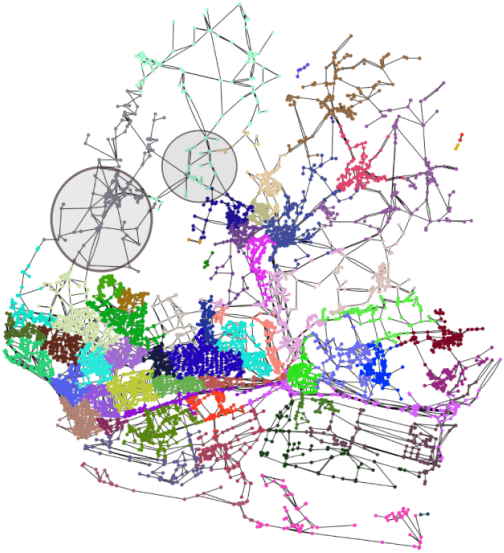
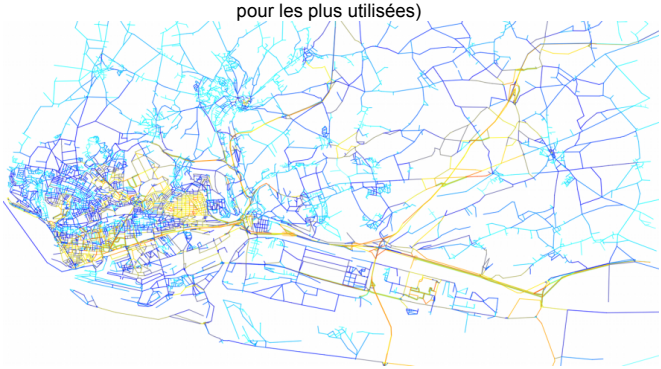


Figure 13. Calcul de marches aléatoires sur le réseau routier extrait du SIG de la ville du Havre. La couleur des arêtes indiquant le taux d'utilisation (du bleu foncé pour les moins utilisées au rouge pour les plus utilisées)



Simulations et gestion d'évacuations

La figure 3 est l'une des sorties de la plateforme proposée qui correspond au clustering de la ville du Havre. Il s'agit ici d'une analyse macrocospique de la morphologie urbaine qui détecte automatiquement les zones les plus connectées du réseau, appelées cluster ou communautés, permettant alors d'isoler les arêtes d'inter communautés qui sont typiquement vulnérables.

La figure 4 présente une autre sortie de la plateforme qui est une copie à un instant donné d'une carte dynamique qui calcule des marches aléatoires : ces processus dynamiques explorent aléatoirement le graphe et révèlent les structures spatio-temporelles du réseau qui émergent de leur usage potentiel.

Sur les figures 5 et 6, nous illustrons un example produit par un scénario de micro-simulation au cours duquel on génère un accident ou un dysfonctionnement du réseau rendant inutilisable une partie des arêtes de celui-ci. On mesure alors l'incidence par une analyse morphodynamique du graphe qui calcule l'évolution des centraliés d'intermédiarité au cours de ce dysfonctionnement. On observe typiquement sur l'example du carrefour routier bien connu sur l'entrée du Havre sous le nom de “la Brecque”, décrit dans les figures 5 et 6, que ces centralités sont largement modifiées par ce dysfonctionnement, nous permettant ainsi de quantifier la vulnérabilité de la zone étudiée.

Figure 14. Agrandissement du réseau routier autour de la Brecque, carrefour routier important à l'entrée du Havre

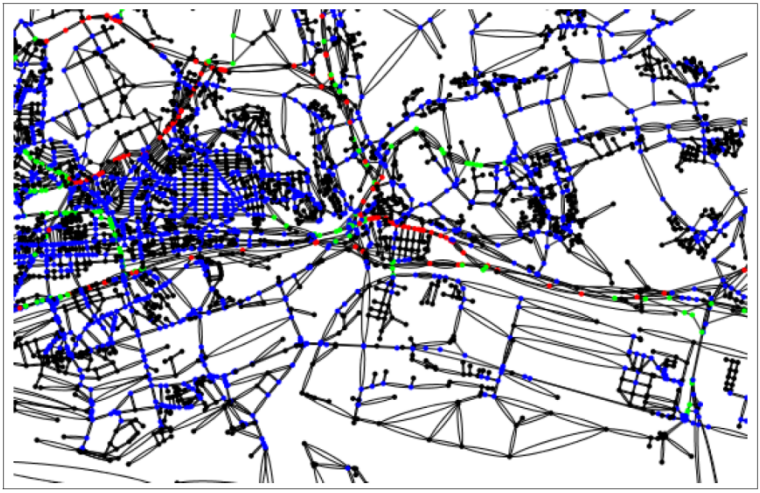
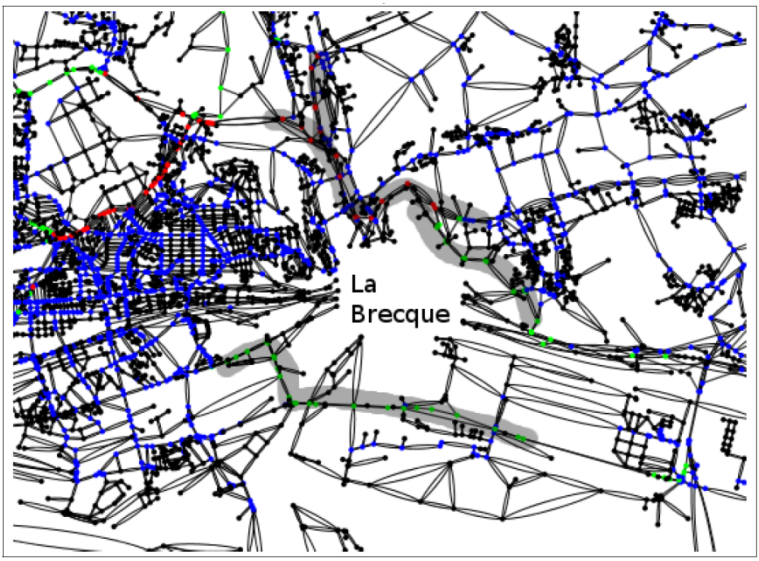


Figure 15. Réorganisation des flux routiers autour de la Brecque dans un scénario rendant indisponible le nœud d'arêtes centrales de ce carrefour routier. La plateforme de simulation produit alors une réorganisation des flux et des zones de contournements, matérialisées en couleur grise,



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le travail présenté ici permet de fournir des outils de modélisation et de simulation sur le réseau routier d'un territoire, caractérisant ses flux qui peuvent être soumis à des dysfonctionnements. Une analyse précise de la morphodynamique de ce réseau est présentée sur plusieurs niveaux d'échelle, offrant ainsi des éléments détaillés pour caractériser la vulnérabilité du territoire, sous la forme de cartes dynamiques « intelligentes » du territoire, c'est à dire capable de s'adapter à des modifications du réseau qui peut être un accident naturel ou technologique. Cet outil est notamment utilisé pour caractériser des zones de contournements dans le cadre d'un incident local et la simulation offre alors des recalculs de flux de manière dynamique, utiles pour la prise de décision lors de la gestion de crise, en cas de risques majeurs, par exemple.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été partiellement soutenu par la Région Haute-Normandie dans le cadre du projet « protection des populations » du GRR SER. Il a également été soutenu par une convention CIFRE entre l'Université du Havre et la CODAH qui a permis à Michel Nabaa de bénéficier d'une allocation doctorale.

REFERENCES

A. Banos (2005) “A la conquête de la fourmilière urbaine : quand le géographe se fait explorateur de mondes artificiels,” Tech. Rep., 2005. [Online]. Available: http://fig-st-die.education.fr/actes/actes 2005/index.htm

C. Bertelle, A. Dutot, M. Nabaa, D. Olivier, and P. Mallet (2008) “Modeling of the vulnerability related to the dynamic road traffic,” in ESM'08, Le Havre.

C. Bertelle, A. Dutot, M. Nabaa, and D. Olivier (2008) “Detection of organizations in large graphs : Application on risk management,” in Agent Based Spatial Simulation.
J. Bourcier and P. Mallet (2006) “Allocation spatio-temporelle de la population expos´ee aux risques majeurs. contribution `a l’expologie sur le bassin de risques majeurs de l’estuaire de la seine: modèle pret-resse,” Revue internationale de Géomatique, vol. 16(10), pp. 457–478.
R. Church and T. Cova (2000) “Mapping evacuation risk on transposion networks using a spatial optimization model,” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 8(1-6), pp. 321–336.
T. Cova and R. Church (1997) « Modeling community evacuation vulnerability using GIS », International Journal of Geographical Information Science, 11(8), pp. 763-784.
S. Cutter, J. Mitchell, and M. Scott (2000) “Revealing the vulnerability of people and places: a case study of georgetown county, south carolina,” Annals of the Association of American Geographers, vol. 90(4), pp. 713–737.
E. Daudé (2005) “Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle”. in Y. Guermont (dir.), Modélisation en Géographie : déterminismes et complexités, ch. 13, pp. 355–382.
A. Dutot, F. Guinand, D. Olivier, and Y. Pigné (2007) “Graphstream: A tool for bridging the gap between complex systems and dynamic graphs,” in EPNACS: Emergent Properties in Natural and Artificial Complex Systems.
L. Fèbvre (1956) “Pour l’histoire d’un sentiment : le besoin de sécurité”. Annales, Économies, sociétés, civilisations, 11.
L.C. Freeman (1979) “Centrality in social networks : conceptual classification”. Social networks, 1(3) :215–239.
J.F. Gleyze (2005) “La vulnérabilité structurelle des réseaux de transports dans un contexte de risque”, thèse de l'université Paris VII, Laboratoire COGIT-IGN.
M. Nabaa (2011) « Morphodynamique de réseaux viaires. Application au risque », thèse de l'université du Havre.
R. Najlis and M. J. North (2004) “Repast for GIS.” University of Chicago and Argonne National Laboratory, IL, USA: In Proceedings of Agent 2004: Social Dynamics: Interaction, Reflexivity and Emergence.
D. Provitolo (2007) “A proposition for a classification of the catastrophe systems based on complexity criteria,” in European Conference Complex Systems-EPNACS’07, Emergent Properties in Natural and Artificial Complex Systems, Dresden, pp. 93–106.
M. Reghezza (2006) “Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale”, thèse de l'université Paris x – Nanterre.

AUTEURS

Michel **Nabaa**
LITIS, Université du Havre, France
michel.nabaa@gmail.com

Cyrille **Bertelle**
LITIS, Université du Havre, France
cyrille.bertelle@univ-lehavre.fr

Antoine **Dutot**
LITIS, Université du Havre, France
antoine.dutot@univ-lehavre.fr

Patrick **Lions**
DIRM, Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH), France
patrick.lions@agglo-havraise.fr

Pascal **Mallet**
DIRM, Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH), France
pascal.mallet@agglo-havraise.fr

Damien **Olivier**
LITIS, Université du Havre
damien.olivier@univ-lehavre.fr