

Une approche d'intelligence collective pour l'élaboration d'une carte de vulnérabilité  
dynamique  
A collective intelligence approach to construct a dynamic vulnerability map

Michel Nabaa, Cyrille Bertelle, Antoine Dutot,  
Damien Olivier

Pascal Mallet

Laboratoire LITIS

25, rue Phillipe Lebon  
F-76600 Le Havre  
Téléphone +33 2 35 22 25 49  
Fax + 33 2 35 22 25 47  
{Michel.Nabaa ; Cyrille.Bertelle ;  
Damien.Olivier ; Antoine.Dutot}@univ-lehavre.fr

Communauté de  
l'Agglomération Havraise  
19 rue Georges Braque  
F-76085 Le Havre  
Téléphone +33 2 32 74 43 54  
Fax +33 2 32 74 43 14  
Pascal.Mallet@agglo-  
havraise.fr

### **Résumé**

La population de l'agglomération havraise est comprise dans le bassin de risques majeurs de l'estuaire de la seine. Elle comporte 33 établissements à risques importants dont la moitié est classée Seveso seuil haut. La modélisation et l'évaluation des dangers nous sont utiles lorsqu'on les croise avec les enjeux exposés. Le premier d'entre tous est la population. Dans la littérature, on recense des cartes de vulnérabilité pour aider les décideurs à estimer le risque. Ces cartes sont basées sur plusieurs types de vulnérabilité : socio démographique, biophysique et autres regroupant plusieurs types de dangers. Néanmoins, ce genre d'approches reste statique et ne prend pas en compte le déplacement de la population dans le calcul de la vulnérabilité. Nous proposons un outil d'aide à la décision. Il consiste en une carte de vulnérabilité dynamique basée sur la difficulté d'évacuation autour des différents secteurs de l'agglomération havraise. Cette carte est visualisée à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) et évolue avec l'état dynamique du trafic routier, grâce à un algorithme de détection de communautés dans un graphe.

### **Summary**

The population of Le Havre agglomeration is included in the high risk basin of the Seine estuary. It includes 33 establishments classified Seveso with high threshold. The modelling and assessment of the danger is useful when intersects with the exposed stakes. The most important factor is people. In the literature, we construct vulnerability maps to help decision makers assess the risk. These maps are based on several types of vulnerability: socio-demographic, biophysical and other several types of hazards. Nevertheless, such approaches remain static and do not take into account the population displacement in the estimation of the vulnerability. We propose a decision making tool which consists of a dynamic vulnerability map based on the difficulty of the different sectors evacuation in Le Havre agglomeration. This map has been visualized by using a Geographic Information System (GIS) and evolves according to the dynamic state of the road traffic through a detection of communities in a large graph algorithm.

---

## **1. Introduction**

La population de l'estuaire de la Seine est exposée à plusieurs types de dangers d'origine naturelle ou industrielle. L'agglomération havraise est comprise dans le bassin versant de la lézarde et elle est aussi exposée à des risques technologiques importants : 16 installations sont classées SEVESO seuil haut notamment.

L'examen des populations impactées reste un exercice difficile. Dans ce cadre, l'équipe de la Direction des Risques Majeurs (DIRM) de la Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH) a développé un modèle d'allocation spatio-temporelle de la population à l'échelle des bâtiments exposée au risque PRET-RESSE [10]; ceci en distinguant leur occupation diurne et nocturne. Bien qu'il a pu localiser la population, ce modèle reste statique car il ne prend pas en considération les déplacements journaliers des personnes.

Pour une meilleure évacuation des personnes dans le cas du risque majeur, on a besoin de connaître l'état du trafic routier pour savoir comment répartir les occupants des véhicules sur les voies de secours et de modéliser le déplacement de ces véhicules. Dans la littérature, plusieurs modèles ont été développés pour calculer un score de vulnérabilité lié à l'accès au réseau routier. La plupart de ces travaux adoptent une approche pessimiste pour le calcul de cette vulnérabilité : ce cas est rencontré quand un groupe d'individus, dans une zone de danger, décident tous de prendre la même route pour évacuer cette zone ; ce qui se passe malheureusement assez souvent dans la réalité. Bien qu'elle aide les décideurs à estimer le risque par le recensement de carte de vulnérabilité, cette approche est statique et ne prend pas en considération l'évolution du trafic routier.

Dans cet article, nous proposons une approche dynamique et pessimiste de calcul de danger lié à l'accès au réseau routier. Pour cela, nous modélisons le réseau routier par un graphe dynamique (la dynamique est due à l'évolution du trafic routier). Un modèle simple de trafic routier basé sur les flux sera aussi proposé. Ensuite, nous appliquons une dynamique d'auto-organisation sur le graphe. Cette dynamique est basée sur un algorithme de détection de communautés dans le graphe faisant partie des algorithmes d'intelligence collective. L'algorithme va nous permettre de définir les voisinages pessimistes dans le cas d'une évacuation potentielle suite à un danger ; et ceci tout en prenant en considération l'évolution du trafic routier. Le résultat de cet algorithme sera visualisé grâce à un SIG sur une carte de vulnérabilité dynamique qui catégorise les différents secteurs selon la difficulté d'accès au réseau routier. Enfin, cette carte de vulnérabilité va constituer un outil d'aide à la décision pour une meilleure estimation du risque dans les communes de la CODAH. Cet outil enrichit le modèle PRET-RESSE développé à la CODAH en prenant en considération la mobilité de la population.

## **2. État de l'art**

Les méthodes traditionnelles de conception et d'évaluation de la population exposée à un risque ne prennent parfois pas en compte la réponse comportementale probable des évacués (par exemple : réponse initiale à une évacuation, vitesse de voyage, interactions famille/groupe, etc.), préférant compter presque totalement des règles prescriptives (distance de voyage et largeur de sortie). Ces méthodes traditionnelles sont peu sensibles aux comportements humains pour des scénarios d'urgence variés. Les modèles informatisés offrent le potentiel d'évaluer l'évacuation d'un voisinage lors d'une urgence et de surmonter ces limitations [3].

Récemment, des exemples d'application ont été développés; ils incluent la dynamique de la population, les modèles de croissance urbaine et les modèles d'occupation du sol.

Pour les modélisateurs informaticiens, cette intégration fournit la capacité d'avoir des entités informatiques, notamment des agents qui sont liés aux endroits géographiques réels. Pour les utilisateurs de SIG, elle fournit la capacité de modéliser l'apparition des phénomènes par différentes interactions des agents sur des SIG dans le temps et l'espace [15].

Dans [6], l'auteur présente une méthode pour estimer la vulnérabilité spatialement en utilisant les aspects biophysiques et

sociaux (accès aux ressources, population avec des besoins d'évacuation spéciaux, population à mobilité réduite...).

Plusieurs couches sont créées dans le SIG (une couche par danger) et toutes ces couches sont combinées dans une seule composée de polygones entrecroisés pour construire une carte de vulnérabilité globale. Pour compléter, il fallait prendre en considération l'infrastructure et les différents axes possibles d'évacuation. Pour cela, une nouvelle carte a été construite et une nouvelle couche a été intégrée. Ce travail a été appliqué au canton de Georges Town où il y a eu différents risques naturels et industriels et où il y a différents types de population.

Dans le cadre des évacuations à une échelle de voisinage, plusieurs études basées sur la micro simulation ont été développées.

Dans son article [4], l'auteur a présenté un modèle pour estimer le temps nécessaire pour évacuer un voisinage selon l'effectif de la population, le nombre de véhicules et la capacité des routes et le nombre de véhicules par minute. Le modèle est basé sur l'optimisation dans le but de trouver le voisinage critique autour d'un point de la zone à évacuer. Ce modèle a été couplé avec un SIG (ArcInfo) pour visualiser les résultats (identifier des plans d'évacuations sur les zones d'une carte) et établir une carte de vulnérabilité d'évacuation de la ville (Santa Barbara).

Cova et Church [5] ont ouvert la voie sur l'étude basée sur des systèmes d'information géographique d'évacuation de population. Leur étude a identifié les communautés qui peuvent faire face à des difficultés de transport pendant une évacuation. La recherche a modélisé la population par voie (LANE) d'occupation de route pendant une évacuation de secours en utilisant la ville de Santa Barbara.

Un modèle basé sur l'optimisation (problème de partitionnement de graphe) a été réalisé pour trouver le voisinage qui cause la vulnérabilité la plus élevée autour de chaque nœud du graphe afin de construire une carte de vulnérabilité autour des nœuds de la ville. Une heuristique constructive a été utilisée pour calculer le meilleur cluster autour de chaque nœud. Cette heuristique a été développée en C et le résultat est visualisé sur une carte (avec ARCINFO).

Néanmoins, dans cette approche, on prédéfinit le nombre de nœuds maximal dans un voisinage, ce qui peut ne pas être toujours applicable dans le monde réel et elle ne prend pas l'évolution du trafic routier pendant le calcul des voisinages critiques.

Dans notre travail, on essaie de construire une carte de vulnérabilité dynamique qui évolue avec le trafic routier actuel et dans laquelle le nombre de nœuds dans un voisinage critique n'est pas prédéfini et peut changer selon le trafic.

## **3. Modèle dynamique**

### **3.1. Problématique**

Dans ce papier, le terme "vulnérabilité" est lié à l'accès au réseau routier. Pour pouvoir étudier cette vulnérabilité, on a intérêt à avoir une représentation fine de la population et l'état dynamique du trafic routier.

Dans le modèle PRET-RESSE développé au sein de l'équipe de la direction des risques majeurs de la CODAH, on a réparti la population diurne et nocturne au niveau des bâtiments. On a pu localiser les gens pendant la journée bien dans leur lieu de travail que dans leur résidence (les chômeurs et retraités). On a estimé que la population nocturne sera dans son lieu de résidence pendant la nuit.

PRET-RESSE va pouvoir être enrichi par notre modèle qui va essayer d'évaluer la vulnérabilité d'une manière dynamique selon l'évolution du trafic routier.

### **3.2. Architecture du système**

Notre système est composé de deux modules comme l'indique la figure suivante.

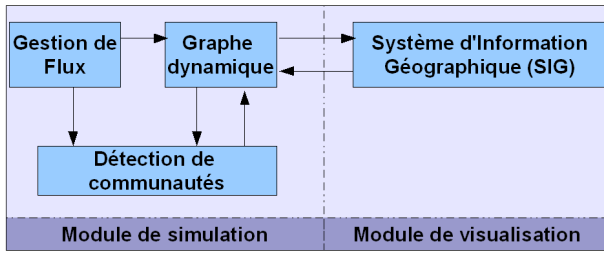


Figure 1 : Architecture du système

Le module de simulation contient trois composants :

- Le graphe dynamique extrait de la couche du réseau routier et détaillé dans la section suivante.
- Le composant gestion de flux est le simulateur de flux de véhicules appliqué sur le graphe.
- Le composant détection de communautés détaillé dans la section 3.5 a comme entrée le graphe et le flux actuel et retourne les communautés qui se forment selon l'état actuel du trafic routier.

Le module de visualisation présente la couche du réseau routier intégrée dans un SIG. Ce module communique avec le module de simulation : Le graphe se construit à partir de ce module qui à son tour recueille le résultat de la simulation pour le visualiser en tant que carte de vulnérabilité dynamique.

### 3.3. Modélisation de l'environnement

Le réseau routier est intégré comme une couche dans un Système d'Information Géographique (SIG). De cette couche, on extrait un graphe avec l'outil GraphStream [9] qui est conçu pour la modélisation, le traitement et la visualisation de graphes et qui est développé au sein du LITIS.

Cette couche contient les informations nécessaires sur le sens de circulation, l'identifiant de la rue, le type de la rue, sa longueur et sa géométrie...

A partir de cette couche, le graphe extrait est nommé  $G(t) = (V(t), E(t))$ . Ce graphe est orienté et pondéré, où  $V(t)$  est l'ensemble de nœuds et  $E(t)$  l'ensemble des arcs :

- Les nœuds de ce graphe représentent les intersections ;
- Les arcs représentent les voies empruntables par les véhicules menant d'un lieu à un autre ;
- La valuation sur les arcs représente le temps nécessaire au franchissement de celui-ci, vue la charge actuelle du trafic ;
- La dynamique porte sur la valuation des arcs, qui est susceptible d'évoluer dans le temps, en fonction de l'évolution de la fluidité de la circulation.

A partir de la couche de la population dans les bâtiments réalisée dans PRET-RESSE, on a construit une tessellation de Voronoi (polygone de Thiessen) et on a projeté la population sur les différents nœuds du graphe.

### 3.4 Flux de véhicules

Pour une meilleure évacuation des personnes dans le cas de risque majeur, on a besoin de connaître l'état du trafic routier pour savoir comment répartir les véhicules sur les voies du réseau routier et de modéliser le déplacement de ces véhicules. Différents types de modèles peuvent être adoptés :

- Le modèle microscopique modélise le comportement individuel de chaque véhicule en représentant les interactions avec les autres véhicules et en général en utilisant une spatialisation. On l'utilise à l'échelle d'un îlot ou d'un quartier.
- Le modèle macroscopique repose sur l'analogie entre la circulation des véhicules et l'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'un canal. On visualise les flux sur les axes et non plus les véhicules individuels. On l'utilise pour plusieurs quartiers ou pour une ville entière.

Le modèle hybride permet de coupler les deux types de modèles d'écoulement dynamique au sein de la même simulation. Des travaux ont déjà emprunté cette direction [2, 8, 11] ; cependant cette approche est relativement novatrice et très peu ont abordé un changement de modèle en cours de simulation à notre connaissance [14].

Dans ce papier, on a utilisé un modèle macroscopique simple de flux :

- Un ensemble de flux de voitures qui passent d'un arc à un autre.
- Les arcs sont limités en capacité de véhicules.
- Des flux peuvent se décomposer ou se rassembler à un nœud .
- Des saturations sur le réseau routier peuvent apparaître dans certains lieux du réseau signifiant que ces lieux sont plus vulnérables que d'autres.

Nous avons adopté le modèle macroscopique dans lequel les flux circulent normalement (sans accidents) parce que le but pour l'instant est d'établir une carte de vulnérabilité dynamique pessimiste ; ce qui n'est pas toujours le cas dans le monde réel. D'où l'intérêt d'avoir, dans le futur proche, une approche micro avec un changement d'échelle pour simuler des scénarios de danger en temps réel (accidents, comportements des conducteurs, interactions inter-véhicules...), une étude sur laquelle on travaille actuellement.

### 3.5. Détection de communautés

Nous cherchons à détecter des communautés dans les graphes, c'est à dire des zones denses fortement reliées entre elles et plus faiblement reliées vers l'extérieur.

La notion de communauté dans un graphe est difficile à expliquer formellement. Elle est vue comme un ensemble de sommets dont la densité de connexions internes est plus forte que la densité de connexions vers l'extérieur sans pour autant définir de seuil formel [16]. Le but est alors de trouver une partition des sommets en communautés rassemblées selon un certain critère sans avoir prédéfini le nombre de telles communautés ni le nombre de sommets dans une communauté).

Des ouvrages intéressants ont été développés dans la littérature sur la détection de structure de communautés dans les grands graphes [1, 12, 13, 17].

Dans notre problème, nous cherchons à identifier une auto-organisation au sein d'un réseau évolutif avec un algorithme proche de la détection des communautés dans les grands graphes et faisant partie des algorithmes d'intelligence collective. Cet algorithme déjà développé au sein du laboratoire LITIS [7] est basé sur la propagation de forces dans les graphes.

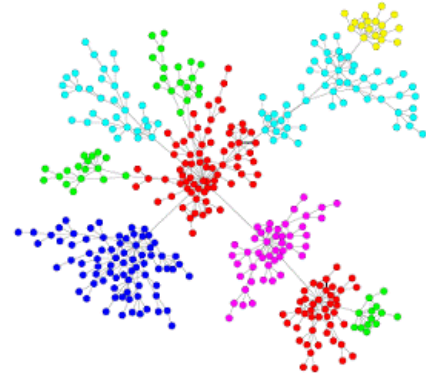


Figure 2 : Détection de communautés

Plus formellement, on a des forces d'interaction locales entre deux nœuds adjacents selon la force qui s'exerce entre eux. Cette force dépend dans notre cas du rapport du *nombre de véhicules sur l'arc liant 2 nœuds voisins / la capacité en nombre de voitures de cet arc* et constitue la donnée de notre algorithme. On choisit ce rapport puisque dans chaque communauté, on aura un grand nombre de voitures dans une seule communauté qui décident toutes de sortir par une seule route dans le cas d'un danger potentiel; ceci répond bien à l'un des buts cités au début d'avoir une approche pessimiste dans le calcul de la vulnérabilité. L'algorithme a l'avantage de ne pas permettre la cassure de liens entre 2 nœuds pour maintenir la structure du réseau routier. Dans le cas de changement dans le trafic, l'algorithme détecte ce changement et des communautés peuvent changer, naître ou disparaître suite à des forces locales qui changent entre les nœuds localement.

#### **4. Carte de vulnérabilité dynamique**

A chaque étape de la simulation, les flux sur les arcs du graphe évoluent et les forces d'interactions changent par conséquent. Des communautés se forment ainsi sur le graphe. Le résultat de cette simulation sera visualisée sur les couches du réseau routier dans le SIG. Ainsi, se construit la carte de vulnérabilité dynamique.

#### **5. Conclusion**

Dans cet article, nous avons proposé un outil d'aide à la décision pour évaluer le danger dépendant de l'utilisation du réseau par la population de véhicules empruntant ce réseau. Cet outil permet aux décideurs de visualiser, sur un système d'information géographique, une carte de vulnérabilité dynamique liée à la difficulté d'évacuation par les différentes rues du réseau routier de l'agglomération havraise. Pour cela, on a simulé le trafic routier avec un modèle simple de flux de véhicules. Un algorithme de détection de communautés dans les grands graphes a été adopté. Il nous a permis d'avoir des communautés se formant dans le graphe suite à des règles de propagations de forces locales entre les nœuds voisins. Les communautés créées ainsi peuvent évoluer selon l'état actuel du trafic routier. Le résultat de l'évolution des communautés est ainsi visualisé grâce à un SIG.

L'approche nous a permis d'estimer le risque lié à l'utilisation du réseau routier et de distinguer des secteurs plus ou moins vulnérables de l'agglomération havraise.

Nous allons compléter notre travail par l'application de données de trafic réelles déjà extraites d'une enquête ménage déplacements qui nous aide à mieux localiser les gens pendant la journée et avoir par conséquent une carte de vulnérabilité dynamique plus réaliste.

#### **6. Références**

- [1] Aaron Clauset, M. E. J. Newman, and Christopher Moore. Finding community structure in very large networks. *Phys. Rev. E* 70, 066111 (2004).
- [2] A. Hennecke, M. Treiber, and D. Helbing. Macroscopic simulation of open systems and micro-macro link. In M. Schreckenberg D. Helbing, H. J. Herrmann, editor, *Traffic and Granular Flow '99 : Social, Traffic, and Granular Dynamics*, pages 383–388. Springer, 2000.
- [3] Castel, C.J.E., Developing a prototype agent-based pedestrian evacuation model to explore the evacuation of King's Cross St Pancras underground station, centre for advanced spatial analysis (university college London): working paper 108, London, 2006.
- [4] Church, R.L., and Cova, T.J. (2000) Mapping evacuation risk on transposition networks using a spatial optimization model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1-6): 321-336.
- [5] Cova, T.J., and Church, R.L. (1997) Modelling community evacuation vulnerability using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(8): 763-784.
- [6] Cutter, S.L., J.T. Mitchell, and M.S. Scott, 2000. "Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina," *Annals of the Association of American Geographers* 90 (4): 713-737.
- [7] C. Bertelle and A Dutot and F. Guinand and D. Olivier, Organization Detection Using Emergent Computing. *International Transactions on Systems Science and Applications* 2(1), 61:70, 2006.
- [8] E. Bourrel and V. Henn. Mixing micro and macro representation of traffic flow : a first theoretical step. In *Proceeding of the 9th Meeting of the Euro Work-ing Group on transportation*, 2002.
- [9] GraphStream : un outil de modélisation et de visualisation de graphes dynamiques. Distribué sous licence libre (GPL). [Http://graphstream.sourceforge.net](http://graphstream.sourceforge.net).
- [10] J.C. Bourcier, P. Mallet (2006). Allocation spatio-temporelle de la population exposée aux risques majeurs. Contribution à l'expologie sur le bassin de risques majeurs de l'estuaire de la seine: modèle PRET-RESSE. *Revue internationale de Géomatique*, 16(10) : 457-478.
- [11] L. Magne, S. Rabut, and J. F. Gabard. Toward an hybrid macro and micro traffic flow simulation model. In *INFORMS spring 2000 meeting*, 2000.
- [12] M. E. J. Newman. Detecting community structure in networks, *Eur. Phys. J. B* 38, 321–330 (2004).
- [13] M. E. J. Newman, Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Phys. Rev. E* 69, 066133 (2004).
- [14] M.S. El Hman, H. Abouaïssa, D. Jolly, and A. Benasser. Simulation hybride de flux de trafic basée sur les systèmes multi-agents. In 6e Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation - MOSIM'06, 2006.
- [15] Najlis, R. and M. J. North, 2004, "Repast for GIS" *Proceedings of Agent 2004 : Social Dynamics: Interaction, Reflexivity and Emergence*, University of Chicago and Argonne National Laboratory, IL, USA.
- [16] Pascal Pons. Détection de structures de communautés dans les grands réseaux d'interactions. *Septièmes Rencontres Francophones sur les aspects Algorithmiques des Télécommunications*. Giens, France, 2005.
- [17] Pascal Pons and Matthieu Latapy, Computing communities in large networks using random walks. *Journal of Graph Algorithms and Applications*. Vol. 10, no. 2, pp. 191-218, 2006.