

Nouvelles approches ergonomiques de la cartographie des risques industriels

Eliane Propeck-Zimmermann, Thierry Saint-Gérand, Emmanuel Bonnet

Université de Strasbourg

Laboratoire Image, Ville, Environnement – ERL 7230 CNRS

Université de Caen Basse Normandie

GEOSYSCOM – UMR IDEES 6266 CNRS

Résumé.— Les cartes actuelles présentent des insuffisances pour une gestion territoriale des risques industriels. En redéfinissant le concept de « situation à risques » et en l'implémentant dans un SIG, on peut disposer à la demande d'informations riches et variées : cartes analytiques, de synthèse, typologies, requêtes spatiales diverses. Les recherches en cours visent à développer une interface ergonomique pour faciliter la concertation entre différents acteurs.

Cartographie • Concertation • Enjeux • Risques industriels • Situation à risques • SIG • Vulnérabilités

Abstract.— New ergonomic approaches to mapping industrial hazards.— Current maps are inadequate for territorial management of industrial hazards. By redefining the concept of a "hazardous situation" and implementing it in a GIS, it is possible to obtain a variety of detailed information on demand: analytical maps, synthetic maps, typologies and various spatial requests. Research is underway to develop an ergonomic interface to facilitate consultation between different actors.

Consultation • GIS • Hazardous situation • Industrial hazards • Issues • Mapping • Vulnerability

Resumen.— Nuevas aproximaciones ergonómicas a la cartografía de los riesgos industriales.— Los mapas actuales son insuficientes para un manejo territorial de los riesgos industriales. Con una nueva definición del concepto de « situación de riesgos » integrada a un SIG, se puede contestar varias y numerosas preguntas: mapas analíticos, sintéticos, tipologicos y varias solicitudes espaciales. Las investigaciones en curso tratan de desarrollar un interfaz ergonómico para facilitar la concertación entre distintos actores

Cartografía • Concertación • Riesgos industriales • Situación de riesgos • SIG • Vulnerabilidade

es risques industriels dont il est question ici se rapportent à des phénomènes soudains et brutaux, de type incendie, explosion, propagation accidentelle d'un nuage toxique, qui peuvent avoir des conséquences très graves sur la population, ses biens, le fonctionnement d'une agglomération du fait de l'étroite imbrication des installations dangereuses dans des tissus urbains denses.

La prise en compte de ces risques dans l'aménagement, introduite dans la loi de 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la prévention des risques majeurs et à la protection de la forêt contre l'incendie, puis dans la directive européenne « Seveso II » de 1996, s'est faite en France selon une approche très marquée en termes

d'aléa (délimitation de zones de danger) et de remise en cause ou révision de projets d'aménagement dans ces périmètres. Aujourd'hui se développe une gestion plus territorialisée de ces risques (Trémolières et al., 2005), notamment suite à l'accident de l'usine chimique AZF de Toulouse en 2001 (CIEU, 2002) et la mise en place des plans de prévention des risques technologiques (PPRT) édictés par la loi du 30 juillet 2003 dite «loi Bachelot ». Parmi les nombreuses difficultés que la gestion des risques crée pour les sociétés contemporaines, deux sont particulièrement pré-gnantes pour l'aménagement territorial: d'une part, le degré élevé d'incertitude quant au déclenchement (moment, lieu, nature et intensité) de l'événement redouté et, d'autre part, le flou des connaissances sur les caractéristiques de l'espace suscep-tible d'en être affecté. Une gestion efficace des risques (qu'ils soient technologiques ou naturels), sur un territoire, implique d'évaluer de façon intégrée les conjonctions des différents paramètres d'aléas et de vulnérabilités pour caractériser les diverses configurations et leurs évolutions, et décider des mesures préventives adaptées.

1. Risques industriels : les insuffisances des documents cartographiques actuels

Les différents modèles d'évaluation et de cartographie des risques développés par la sphère institutionnelle ou dans le cadre de programmes de recherche présentent des insuffisances et ne permettent pas une véritable gestion territoriale des risques.

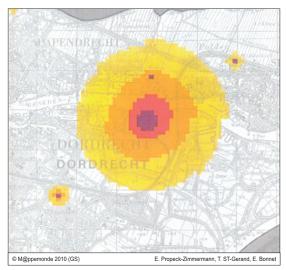
1.1. Cartographies issues des approches traditionnelles

Une première approche des risques, fondée sur l'analyse de la gravité des accidents possibles, appelée « déterministe », a fait appel à une modélisation vectorielle des objets spatiaux: les zones d'effets (mortalité, blessures graves) des accidents potentiels (incendie, explosion et toxicité) sont matérialisées sous forme de cercles et superposées aux objets potentiellement vulnérables (fig. 1a). Cette méthode, basée uniquement sur des distances de danger, est simple à mettre en œuvre et à expliquer, mais présente trois inconvénients: les cartes expriment un « danger », non un risque (les probabilités n'étant pas prises en considération) (1); elles offrent une vision binaire des espaces exposés: présence/absence de danger alors que l'espace à risque est un continuum différencié avec des gradients et des nuances; enfin les cartes obtenues par simple superposition de couches monothématiques aléas/enjeux ne permettent pas de dégager des synthèses utiles à la prise de décision: en effet, comment visualiser simultanément et clairement des objets ou phénomènes ayant chacun une implantation surfacique (superposition de périmètres à risques de nature et d'intensité variables, densité de population, type de bâti...)?

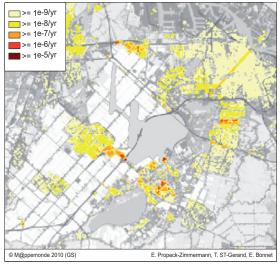
Une deuxième approche, développée à partir des années 1980 dans les pays anglophones, appelée « probabiliste », est basée sur une modélisation matricielle. Un niveau de risque est évalué dans chaque maille d'une grille par le cumul des probabilités de tous les accidents pouvant affecter ce lieu et causer la mort d'une personne présente (risque individuel appelé risque localisé, fig. 1b) ou d'un groupe de personnes (risque sociétal encore appelé perte de vie potentielle, fig. 1c). Cette méthode plus élaborée offre une information plus synthétique par le couple probabilité*gravité mais rend opaque l'ensemble des facteurs d'aléas (leur nature notamment) et elle est basée sur un seul critère de gravité: la mortalité en général.

© M@ppemonde 2010 (GS) E. Propeck-Zimmermann, T. ST-Gerand, E. Bonnet

1a. Zones d'effets (mortalité et blessures graves) (données fictives)



1b. Risque localisé autour d'une installation industrielle (Source : IMZS, 1991)

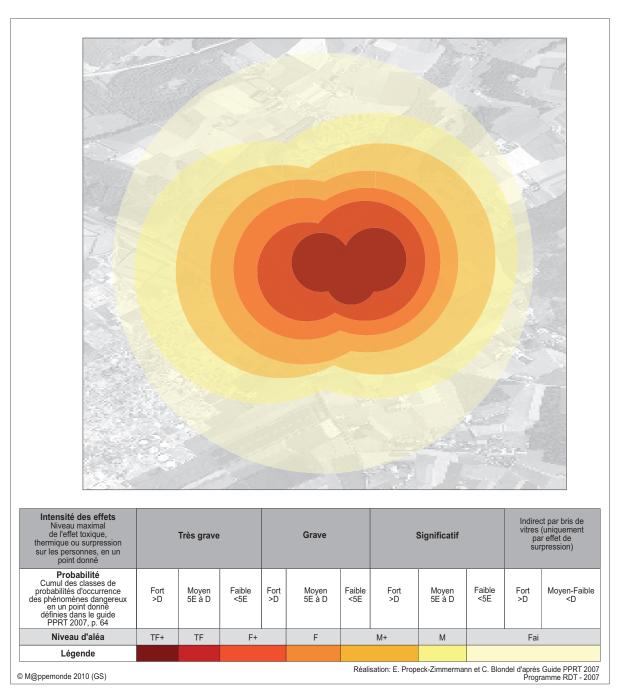


1c. Risque sociétal autour d'un aéroport - Probabilité de plus de 10 victimes. (Source: RIVM – Pays-Bas)

1. Modélisation vectorielle et modélisation matricielle des risques

1.2. Approche intermédiaire probabiliste/déterministe

Après l'accident AZF de Toulouse et en vue de la mise en place des PPRT, une nouvelle méthode de cartographie de « niveaux d'aléas » a été élaborée récemment par l'INERIS (dans un guide méthodologique de prévention des risques technologiques, MEDED, 2007). Il s'agit d'une carte fondée sur l'intensité des effets pondérée par les probabilités d'occurrence des événements dangereux (Gaston et al., 2003; Couronneau, 2004; Propeck et al., 2007). La cartographie des zones d'aléas se fait par type de risque (incendie, explosion, toxicité) et une distinction est faite entre les phénomènes dangereux à cinétique rapide et ceux à cinétique lente (2). Un niveau d'aléa, pour les phénomènes à cinétique rapide, est calculé en chaque point de l'espace, au sein du périmètre d'exposition, à partir d'un niveau d'intensité maximal des effets attendus en ce point (seuils d'effets très graves, graves ou significatifs pour la vie humaine) et du cumul des probabilités d'occurrence des accidents atteignant ce niveau d'intensité en ce point, des règles de cumul des probabilités avant été spécifiquement établies. Un niveau d'aléa très fort plus (TF+) est ainsi défini par un effet potentiel très grave sur la population (effet de mortalité) et un cumul de probabilités d'accident condui-sant à cet effet, élevé (classe >D). Il signifie ainsi une probabilité élevée d'être affecté par un effet très grave pour la vie humaine (fig. 2). On obtient une information à la fois plus nuancée et plus explicite (les niveaux d'intensité et de probabilité sont exprimés) sur les aléas dans l'espace, dépassant la vision réductrice qu'offrait l'ancienne démarche purement déterministe. En revanche, la caractérisation des enjeux et vulnérabilités et leur croisement avec les aléas demandent encore des développements spécifiques.



2. Cartographie de niveaux d'aléas selon une démarche intermédiaire déterministe/probabiliste

1.3. Approche combinée et cartographie de synthèse

Le programme de recherche européen ARAMIS (3) a eu pour but de développer une approche « globale » d'évaluation des risques d'installations industrielles intégrant les critères des deux approches précédentes. Elle a conduit à une cartographie de synthèse où un niveau de risque est évalué dans chaque maille d'une grille autour d'une installation par l'agrégation d'un indice de sévérité (S) ou fréquence (F) relatif aux aléas et d'un indice de vulnérabilité (V). Il s'agit d'indices composés et multi-dimensionnels. L'indice global de vulnérabilité, par exemple, met en œuvre le développement de fonctions de vulnérabilités par une approche matricielle, la pondération des vulnérabilités à l'aide d'une méthode multicritères d'aide à la décision

(méthode AHP de Thomas L. Saaty) basée sur le jugement d'experts, et de facteurs quantitatifs permettant de quantifier la présence des différents enjeux dans le secteur d'étude (4). Cette démarche, globale mais complexe, confronte le chercheur au problématique choix des facteurs de pondération des critères retenus (Cutter et al., 2000).

Les cartes de synthèse hiérarchisent des niveaux de risque (fort, moyen, faible) dans l'espace et indiquent un éventuel ordre de priorité des secteurs à traiter. Mais ces cartes dissimulent la combinaison spatiale des différents facteurs ayant conduit à un niveau donné, et qui demandent des mesures spécifiques.

1.4. Mise en place des PPRT et nouveaux besoins en information territoriale

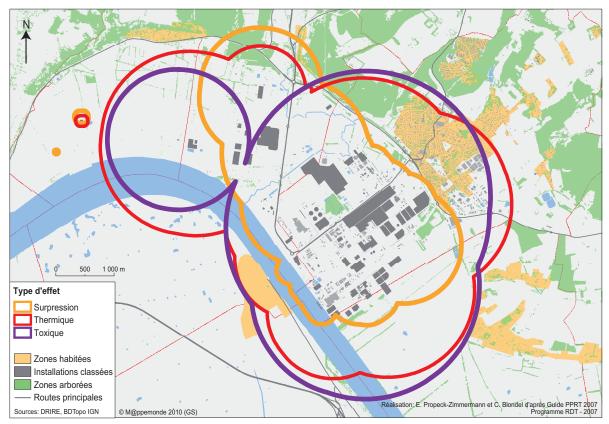
L'objectif des plans de prévention des risques technologiques est non seulement d'empêcher les situations à risques de s'aggraver mais également de remédier aux situations déjà graves. Plusieurs dispositions sont prévues à l'intérieur d'un périmètre d'exposition en rapport avec l'étude de dangers: interdiction de construire, droit de préemption urbain, droit d'expropriation, droit de délaissement, prescriptions techniques pour renforcer la protection des bâtiments... La mise en place des PPRT demande ainsi une évaluation plus précise et plus modulée des risques dans l'espace pour ajuster au mieux mesures de sécurité et utilisation du sol autour des installations. Il s'agit de caractériser des sous-ensembles de niveaux différents de risques par croisements des paramètres d'aléas, d'enjeux et de vulnérabilités, au sein d'une enveloppe globale d'exposition potentielle.

De nouvelles méthodes d'intégration et de modulation des différents facteurs du risque sont, dans ce cadre, nécessaires pour éclairer la concertation entre tous les acteurs et apporter une aide à la prise de décision. Pour ce faire, nous avons privilégié et développé le concept de « situation à risques » fondé sur la prise en considération des combinaisons géographiques.

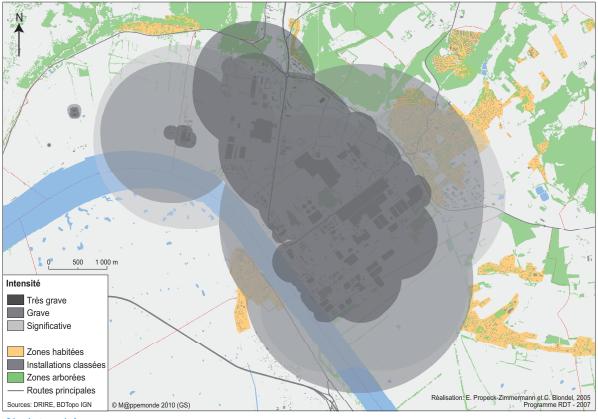
2. « Situation à risques » : constituants de base et échelles d'analyse

Une « situation à risques » est définie comme la combinaison et la variation, sur une entité spatiale, des différents « potentiels » d'aléas, d'exposition, d'enjeux, de vulnérabilités et de résilience. Caractériser et évaluer les situations à risques consiste ainsi à identifier et à localiser les éléments rattachés aux concepts de base et à expliciter la diversité spatio-temporelle de leurs combinaisons.

L'aléa est entendu comme la probabilité d'occurrence d'un événement pouvant entraîner des effets dommageables dans une aire donnée. L'enjeu définit tout ce qui peut subir des dommages ou dysfonctionnements et fait référence à la composition et au fonctionnement global du territoire (population, bâti, milieu naturel, transport...). La vulnérabilité exprime la propension des enjeux à subir des dommages et la capacité à retrouver une situation d'équilibre appelée résilience. L'exposition dépend en premier lieu de la localisation des enjeux par rapport aux aléas, elle dépend aussi de facteurs de protection (présence ou absence d'abri), ainsi que du temps de présence de l'élément dans la zone d'aléa.

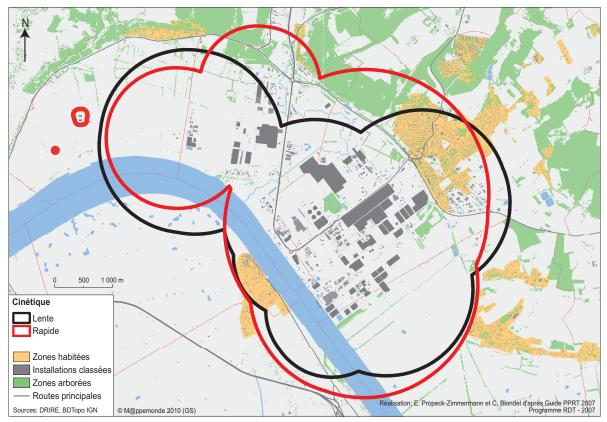


3a. Nature

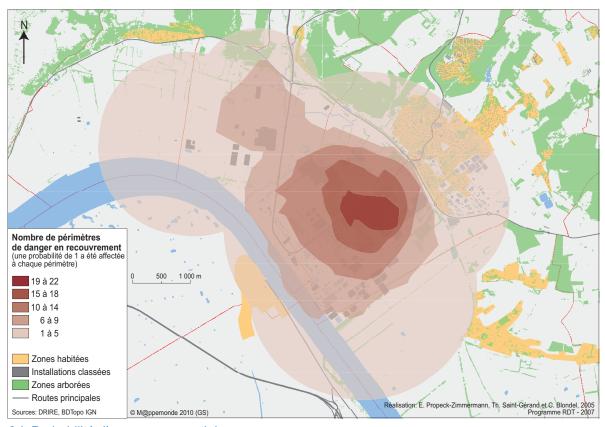


3b. Intensité

3. Caractérisation des aléas — zone industrielle de Port-Jérôme (Seine-Maritime)



3c. Cinétique



3d. Probabilité d'occurrence spatiale

3. Caractérisation des aléas — zone industrielle de Port-Jérôme (Seine-Maritime)

Une expérimentation a porté sur le site industriel de Port-Jérôme (commune de Notre-Dame-de-Gravenchon, Seine-Maritime) qui regroupe neuf établissements Seveso dans les domaines du raffinage, de la chimie, du gaz, à proximité immédiate d'une population de 10 000 habitants (Propeck et al., 2002) (http://www.mgm.fr/PUB/ Mappemonde/Mappe102.html). Une base de données a été élaborée en référence à un modèle conceptuel de données (HBDS, Hypergraph Based Data Structure) (Bouillé, 1977; Saint-Gérand, 2005; Propeck et al., 2008). Elle repose sur le couplage de référentiels nationaux multi-échelles (BD Topo de l'IGN, orthophotoplans, plan cadastral numérisé) avec des bases de données propres aux institutions (DRIRE, DDE, INSEE bases ILOTS, chambre de commerce, collectivités locales...). Des données complémentaires portant sur les vulnérabilités ont été collectées directement sur le terrain ou numérisées à partir de divers documents. Les domaines d'aléas, expo-sition, enjeux, vulnérabilités se concrétisent dans l'espace par des objets, des flux, et des états spécifiques susceptibles — au moins en principe d'être renseignés. Les capacités d'anticipation, de réaction et de récupération, ayant trait à la résilience font appel, en revanche, à des indicateurs difficilement objectivables a priori.

2.1. Spatialiser les aléas

La caractérisation des aléas pour une gestion territoriale des risques nécessite de prendre en considération trois échelles d'analyse: l'installation (unité de production, stockage), l'établissement (usine comprenant plusieurs installations) et la zone industrielle (regroupant plusieurs établissements). À chacune de ces échelles, les aléas sont caractérisés par quatre critères: la nature des effets, leur intensité, leur probabilité et la cinétique des accidents (fig. 3).

Pour chaque installation un périmètre à risques est défini en fonction de la nature et de la quantité des produits manipulés ou stockés et des scénarios d'accidents identifiés. La nature des effets est représentée par trois enveloppes correspondant aux effets thermiques, de surpression et de toxicité pour des seuils d'intensité donnée. Les zones d'intensité correspondent à l'enveloppe des périmètres de dangers dont les seuils — de flux thermique, de surpression et de concentration toxique — engendreraient des conséquences très graves (mortalité), graves (blessures irréversibles) ou significatives (blessures) sur la population. Les zones de probabilités d'atteinte d'un lieu sont obtenues en cumulant en chaque point la probabilité des différents scénarios d'accident atteignant ce lieu (cette probabilité est affectée aux périmètres de danger d'une intensité donnée). À ces probabilités d'accidents peuvent être ajoutées les probabilités météorologiques d'atteinte d'un lieu. La cinétique des phénomènes dangereux est représentée par l'enveloppe des scénarios à cinétique lente et ceux à cinétique rapide; la majorité des phénomènes est à cinétique rapide, c'est-à-dire que la rapidité de déclenchement de l'événement ne permet pas la mise en œuvre de mesures de sécurité suffisantes, dans le cadre d'un plan d'urgence externe, avant l'atteinte des personnes exposées à l'extérieur de l'installation (MEDED, 2007). Ce sont les probabilités qui posent particulièrement problème (Propeck et al., 2007) car indisponibles ou incomplètes, les méthodes de calculs sont par ailleurs hétérogènes et il reste toujours une part irréductible d'incertitude (comme l'a montré l'accident AZF de Toulouse où le scénario d'accident survenu n'était pas modélisé dans l'étude de danger). En effet, vu la complexité des systèmes, l'analyse des risques menée par l'industriel dans le cadre de l'étude de danger de son établissement présente de nombreuses incertitudes. Différentes méthodes d'analyse systématique des risques sont utilisées (check-list, HAZOP — A guide to hazard and operability studies, arbres de défaillances, arbre d'événements...) pour identifier les causes des défaillances, la dynamique des éléments en interaction et les moyens de mitigation des événements susceptibles de se produire. Cependant, l'identification des accidents potentiels, l'estimation de leurs probabilités et conséguences comprennent une part de subjectivité qui découle «d'hypothèses retenues parmi d'autres, de calculs partant de présuppositions, de mesures qui ne reflètent pas la réalité, l'objet étant trop complexe pour être mesurable » (Denis, 1998). Il importe donc en amont, dans le cadre de l'analyse des risques, de préciser clairement les présupposés et de déterminer les incertitudes des estimations. Ceci est crucial à l'échelle d'une zone industrielle où une harmonisation est nécessaire et où il s'agit également de prendre en compte les effets dominos comme le préconise la directive Seveso II. En aval, des recherches demandent à être développées pour exprimer cartographiquement ces incertitudes. De nouvelles formes d'expression cartographique ayant recours par exemple à la théorie des ensembles flous restent à développer.

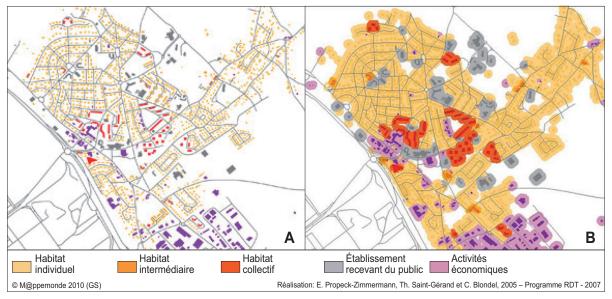
Comme nous l'avons vu plus haut, une nouvelle méthode de cartographie de « niveaux d'aléas » a été élaborée récemment par l'INERIS, dans le cadre des PPRT: carte de synthèse basée sur l'intensité des effets pondérée par les probabilités d'occurrence des événements dangereux. Un niveau d'aléa très fort correspond ainsi à un effet potentiel très grave sur la population (mortalité) et un cumul des probabilités d'accident élevé (MEDAD, 2005). Des mesures différenciées et hiérarchisées sont préconisées pour ces différents niveaux. On obtient ainsi une information plus synthétique sur les aléas dans l'espace. Cependant, la part d'incertitude, d'une part, et la recherche de mesures ciblées dans l'espace pour réduire les risques, d'autre part, justifient que dans le cadre de la concertation les acteurs aient accès à l'ensemble des quatre critères (nature, intensité, probabilité et cinétique des accidents) aux trois échelles d'analyse (installation, établissement, zone industrielle).

2.2. Spatialiser les enjeux

La caractérisation des enjeux nécessite de prendre en considération deux échelles d'analyse: celle de l'élément exposé (le bâtiment, tronçon de route...) qui constitue l'entité de base sur laquelle vont porter concrètement les décisions et celle d'ensembles urbains homogènes (zonages définis sur critères morphologiques ou fonctionnels) qui constituent des mailles d'aménagement à l'échelle urbaine. La démarche a consisté à localiser les enjeux, à les quantifier et à estimer leurs vulnérabilités à chacune de ces échelles d'analyse. Ceci demande un travail de « déconstruction » à l'échelle du bâtiment de données collectées initialement dans des périmètres techniques ou administratifs (îlots, IRIS, etc.) non adaptés à notre problématique, et de « reconstruction » au sein des zones d'aléas et même au-delà, des ensembles homogènes basés sur des critères de vulnérabilité (même usage et morphologie du bâti). La recherche a été focalisée dans un premier temps sur les enjeux humains dans la mesure où les PPRT visent principalement la protection des personnes.

Localisation de la population

Les objets spatiaux caractérisés par la présence de la population sont de trois types: les bâtiments (population relevée au domicile, au lieu de travail et dans les établissements recevant du public), les axes de communication (population relevée dans les moyens de transport) et les espaces ouverts publics (population localisée lors d'activités de sport, de loisirs et rassemblements divers). Une typologie des bâtiments d'habitation a été effectuée par la méthode des nuées dynamiques en prenant en considération des indicateurs de taille et de forme (Cauvin, Rimbert, 1976). La délimitation des ensembles homogènes des éléments exposés, basés sur des critères de vulnérabilité (même usage et morphologie du bâti) a fait appel à des traitements relevant de la statistique de voisinage (Tomlin, 1990): un résultat optimal est obtenu avec la méthode des voisins dominants dans un rayon de 15 cellules avec une résolution 2 mètres (fig. 4). Ces traitements ont été réalisés dans le cadre d'une Géodatabase ARCGIS/Arcinfo, et des outils du module « Spatial Analyst ».



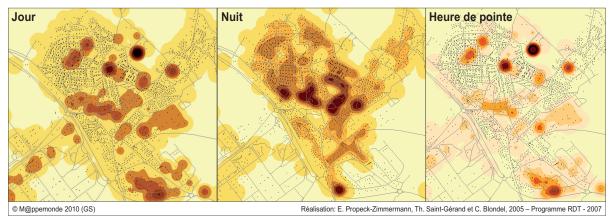
- 4. Localisation de la population (Notre-Dame-de-Gravenchon)
- A- Différenciation des lieux avec présence de population
- B- Ensembles homogènes par la méthode des voisins dominants

Densité spatio-temporelle de la population

Un niveau d'enjeu est défini par le nombre plus ou moins grand de personnes présentes en un lieu à un moment donné. Les données de population recueillies par îlots doivent être retraitées en cohérence avec les zones homogènes définies plus haut. L'objectif est d'estimer un nombre moyen de personnes par « bâtiment » en fonction de son type et de sa morphologie, à différents moments afin de pouvoir utiliser cette donnée élémentaire selon différents découpages de l'espace (périmètres d'aléas) en zones homogènes. La démarche consiste à procéder à une décomposition (ventilation des données INSEE aux bâtiments) suivie d'une recomposition (construction de surfaces de densité de population). Différentes méthodes d'estimation de la population selon le type de forme urbaine et à l'aide d'outils SIG ont déjà été testées et comparées, notamment des méthodes de ventilation des données INSEE (Weber et al., 1993 ; CETE Normandie-Centre, 2005 ;

Bourcier, Mallet, 2006). La solution a consisté ici à ventiler les données de population de l'îlot au bâtiment d'habitation en fonction de la surface habitable (entendue comme la surface au sol multipliée par le nombre de niveaux).

Les surfaces de densité de population ont été construites avec la méthode de densité par « noyaux » (Duda, Hart, 1973) qui consiste, à partir d'un semis de points valués (centroïdes des bâtiments et nombre d'habitants associé), et à calculer par interpolation une densité (de population) dans chaque maille de la surface (5) (fig. 5). Les cartes obtenues offrent une représentation de la répartition de la population bien plus précise que la carte choroplète autorisée par îlot.



5. Répartition spatio-temporelle des populations (Notre-Dame-de-Gravenchon)

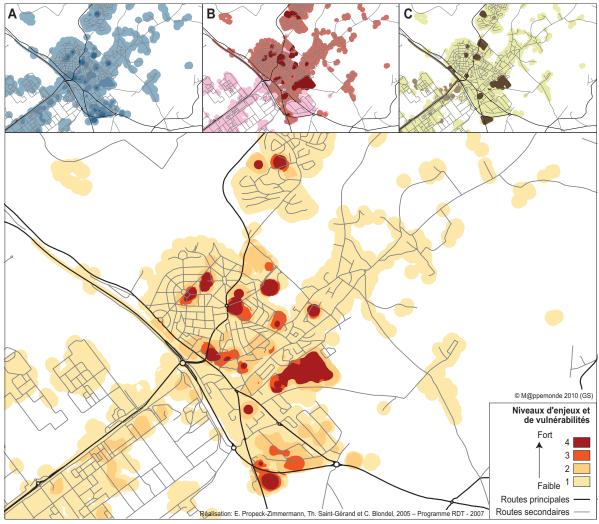
Ce type de représentation de la répartition de la population aux heures de pointe implique de disposer des données de flux sur les axes routiers. À défaut de données précises à l'heure actuelle, la carte simule la répartition de la population aux heures de pointe à partir des lieux «émetteurs» ou «récepteurs» de populations le soir (16h-19h), nommés points «chauds»: écoles, activités, commerces, centres sportifs... (via un calcul de densité par interpolation comme précédemment).

2.3. Spatialiser les vulnérabilités

La vulnérabilité des populations est définie principalement à travers, d'une part, la sensibilité physique à un effet donné dépendant essentiellement de l'âge, de la mobilité et de l'autonomie des personnes (Établissement recevant du public, ERP, avec présence de jeunes enfants, personnes âgées, malades, détenus...) et, d'autre part, du niveau de protection — ou exposition — des populations (présence ou non d'abri, qualité de l'abri, éventuellement présence d'écran entre la source de danger et une personne en un lieu). Des couches d'information se rapportant à ces deux critères prioritaires ont été élaborées à l'échelle du bâtiment, et des ensembles homogènes (méthode des voisins dominants exposée précédemment) (fig. 6).

2.4. Spatialiser la résilience : les facteurs d'anticipation, de réaction et de récupération

Il s'agit là de critères souvent bien plus subjectifs que précédemment faisant intervenir des facteurs cognitifs, politiques, institutionnels... Les facteurs cognitifs et socioéconomiques conditionnent l'attitude des populations vis-à-vis du risque, influant sur la réaction au moment de l'accident, sur la récupération après accident et sur l'appropriation des stratégies territorialisées de gestion des risques (Burton *et al.*, 1978; Thouret, D'Ercole, 1996; Veyret, Reghezza, 2006; Flanquart *et al.*, 2007).



6. Cartographie de synthèse des enjeux et des vulnérabilités (Notre-Dame-de-Gravenchon) Population : A- Densité, B- Sensibilité, C- Protection

La prise en considération de ces facteurs dans la gestion des risques reste complexe. Elle suppose de mener des enquêtes approfondies selon un protocole d'échantillonnage spatial permettant leur confrontation avec les autres facteurs du risque (Bonnet, 2002; Beck, Glatron, 2006). Ces facteurs cognitifs sont d'autre part à mettre en relation avec l'évaluation des facteurs organisationnels (alerte, moyen de secours, coordination des intervenants...) (D'Ercole, 1994). Au-delà de la distribution des équipements de secours (localisation des casernes de pompiers, sirènes, centres médicaux, lieux de rassemblement...), des investigations en cours portent sur l'évaluation de la performance du réseau de circulation pour l'acheminement des secours ou l'évacuation.

La mise en cohérence des données représente un travail long et minutieux mais conduit à la production d'informations de synthèse ou de requêtes ciblées pour caractériser des situations à risques.

3. Situation à risques : des cartes de synthèses aux combinatoires de risques

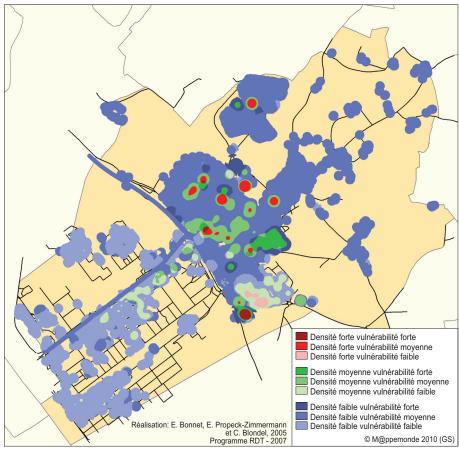
Les couches d'information précédentes rendues comparables peuvent être combinées — soumises notamment aux méthodes d'algèbre de cartes — pour produire de nouvelles informations. Une carte de synthèse a ainsi été élaborée par la combinaison dans chaque maille d'un niveau d'enjeu (densité de population) et d'un cumul des facteurs de vulnérabilité associés (sensibilité et protection de la population). Chaque facteur comprend trois classes: fort (3), moyen (2) et faible (1). Un coefficient plus fort a été attribué à la densité de population considérée comme le facteur majorant d'une situation à risque: fort (9), moyen (6) et faible (3). Le niveau de vulnérabilité est obtenu par addition des trois facteurs selon une dé-marche parallèle à l'évaluation des niveaux d'aléas mentionnés plus haut (tableau 1).

Tableau 1. Méthodologie de hiérarchisation des enjeux et vulnérabilités									
Niveau de densité de la population	Fort (9)			Moyen (6)			Faible (3)		
Cumul des facteurs de vulnérabilité	Fort	Moyen	Faible	Fort	Moyen	Faible	Fort	Moyen	Faible
Sensibilité de population	(3)	(2)	(1)	(3)	(2)	(1)	(3)	(2)	(1)
Niveau d'exposition (vs protection)	(3)	(2)	(1)	(3)	(2)	(1)	(3)	(2)	(1)
Niveau d'enjeu et de vulnérabilité	Fort +		Fort			Moyen			Faible

Un niveau de vulnérabilité combiné à un niveau d'aléa permet même de déterminer en chaque point un niveau de risque.

Les cartes de synthèse sont utiles pour repérer les lieux où les risques et les vulnérabilités sont les plus élevés au regard de l'ensemble des facteurs considérés. Cependant, à un même niveau de risques peuvent correspondre différentes situations qu'il faut néanmoins identifier afin de pouvoir prendre les mesures de prévention et de protection adéquates. La phase suivante, et essentielle de la procédure, consiste alors à utiliser pleinement l'interactivité et la souplesse des SIG pour retrouver les combinatoires et construire à la demande la sélection, la combinaison ou l'ensemble des couches cartographiques élémentaires pertinentes pour éclairer la concertation. La carte de typologie de la figure 7, construite par requêtes spatiales (calculatrice raster), a pour but d'apporter un premier élément de réponse à la question suivante : un niveau global d'enjeux et de vulnérabilités à un endroit et un jour donnés, est-il davantage lié à la présence d'un enjeu fort (forte densité de population) ou à des vulnérabilités particulièrement élevées (sensibilité de la population/protection en un lieu)?

Les couleurs rouges correspondent aux densités de population les plus fortes. Elles sont couplées très souvent à des vulnérabilités élevées de par la présence d'établissements d'enseignement, de commerces, ou d'un camping au sud. Les niveaux intermédiaires en vert, de densité moyenne, correspondent à des terrains de sport de plein air (parfois liés à des établissements scolaires) ou à de l'habitat collectif. Le bleu correspond aux faibles densités de population sur la majeure partie



7. Typologie des enjeux et vulnérabilités, commune de Notre-Dame-de-Gravenchon (Seine-Maritime)

de la commune de Notre-Dame-de-Gravenchon, du fait de la présence de nombreux lotissements d'habitat individuel mitoyen et d'une zone industrielle très étendue. Ces faibles densités sont couplées le plus souvent à une vulnérabilité moyenne qui correspond à des personnes protégées au lieu d'habitat ou d'activité.

Diverses cartes de typologie peuvent être réalisées en fonction des besoins. Elles peuvent porter sur un, plusieurs ou la totalité des critères de risques, sur l'ensemble de l'espace exposé ou un périmètre d'aléa spécifique. Elles font appel à des requêtes multicritères qui demandent cependant un certain nombre de manipulations et le résultat n'est pas immédiat. Il s'agit, par ailleurs, de construire la symbologie adaptée à chaque thème et adaptée à la communication.

4. Bilan d'expérience et nouvelles perspectives : des SIG comme support de concertation ?

Le concept de « situation à risques » et son implémentation dans un SIG avec différents protocoles d'analyse spatiale ont permis de développer une approche à la fois globale et détaillée d'analyse des risques et de proposer aux gestionnaires différents niveaux d'information cartographique qui sont utiles à la concertation et à la prise de décision dans le cadre des PPRT, mais aussi, plus généralement, dans le cadre de leurs politiques de prévention, d'information et de gestion des risques liés aux activités industrielles. En effet, à partir d'une base de données adéquate, les productions cartographiques sont nombreuses. À un premier niveau, des cartes

descriptives permettent d'identifier et de localiser les zones d'aléas, l'extension et l'intensité des effets potentiels, les établissements sensibles, la répartition spatio-temporelle de population, ses différentes formes de vulnérabilités, les structures impliquées dans la gestion des risques... Différents modes de représentation peuvent être proposés: ponctuels ou surfaciques, cartes choroplètes ou par carroyage. Ce dernier mode de représentation, qui consiste à changer de base spatiale (création d'entités nouvelles que sont les mailles d'un carroyage), a été indispensable, dans un deuxième temps, pour croiser différentes cartes de base et opérer des calculs conduisant à des cartes de synthèse ou de typologie, ou pour réaliser des emboîtements de requêtes.

La démarche adoptée a ainsi permis d'asseoir les bases scientifiques de construction d'un outil cartographique de concertation et d'aide à la décision destiné aux gestionnaires des risques. Cependant, si les SIG offrent de fortes capacités d'analyse spatiale pour identifier et évaluer les situations à risques sur un territoire, des limites apparaissent quant à l'appropriation de ces outils par les acteurs et leur utilisation au stade de la concertation: l'interface est trop complexe pour être accessible aux différents partenaires. De nombreuses requêtes sont possibles mais demandent une bonne connaissance de la base de données, la maîtrise du langage SQL d'interrogation. La séquence des opérations peut s'avérer longue pour répondre à des requêtes plus complexes. Une première solution consiste à auto-enregistrer des séquences d'opérations et à visualiser directement les résultats sur une carte. Cette solution type « tableaux de bord » demande cependant de prédéfinir l'ensemble des requêtes d'acteurs qui peuvent bien sûr évoluer au fil des discussions. Une deuxième solution consiste à adjoindre au SIG un module additionnel plus performant pour l'interrogation de la base de données à des fins décisionnelles. Depuis une dizaine d'années se développe la technologie SOLAP (Spatial On-Line Analytical Processing) issue de l'Informatique décisionnelle, spécialement conçue pour supporter l'exploration interactive facile et rapide des données spatio-temporelles (Bédard, 2004; Proulx, Bédard, 2004) (6).

Par ailleurs, la technologie SIG ne limite plus aujourd'hui ses composants aux classiques entités cartographiques ou aux enregistrements de bases de données. Elle permet d'indexer géographiquement bien d'autres types d'entités (textes, tableaux, graphiques, photographies, sons, images vidéo...) supports d'une information complémentaire, extra-cartographique certes, mais pertinente pour une concertation PPRT (statistiques locales, visualisation du paysage urbain en 3D, article réglementaire en vigueur localement, etc.) ou la coordination des opérations d'intervention. Divers prototypes sont en projet, certains même ont déjà fait leurs preuves comme l'applicatif orienté spécifiquement intervention développé au SDIS 29 à Brest à l'initiative du lieutenant colonel Hervé Mahoudo à partir de logiciels libres (Mahoudo, 2008), ou le projet pilote de Géoconférence développé au ministère de la Sécurité civile du Qué-bec visant, sur la base de partage de l'information spatiale multi-source par web, à améliorer la communication et la coordination des opérations en cas de situation critique.

Conclusion

La recherche de nouvelles formes de cartographie pour une gestion territoriale des risques nous a amené à privilégier et à revisiter le concept de « situation à risques ». Son implémentation dans un SIG a permis de montrer la diversité et la richesse des informations produites pour aider à la concertation et à la prise de décision dans le domaine des risques industriels: cartes analytiques, de synthèse, typologies, requêtes spatiales multiples.

Il reste cependant à développer une véritable interactivité rapide et non réductrice, aisément accessible à l'ensemble des partenaires impliqués dans les discussions quel que soit leur niveau d'expertise. Des recherches visent à développer une interface ergonomique de requêtes cartographiques dynamiques pour une concertation multi-acteurs. L'interface SOLAP peut s'avérer intéressante pour explorer facilement et rapidement les différents facteurs et faciès du risque, un prototype dédié aux risques industriels est en cours de développement. Par ailleurs, les cartes thématiques de synthèse ou d'analyse sur support fixe (papier ou écran) ne suffisent plus pour prendre en compte la complexité spatiale des risques sur le terrain. De nouveaux développements permettront d'ouvrir à la communication et à la concertation l'accès à toutes formes d'information spatiale, depuis les plus classiques (tableaux, cartes, graphiques) toujours utiles, jusqu'aux plus innovantes (imagerie 3D, photos, vidéo, animations) via des SIG multimédia interrogeables en temps réel sur *n* niveaux d'indexation thématique spatiale et temporelle.

Pour que ces nouveaux outils puissent être facilement appropriés par l'ensemble des utilisateurs, il faut en amont un partenariat étroit avec les acteurs, et, en aval, une pédagogie de l'usage de ces nouveaux modes de communication qui engendrent de fait de nouveaux rapports entre les différents partenaires de la concertation.

Bibliographie

- BECK E., GLATRON S. (2006). « La vulnérabilité socio-spatiale des citadins aux risques majeurs. Mulhouse face aux risques industriel et sismique ». Actes du colloque SAGEO'2006, Strasbourg, 11-13 septembre 2006.
- BÉDARD Y. (2004). « Amélioration des capacités décisionnelles des SIG par l'ajout d'un module *SOLAP* (Spatial On-Line Analytical Processing) ». Séminaire organisé par l'Université Aix-Marseille, École Polytechnique Universitaire de Marseille, filière Génie industriel et informatique.
- BONNET E. (2002). Risques industriels: évaluation des vulnérabilités territoriales. Le Havre: Université du Havre, thèse de doctorat de géographie, 341 p.
- BOUILLÉ F. (1977). Un modèle universel de banque de données simultanément portable, répartie. Paris : Université Pierre et Marie Curie- Paris VI, thèse d'État ès Sciences spécialité Mathématiques, mention Informatique.
- BOURCIER J., MALLET P. (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 Seine: modèle PRET-RESSE». Revue internationale de géomatique, vol. 16/3-4, p. 457-478.
- BURTON I., WHITE G.F., KATES RW, (1978). *The Environment as hazard*. New York: Oxford University Press, 240 p. ISBN: 0-19-502221-1

- CAUVIN C., RIMBERT S. (1976). La Lecture numérique des cartes thématiques. Fribourg: Université de Fribourg, coll. «Les méthodes de la cartographie thématique», 172 p. ISBN: 2-8271-0109-2
- CETE NORMANDIE-CENTRE (2005). Méthodes d'estimations de population. Comparaisons et seuils de validité. Lyon: CERTU, 86 p. ISNN: 1263-2570
- CIEU (2002). «L'explosion de l'usine AZF à Toulouse: une catastrophe inscrite dans la ville». *Mappemonde* n° 65 (1-2002), p. 23-28. http://www.mgm.fr/PUB/Mappemonde/M102/AZF.pdf
- COURONNEAU J.-C. (2004). «La nouvelle approche d'analyse des risques. Principes généraux pour l'élaboration des études de dangers». *Préventique Sécurité*, n° 73, 5 p.
- CUTTER S.L., MITCHELL J.T., SCOTT S.M. (2000). «Revealing the vulnerability of people and place: a case study of Georgetown county, South Carolina». *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 90 n°4, p. 713-737. http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a788975448
- DENIS H. (1998). Comprendre et gérer les risques sociotechnologiques majeurs. Montréal: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 342 p. ISBN: 2-553-00670-5
- D'ERCOLE R. (1994). «Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés: concepts, typologie, modes d'analyse». *Revue de géographie alpine*, n° 4, p. 87-96. http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rga_0035-1121_1994_num_82_4_3776?_Prescripts_Search_isPortletOuvrage=false
- DUDA R., HART P. (1973). *Pattern Classification and Scene Analysis*. New-York, Londres: John Wiley & Sons, coll. «Wiley-interscience publication», 482 p. ISBN: 0-471-22361-1
- FLANQUART H., HELLEQUIN A.P., VALLET P. (2007). « Perception des risques dans un village SEVESO ». Actes du colloque « Santé, Exclusion, Risques et Lieu », Le Havre, 20-21 mars 2007.
- GASTON D., HOURTOLOU D., SALVI O. (2003). «Analyse des risques dans le cadre d'une étude des dangers ». *Préventique Sécurité*, n° 72, 7 p.
- MEDAD (MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES) DIRECTION DE LA PRÉVENTIONS DES POLLUTIONS ET DES RISQUES, DIRECTION GÉNÉRALE DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET DE LA CONSTRUCTION, CERTU, INERIS (2007). Le Plan de prévention des risques technologiques (PPRT). Guide méthodologique. Paris : Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, 152 p. http://catalogue.prim.net/73_leplan-de-prevention-des-risques-technologiques-pprt---quide-methodologique.html
- MAHOUDO H. (2008). « Utilisation d'informations géographiques pour la sécurité civile : une plateforme d'entraînement pour les risques industriels. » École thématique « Modélisation des risques spatialisées », UMR IDEES Le Havre, 30 juin 4 juillet 2008.
- McHugh R., Roche S., Bédard Y. (2007). «Vers une solution SOLAP comme outil participatif». Actes du colloque SAGEO'2007, Clermont-Ferrand, 18-20 juin 2007.
- PROPECK-ZIMMERMANN E., RAVENEL L., SAINT-GÉRAND Th. (2002). « Cartographie des risques technologiques majeurs: nouvelles perspectives avec les SIG». *Mappemonde* n° 65 (1-2002), p. 17-21. http://www.mgm.fr/PUB/Mappemonde/M102/Propeck-Ravenel.pdf

- PROPECK-ZIMMERMANN E., SAINT-GÉRAND T., BONNET E. (2007). «Probabilités, risques et gestion territoriale: champs d'action des PPRT». *Géocarrefour* vol. 82, n° 1-2, p. 65-76. http://geocarrefour.revues.org/index1473.html
- PROPECK-ZIMMERMANN E., SAINT-GÉRAND T., BONNET E. (2008). «Spatialiser et évaluer les situations à risques technologiques: quelles données pour une gestion territoriale?» Actes du colloque SAGEO 2008, Montpellier, 23 p. http://sdh-sageo.teledetection.fr/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=19&Itemid=35
- PROULX M. J., BÉDARD Y. (2004). «Le potentiel de l'approche multidimensionnelle pour l'analyse de données géospatiales en comparaison avec l'approche transactionnelle des SIG». Actes du Colloque Géomatique 2004: Un choix stratégique, Montréal, Québec, 27-28 octobre 2004.
- SAINT-GÉRAND T. (2005). « Comprendre pour mesurer ou mesurer pour comprendre? HBDS: pour une approche conceptuelle de la modélisation géographique du monde réel ». In GUERMOND Y., dir., *Modélisations en géographie:* déterminismes et complexités. Paris: Hermès science publications, coll. « IGET, Série Aménagement et gestion du territoire », 389 p. ISBN: 2-7462-1132-7
- THOURET J.-Cl., D'ERCOLE R. (1996). «Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain: effets, facteurs et réponses sociales». *Cahier Sciences Humaines*, 32 (2), p. 407-422
- TOMLIN C.D. (1990). Geographic information systems and cartographic modelling. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 249 p.
- TRÉMOLIÈRES A., MERAD M., PROPECK-ZIMMERMANN E., SAINT-GÉRAND T. (2005). Major Industrial Risks: Discussions on territorial approach and risk mapping, proc. 28th ESReDA Seminar, Karlstad, Sweden, 14-15 june 2005.
- VEYRET Y., REGHEZZA M. (2006). « Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité ». Annales des Mines, Responsabilité et Environnement n° 43.
- WEBER C., HIRSCH J., SERRADJ A. (1993). «Répartition de la population et structure spatiale de référence». *Mappemonde* n° 4-1993, p. 46-47. http://www.mgm.fr/PUB/Mappemonde/M493/POPULATION.pdf

Notes

- 1. Les zones de danger, pour chaque installation, sont obtenues par modélisation des phénomènes physiques en prenant en considération les scénarios d'accidents les plus graves (accidents peu probables mais néanmoins vraisemblables définis dans un liste ministérielle de référence). La mise en place des PPRT a conduit à remettre en cause cette approche simpliste et à élaborer une nouvelle cartographie des aléas (cf. 2.1. Spatialiser les aléas), en revanche la caractérisation des enjeux et vulnérabilités et leur croisement avec les aléas demandent encore des développements spécifiques.
- 2. La cinétique d'un phénomène est qualifiée de lente, si elle permet la mise en œuvre de mesures de sécurité suffisantes, dans le cadre d'un plan d'urgence externe, avant l'atteinte des personnes exposées à l'extérieur de l'installation (Guide méthodologique des PPRT), ainsi la plupart des phénomènes dangereux sont considérés comme des accidents à cinétique rapide, il n'y a guère que le scénario du *boil over* qui est à cinétique lente.
- 3. ARAMIS: Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS in the frameword of Seveso II directive (http://aramis.jrc.it) 2002 / Méthode d'anlyse des risques et expertise commune Analyse des risques
- 4. Calcul de l'indice de vulnérabilité : Vglobale = α . VHumaine + γ . VEnvironnementale + β . VMatérielle , où α , γ et β représentent les facteurs de pondération des types de vulnérabilité par rapport à la

vulnérabilité globale, chaque type de vulnérabilité étant décliné en d'autres fonctions tenant compte de la part de chaque type d'effet (thermique, surpression, toxicité) et de chaque type d'impact (sanitaire, économique, psychologique). Au total près de 52 fonctions conduisent *in fine* à la fonction de la vulnérabilité globale.

- 5. Cette méthode est mise en œuvre à l'aide du module « Spatial Analyst » du logiciel ArcGis : la procédure implique de définir un rayon de calcul et la taille de la maille du grid de sortie ; à partir de chaque point valué, les valeurs de population sont sommées dans le cercle de calcul défini et divisé par l'aire pour calculer une valeur de densité dans chaque maille ; une pondération est opérée du centre vers la périphérie.
- 6. L'outil SOLAP a été développé dans la Chaire de recherche CRSNG en bases de données géospatiales décisionnelles dirigé par le Dr Yvan Bédard (Centre de recherche en géomatique de l'université Laval à Québec) et commercialisé par la société Intelli³. Des prototypes ont été élaborés dans différents domaines: gestion des risques d'érosion des berges (McHugh *et al.*, 2007), inventaire forestier, sécurité civile, (www.spatialbi.com)

Adresses des auteurs

Eliane Propeck-Zimmermann, Université de Strasbourg, Laboratoire Ville, Image, Environnement (LIVE) - ERL 7230 CNRS. Courriel: eliane.propeck@live-cnrs.unistra.fr

Thierry Saint-Gérand, Université de Caen Basse Normandie, GEOSYSCOM – UMR IDEES 6266 CNRS. Courriel: thierry.saint-gerand@unicaen.fr

Emmanuel Bonnet, Université de Caen Basse Normandie, GEOSYSCOM – UMR IDEES 6266 CNRS. Courriel: emmanuel.bonnet@unicaen.fr