

VULNÉRABILITÉ FACE AUX RISQUES LIÉS AU TRANSPORT DE MATIÈRES DANGEREUSES : APPORTS DE DEUX MÉTHODES MULTICRITÈRES D'AIDE À LA DÉCISION

Chloé Griot*/***, Sophie Sauvagnargues-Lesage*, Gilles Dusserre*, David Pearson**, Henri Picheral***

* École des mines d'Alès, ** Université Jean Monnet, *** Université Paul Valéry

L'étude a pour objectif d'établir une méthode d'évaluation de la vulnérabilité du territoire face aux risques liés au transport de matières dangereuses (TMD). L'application de deux méthodes multicritères d'aide à la décision - procédure d'analyse hiérarchique (AHP : Analytic Hierarchy Process) [SAA 80], méthode de Satisfaction-Regret [FUS 94] [FUS 00] - à cette problématique fournit une hiérarchisation des différentes cibles selon leur niveau de vulnérabilité. Cette méthode d'analyse spatiale couplée à un système d'information géographique et à un logiciel de simulation des risques est destinée à la Sécurité Civile.

The study aims at establishing a method of assessment of the vulnerability of the territory faced with hazmat risks. Hazards linked to the transport of dangerous goods (TDG), unlike other technological hazards, present the specificity of having a mobile source of danger, implying various risks with a diffuse nature. In the framework of terrestrial TDG, focusing the attention on the territory allows to handle the TDG risks globally. Consequently, the places of hazard are constituted by the transport axes e.g. rail and road routes and several elements are liable to be exposed within the territory, and particularly in the borders of the TDG routes. A preliminary study of the concerned territory allows us to foresee the latter elements according to the following typology : human, material and environmental targets, and to anticipate clusters of consequences, potentially resulting from the effects of a TDG accident on the targets. Target sensitivity to different types of effects and predictable consequences serve as indicators of territory sensitivity. The application of two multicriteria decision support methods - Analytic Hierarchy Process [SAA 80], Satisfaction - Regret Method [FUS 94] [FUS 00] - to this problematic provides a prioritisation of the different targets according to their level of vulnerability. This spatial analysis method connected with both a geographical information system and a risks simulation software is intended for the French civil security.

INTRODUCTION

L'objectif de l'étude est la mise au point d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité du territoire face aux risques liés au transport de matières dangereuses (TMD) routiers et ferroviaires afin de réaliser des cartes utiles aux services de secours. La construction de la méthode a nécessité un travail en concertation avec les acteurs principaux des gestions d'accidents de TMD. Le besoin d'utiliser des critères utiles en terme de gestion de crise qui sont difficilement quantifiables a imposé l'utilisation d'une méthode multicritères d'aide à la décision qui autorise le recours aux avis d'experts. Dans un souci de représentativité des résultats et de robustesse de la méthode, il a paru important d'utiliser au moins deux méthodes différentes afin de confronter leurs résultats.

L'article se divise en deux chapitres successifs.

Le premier chapitre « Problématique, théorie et mise en œuvre » est structuré selon trois parties principales. La première s'attache à présenter les définitions et concepts utilisés dans l'étude. La deuxième approfondit la problématique et s'intéresse aux critères de sensibilité. La troisième est consacrée à la présentation des matériels et méthodes et à la démonstration de la faisabilité de l'étude.

Les premiers résultats d'une application à la vulnérabilité humaine sont développés dans le second chapitre « Application sur une zone d'étude et premiers résultats ». Quatre parties principales le composent. La première s'attache à présenter la zone d'étude. La deuxième est consacrée à la présentation des résultats de l'évaluation de la sensibilité humaine du territoire selon les deux méthodes multicritères d'aide à la décision, ainsi qu'à leur comparaison et leur discussion. L'application des résultats à la zone d'étude fait l'objet de la troisième partie. Enfin, la dernière partie est une conclusion qui met en perspective les résultats de cette étude.

PROBLÉMATIQUE, THÉORIE ET MISE EN ŒUVRE

UN TERRITOIRE VULNÉRABLE DONC SENSIBLE AUX RISQUES LIÉS AU TMD

Dans la problématique du risque TMD, trois notions fondamentales sont à considérer : l'aléa TMD (le transport de matières dangereuses en lui-même), le risque TMD, la vulnérabilité du territoire face au risque TMD.

Aléa

L'aléa TMD correspond au trafic de matières dangereuses en lui-même. Plusieurs modes de transport sont envisageables : routier, ferroviaire, fluvial, maritime, aérien ou encore par conduites. L'étude se focalise sur les deux premiers (routier et ferroviaire). L'aléa se définit selon plusieurs points de vue : spatial (l'itinéraire emprunté), temporel (date et plage horaire), quantitatif (volume transporté) et qualitatif (nature de la matière dangereuse).

Risque TMD

De façon générale, dans le domaine des risques technologiques, le risque se définit comme une combinaison d'une probabilité d'occurrence d'un événement accidentel et de la gravité des conséquences potentielles. En outre, la modélisation systémique du risque [HUB 88] met en évidence les différentes composantes du risque TMD. Dans le cas des transports ferroviaires et routiers, la source de danger désigne la citerne de matière dangereuse, le flux de danger correspond au passage de la matière dangereuse dans l'environnement et les cibles désignent tous les éléments structurant le territoire qui sont susceptibles de subir les effets du flux de danger.

Vulnérabilité

Dans le domaine des risques naturels, la vulnérabilité mesure à priori, les conséquences potentielles, c'est à dire le niveau d'endommagement potentiel, du risque majeur sur les enjeux (victimes, coût important des dégâts matériels, impacts sur l'environnement) [MAN 97], ou encore le degré de perte résultant de l'occurrence d'un phénomène [WES 98]. Dans la littérature concernant les risques technologiques, la vulnérabilité est souvent comprise comme une caractéristique des éléments ou des lieux potentiellement exposés au risque étudié, sans que le terme soit réellement explicité [BON 98], [ERK 97], [GHE 98], [SHE 97], [LEE 94], [BRE 87].

Le territoire vulnérable se révèle donc composé d'un certain nombre de cibles plus ou moins sensibles (population, réseaux électriques, zone naturelle protégée ...) et plus ou moins exposées au risque TMD. Il constitue également le support du risque TMD, et le lieu de dysfonctionnements potentiellement engendrés par les effets d'un accident TMD. C'est pourquoi, il est proposé de définir la vulnérabilité du territoire face au risque TMD comme une combinaison de l'évaluation (quantitative et qualitative) des cibles, leur sensibilité et leur degré d'exposition aux facteurs de risque [GRI 00]^[1]. Dans la suite de l'article, seule la composante « sensibilité » de la vulnérabilité d'un territoire sera étudiée.

QUELS INDICATEURS POUR L'ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ DU TERRITOIRE ?

L'analyse détaillée de crises passées et plusieurs entretiens avec des acteurs de la gestion de crise, ont permis de mettre au point des critères d'évaluation de la sensibilité des cibles [GRI 00]^[2]. Ces derniers ont été déterminés en se basant sur la notion de cinétique d'accident, primordiale dans le cadre d'une gestion de crise. Le postulat consiste à considérer que la sensibilité des cibles aux différents types d'effets et les conséquences induites prévisibles constituent les critères d'évaluation du niveau de sensibilité des cibles du territoire.

Les effets potentiels d'un accident de TMD...

Les accidents de TMD conduisent à différents types d'effets qui peuvent survenir successivement. Par exemple, une explosion peut conduire à l'apparition d'un incendie combiné à un dégagement de gaz toxique. D'autre part, deux types d'accidents différents peuvent donner lieu aux mêmes effets (rayonnement thermique), tout en impliquant des cinétiques et des distances d'effet différentes. Une classification de différents types d'accidents impliquant des matières dangereuses (en particulier selon leur cinétique) a déjà été proposée [FUL 96]. Elle se base sur l'étude d'accidents majeurs liés aux installations Seveso (installations dangereuses rele-

Tableau 1 : Classification des accidents et de leurs effets [FUL 96] modifié

Types d'accidents	Cinétique	Effet impliqué	Distance d'effet	Dépendant des conditions
météorologiques				
Pollutions accidentelles	Très lente	Perturbation du milieu naturel	Variable	Variable
Incendies	Lente	Rayonnement thermique	± 200 m	Non
BLEVE	Très rapide	Rayonnement thermique	± 1 000 m	Non
Explosions de produits condensés	Très rapide	Onde de surpression	± 1 000 m	Non
UVCE (Explosion de gaz)	Rapide	Onde de surpression	Variable	Oui
Libération de gaz toxique	Variable	Toxicité	Variable à très grande	Oui

vant de la directive européenne « Seveso ») (tableau 1). Ces résultats permettent de distinguer les principaux effets potentiellement induits par un accident de TMD, auxquels ont été rajoutés les effets bactériologiques (classe 6.2) et radioactifs (classe 7) qui concernent aussi le TMD.

...et leurs conséquences prévisibles

Lorsqu'un accident survient, les cibles touchées dans un premier temps, seront peut-être à l'origine de dysfonctionnements ultérieurs dans le temps, et ailleurs dans l'espace. Le cas du déraillement de La Voulte-sur-Rhône est significatif [SAP 97]. Le 13 janvier 1993, un train de 20 wagons-citernes contenant chacun 80 m³ de supercarburant dérailla dans la ville de 6000 habitants vers 23 h 00. Plusieurs citernes prennent feu impliquant plusieurs conséquences : la population locale est prise d'un mouvement de panique, le feu se propage aux habitations environnantes et des évacuations

doivent être menées. Le réseau d'égouts, envahi par le carburant s'enflamme. Enfin, une explosion généralisée se produit sur plus d'un km autour du lieu initial de l'accident. Le Rhône est pollué. Ainsi, cette présentation synthétisée d'un accident majeur montre qu'il convient d'envisager la crise dans sa globalité spatiale et temporelle.

Les conséquences ont été identifiées et validées conjointement avec les experts consultés (cf § « Matériel et méthodes » ci-après). Elles se déclinent en un certain nombre de conséquences directes (valeur financière, effet domino ...) et indirectes (impact sanitaire, impact psycho-médiatique ...) découlant de l'occurrence de l'accident.

Synthèse des indicateurs retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité du territoire

Trois groupes de cibles (humaines, environnementales,

Tableau 2 : Recensement des cibles vulnérables, des effet à considérer et des conséquences potentielles induites

Types de cibles vulnérables						
		Humaines	Environnementales	Matérielles		
Détails des cibles	1	Tissu urbain continu Tissu urbain discontinu Habitat collectif Habitat individuel isolé	1	Cultures hors rizières Cultures dans rizières Salines Feuillus	1	Infrastructures H ₂ O ICPE Energie et infrastructures d'intérêt public Infrastructures routières et ferroviaires
	2	Etablissements spéciaux Etablissements professionnels	2	Conifères Forêts mixtes Garrigues	2	Infrastructures des zones portuaires et aéroportuaires Extraction de matériaux, décharges et chantiers
Clusters	1	Habitat	1	Zones agricoles	3	Pollution accidentelle Thermicité Surpression Toxicité d'un gaz Radioactivité Bactériologie
	2	Zones d'activités quotidiennes	2	Forêt		
	3	Zones de loisirs ou de transit	3	Marais ou zones humides		
	4	Trafics	4	Autres espaces naturels		
Effets	Effets considérés	Thermicité Surpression Toxicité d'un gaz Radioactivité Bactériologie	Effets considérés	Pollution accidentelle Thermicité Surpression Toxicité d'un gaz Radioactivité Bactériologie	Effets considérés	Pollution accidentelle Thermicité Surpression Toxicité d'un gaz Radioactivité Bactériologie
		Conséquences prévisibles		Conséquences directes		Conséquences directes
Conséquences prévisibles	Caractéristiques des lieux	Difficulté à confiner Difficulté à évacuer Impact sanitaire	Conséquences directes	Valeur financière Effet domino	Conséquences directes	Valeur financière Effet domino
	Conséquences indirectes	Risque effet panique Impact économique Impact quotidien Impacts psycho-médiatiques	Conséquences indirectes	Pertes financières prévisibles Impact écologique Impact santé publique Impact vie quotidienne Impacts psycho-médiatiques	Conséquences indirectes	Pertes financières prévisibles Impact santé publique Impact vie quotidienne Impacts psycho-médiatiques

matérielles) sont à considérer. Les effets à prendre en compte pour chacune d'elles puis les conséquences prévisibles qui les caractérisent, ont été identifiés et validés par des experts de la Sécurité Civile (tableau 2).

Les dysfonctionnements et les impacts caractérisent les conséquences directes ou indirectes potentiellement engendrées par les effets de l'accident sur les cibles. Le postulat consiste à considérer que la sensibilité des cibles aux différents types d'effets et les conséquences induites prévisibles constituent les critères d'évaluation du niveau de sensibilité des cibles du territoire.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel

Nomenclature d'utilisation du sol spécifique à la problématique de vulnérabilité face aux risques TMD

Pour les besoins de cette étude, une nomenclature d'utilisation du sol spécifique à la problématique de vulnérabilité face aux risques TMD a été élaborée de façon à correspondre le plus possible aux besoins opérationnels de la Sécurité Civile [GRI 00]^[2]. La carte d'utilisation du sol correspondante a été obtenue par interprétation d'images satellitaires complétée par des données exogènes d'origines variées (Driire-LR, SDIS 30, DDASS 30, Diren-LR, DDE 30). L'ensemble des résultats cartographiques servent de base à la cartographie de la vulnérabilité du territoire et seront finalement intégrés dans un système d'information géographique (Géoconcept) actuellement utilisé par la Sécurité Civile.

Panel d'experts

Dans cette étude, l'évaluation de la sensibilité du territoire se base sur la comparaison de deux méthodes multicritères d'aide à la décision qui impliquent le recours aux avis d'experts d'horizons divers mais tous concernés par la problématique des risques liés au TMD : Sécurité Civile, Protection Civile, experts sécurité des filières ferroviaires et routières du TMD, divers services déconcentrés de l'Etat (Driire, DDE). A ce stade de l'étude, quatorze experts ont été consultés sur un total de vingt devant participer à l'étude.

Méthodes

Choix de deux méthodes multicritères d'aide à la décision

Les méthodes multicritères d'aide à la décision s'utilisent habituellement dans le domaine du management d'entreprise (ou de projet) lorsqu'un ou plusieurs décideurs se trouvent confrontés à des problèmes de choix ou d'évaluation [MER 87]. Contrairement à l'utilisation classique de ces méthodes, l'objectif ici n'est pas de choisir une ou plusieurs possibilités parmi celles proposées, mais d'évaluer les différentes cibles afin de les hiérarchiser. Deux méthodes multicritères

d'aide à la décision ont été retenues car elles permettent d'une part, de structurer les critères d'évaluation selon l'objectif et d'autre part, d'établir des priorités entre les cibles. Il s'agit de la procédure d'analyse hiérarchique (AHP) [SAA 80] et de la méthode Satisfaction – Regret [FUS 94], [FUS 00]. Pris séparément, les résultats de chaque méthode fournissent une hiérarchisation des cibles selon les critères de sensibilité. Ensuite, la confrontation des résultats issus de ces deux méthodes doit permettre la mise en évidence de certaines différences d'évaluation, voire d'incohérences qui sont aussi des sources d'informations très intéressantes et qui permettent de tester la robustesse de la méthode.

Principe général

La prise de décision selon la méthode AHP, respectivement Satisfaction-Regret, est un processus qui conduit à :

- réaliser une décomposition hiérarchique du problème
- mettre en évidence des jugements qui reflètent des idées, des sentiments, des émotions,
- représenter ces jugements avec des nombres significatifs, facilement interprétables,
- analyser la sensibilité des changements de jugement (uniquement dans AHP).

Processus d'analyse hiérarchique [SAA 80]

Décomposition du problème

La procédure d'analyse hiérarchique débute par une décomposition du problème d'évaluation. Il s'agit successivement de :

- définir un objectif, les alternatives à comparer, et les critères d'évaluation,
- structurer les critères d'évaluation selon l'objectif,
- établir des priorités entre les alternatives selon chaque critère.

La figure 1 présente la décomposition hiérarchique du problème d'évaluation de la sensibilité humaine selon les indicateurs décrits dans la deuxième partie.

Quantification du problème : jugement d'experts et cohérence des jugements

La phase d'évaluation de la sensibilité des cibles requiert le recueil d'avis d'experts grâce à un questionnaire sous forme de « grilles d'évaluation » et selon une échelle spécifique (figure 2). La première étape consiste à comparer les critères deux à deux (« pairwise comparison ») par rapport à l'objectif afin d'évaluer leur importance. La seconde s'attache à hiérarchiser les cibles selon chaque critère. Les évaluations portées, pour une alternative, sur chacun des critères doivent ensuite être « agrégées » pour aboutir à une évaluation globale de l'alternative.

Si les différentes alternatives sont désignées par j , et les différents critères par i , on obtient :

w_i = poids d'importance calculé pour le critère i , à partir des comparaisons par paires effectuées sur les critères.

e_{ij} = évaluation calculée de l'alternative j sur le critère i , à partir des comparaisons par paires effectuées sur les alternatives relativement au critère i .

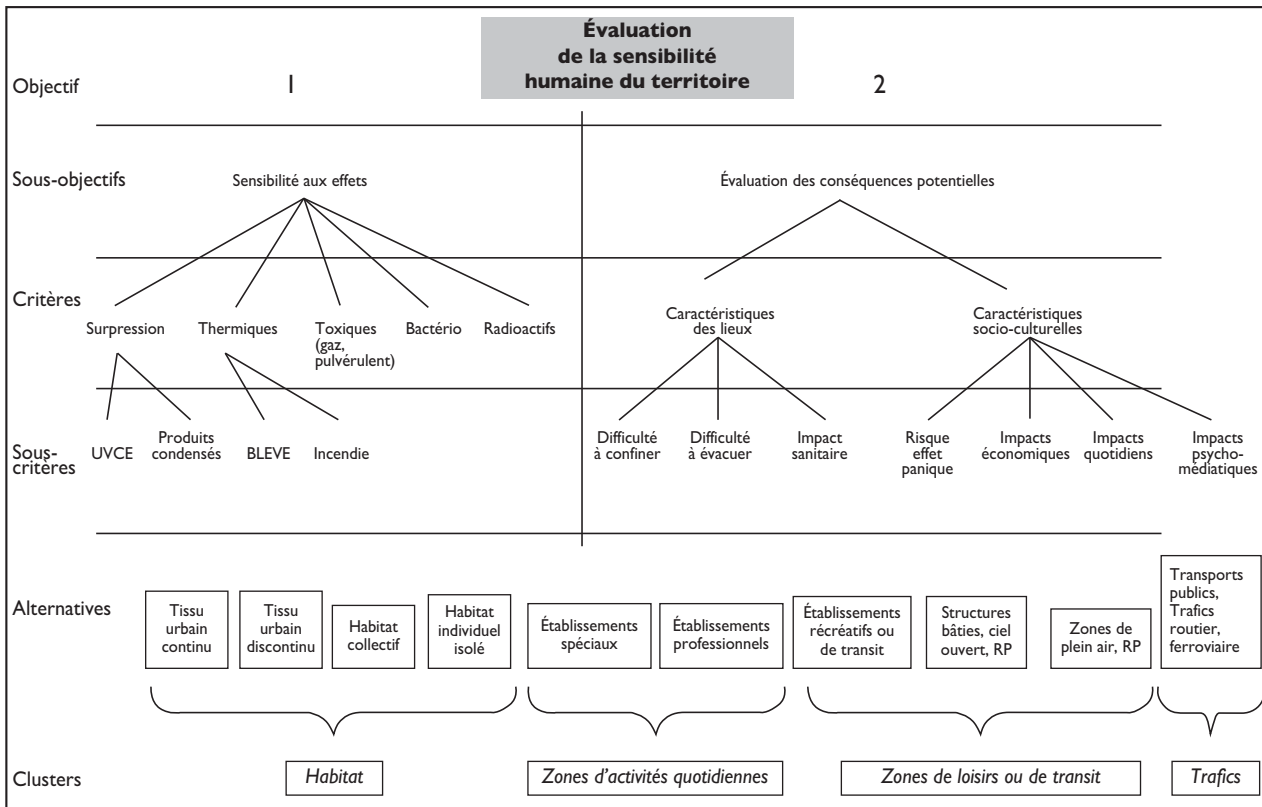


Figure 1. Décomposition hiérarchique du problème d'évaluation de la sensibilité humaine

L'importance globale relative ou l'évaluation globale de chacune des alternatives j se calcule par :

$$E_j = \sum_i w_i \cdot e_{ij}$$

En outre, la valeur propre de chaque matrice fournit une estimation de la cohérence de la matrice. Le ratio d'incohérence RI indique dans quelle mesure l'expert a répondu de façon cohérente ou non (si $RI < 0.1$, les réponses sont estimées cohérentes). Enfin, le calcul de la moyenne géométrique de chacune des évaluations est une solution possible pour agréger les évaluations de tous les experts [BAS 93].

Ces calculs sont réalisés grâce au logiciel ExpertChoice. Basé sur la procédure d'analyse hiérarchique, le système Expert Choice a été mis au point par Ernest Forman et Thomas Saaty en 1983 [MER 87]. L'AHP à travers Expert Choice assiste le processus d'aide à la décision en four-

nissant à l'utilisateur une structure pour organiser et évaluer l'importance des différents critères, et les préférences des alternatives d'un problème. Le logiciel Expert Choice permet d'une part de générer des modèles décisionnels, et d'autre part de modéliser l'expertise. La version utilisée dans le cadre de ce travail est *Expert Choice 2000 Professional*.

Limites de la méthode AHP

Bien que largement reconnue, la méthode AHP présente l'inconvénient majeur suivant : les comparaisons deux à deux deviennent impossibles si le nombre d'éléments d'un niveau est supérieur à 7 [SAA 80]. C'est pourquoi des regroupements (ou clusters) d'éléments d'un même niveau de la hiérarchie sont parfois nécessaires (figure 1).

Méthode Satisfaction-Regret [FUS 94] [FUS 00]

Décomposition du problème

Le principe est le même que dans l'AHP mais le vocabulaire diffère (tableau 3).

Quantification du problème : évaluation subjective multicritère floue

La phase d'évaluation est réalisée de la même façon et en même temps que celle de la méthode précédente, avec cependant des grilles d'évaluation et une échelle spécifiques. Soit $I = \{1 \dots i \dots n\}$ l'ensemble des objets à évaluer, et $J = \{1 \dots j \dots m\}$ l'ensemble des points

		D		
		X	Y	Z
C	Objectif	X	Y	Z
	X	1	r	s
	Y	1/r	1	t
	Z	1/s	1/t	1

- 1 : C a la même importance que D
- 3 : C a légèrement plus d'importance que D
- 5 : C a plus d'importance que D
- 7 : C a beaucoup plus d'importance que D
- 9 : C a la priorité sur D
- 1/3 : D a légèrement plus d'importance que C
- 1/5 : D a plus d'importance que C
- 1/7 : D a beaucoup plus d'importance que C
- 1/9 : D a la priorité sur C

Figure 2. Echelle d'évaluation de la méthode AHP [SAA 80]

de vue retenus dans le problème d'évaluation. La procédure d'évaluation se base sur l'échelle unique $E=[0, 1]$. La première étape consiste à hiérarchiser les cibles selon chaque critère : $p_j(i)$ est le niveau de vérité de la proposition « l'objet i correspond au point de vue j ». La seconde s'attache à évaluer l'importance des critères par rapport à l'objectif : $\pi(j)$ est le niveau de vérité de la proposition « le point de vue j est important ». La valeur 0 signifie que ces propositions sont « fausses », la valeur 1 qu'elles sont « vraies ». En dehors de ces situations limites, les autres valeurs servent à nuancer la valeur logique des propositions associées qui peuvent donc être considérées comme « plus ou moins vraies ». De telles propositions sont dites *floues*. Les évaluations portées, pour une alternative, sur chacun des critères doivent ensuite être « agrégées » pour aboutir à une évaluation globale de l'alternative : $g(i)=G[(p_j(i), \pi(j)) ; j \in J]$, $g(i) \in [0, 1]$ où G est un opérateur d'agrégation à valeurs dans $[0, 1]$, basé sur le calcul du maximum pondéré $s(i)$ et d'un indice de non discordance $n(r(i))$.

$$g(i) = 1/2[s(i)+n(r(i))].$$

Enfin, il est demandé à chaque expert d'estimer sa compétence dans $[0, 1]$ sur la base des difficultés rencontrées au cours des deux premières étapes. Les coefficients de compétence remplacent les coefficients d'importance des points de vue lors de l'harmonisation des évaluations de plusieurs experts (figure 3). Le critère g construit à partir des m critères pondérés p_j est un critère d'évaluation dont la finalité est essentiellement descriptive. Il permet d'obtenir une classification sur un ensemble d'objets [FUS 00].

Limites de la méthode Satisfaction-Regret

La méthode satisfaction-regret, se caractérise par plusieurs étapes de calcul dont certaines privilégient le maximum des évaluations, et d'autres le minimum. Cela implique des pertes d'information non négligeables à chaque étape et en particulier quand une agrégation des résultats de plusieurs experts est réalisée. De plus, cette méthode ne présente aucune possibilité d'évaluer la cohérence des jugements, ce qui rend parfois l'interprétation délicate.

Etude de faisabilité

Applicabilité des méthodes retenues à la problématique

Le tableau de correspondance suivant montre l'applicabilité des deux méthodes au problème d'évaluation de la sensibilité (tableau 3). L'objectif a été envisagé à la lumière de deux problématiques distinctes qui correspondent à deux sous-objectifs.

Dans la mesure où les critères des deux sous-objectifs ne sont pas comparables, il est nécessaire de réaliser une pro-

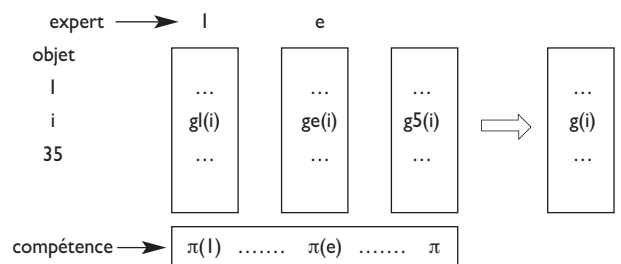


Figure 3. Harmonisation des évaluations de plusieurs experts [FUS 00] modifié

cédure d'analyse hiérarchique pour chaque sous-objectif. Ainsi, deux procédures s'avèrent nécessaires par type de cibles (humaines, environnementales, matérielles) soit six procédures au total.

Intégration des résultats dans le SIG

Les résultats obtenus grâce aux deux méthodes correspondent à un classement des cibles selon leur niveau de sensibilité. Par ailleurs, ces cibles sont intégrées dans le SIG au niveau de la couche d'information intitulée *utilisation du sol* (Cf § « Matériel et méthodes » ci-avant) qui comprend

Tableau 3 : Correspondance entre les termes des deux méthodes retenues et les termes de l'étude.

AHP	Satisfaction-Regret	Évaluation de la sensibilité
Objectif	Objectif	Évaluation de la sensibilité du territoire
Sous-objectif	Sous-objectif	Évaluation de la sensibilité aux effets Évaluation des conséquences prévisibles
Critères	Points de vue	Type d'effets Conséquences prévisibles
Alternatives	Objets	Cibles

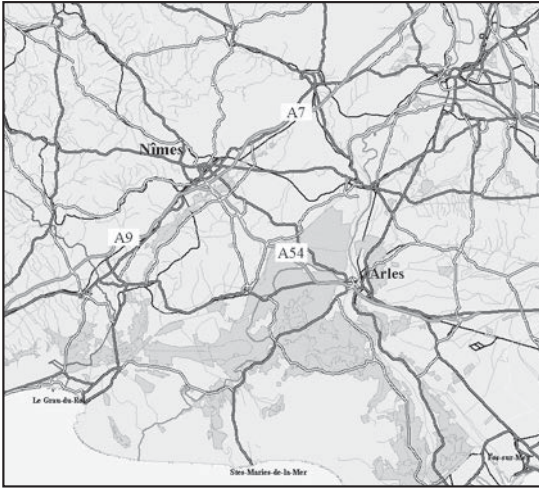
des objets (les cibles) représentés en mode vectoriel. Plusieurs champs se référant au niveau de sensibilité - sensibilité aux effets thermiques, sensibilité aux effets de surpression, sensibilité à la difficulté d'évacuation... -, seront renseignés à partir des résultats issus des deux méthodes multicritères d'aide à la décision. Cette démarche autorise la cartographie du niveau de sensibilité des cibles.

APPLICATION SUR UNE ZONE D'ÉTUDE ET PREMIERS RÉSULTATS

UNE ZONE D'ÉTUDE VULNÉRABLE

La zone d'étude se situe dans le département du Gard (30) et couvre une surface de 50 x 60 km englobant les villes de Nîmes et Arles, et la zone de la Petite Camargue (carte 1). Cette zone se caractérise par :

- une urbanisation forte au nord (Nîmes)
- une activité agricole intense au centre (vignes, vergers, céréales)



Carte I. Situation de la zone d'étude
(source : BDCarto, IGN, modifiée)

- une zone naturelle protégée au sud (site de la Camargue gardoise soumise à la directive Habitat)
- une activité touristique importante durant la saison estivale

D'autre part, la présence d'industries locales importantes induisent un trafic TMD sur la zone d'étude : industries chimiques (Expansia, Novartis, Sanofi, Rhodia), entrepôts phytosanitaires, dépôts d'explosifs, d'hydrocarbures ou encore d'alcool (Martini, Finedoc...), centrale nucléaire (Marcoule)...

En outre, il est intéressant de remarquer la dimension doublement centrale de la zone d'étude :

- sa position centrale par rapport à des pôles industriels primordiaux :

à l'est : le port autonome de Marseille/ Fos, les raffineries de Fos-sur-Mer, les gares de triage de Martigues et Fos/ Coussoule, respectivement première et troisième d'un point de vue importance du trafic TMD ;

au nord : le couloir de la chimie dans la région lyonnaise ;
à l'ouest : les ports industriels de Sète et de Bayonne et plus au nord, le port autonome de Bordeaux.

- sa position centrale d'un point de vue européen : entre Italie, Espagne, Portugal et nord-est de l'Europe.

Cette situation géographique particulière explique notamment la présence d'un réseau de transport terrestre relativement dense et directement concerné par le trafic local et le transit de matières dangereuses : axes autoroutiers A9 (Orange, Montpellier, Toulouse - Espagne) et A54 (Nîmes, Marseille - Italie), nationale N572 et départementale D570 (contournement de Nîmes par le sud), lignes ferroviaires de cette zone.

La présence des trois types de cibles - humaines (Nîmes, Arles, automobilistes, touristes), matérielles (sites industriels...), environnementales (zones agricoles, sites protégés...)- couplée à un réseau dense de transport terrestre concerné par le trafic TMD induit une zone d'étude à la fois

sensible et exposée aux risques TMD, c'est à dire vulnérable.

ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ HUMAINE DU TERRITOIRE GRÂCE À DEUX MÉTHODES MULTICRITÈRES D'AIDE À LA DÉCISION

La prise en compte des cibles ayant évolué au cours du travail, des différences existent concernant la précision des cibles prises en compte dans les deux méthodes (tableau 4). Ainsi, les cibles restant comparables entre les deux méthodes, une précision plus importante a été appliquée dans le cadre de la méthode AHP.

Hiérarchisation des cibles humaines selon le processus d'analyse hiérarchique

La somme des scores de l'AHP est égale à 1. Cependant, il est intéressant de concevoir la sensibilité en terme de sensibilité relative par rapport à la cible estimée la plus sensible, puis de proposer une échelle relative de sensibilité (tableau 5).

Tableau 4 : Correspondance entre les types de cibles étudiées dans chaque méthode

S/R	AHP
Tissu urbain continu	-
Tissu urbain discontinu	-
Habitat collectif	-
Habitat individuel isolé	-
Établissements spéciaux	Santé, Établissement de nuit, Enseignement
Étab. professionnels Administrations/Bureaux,	Zones industrielles et commerciales, Équipement local, Établissements agricoles
Étab. récréatifs ou de transit	Établissement. de loisirs, Établissement de transit
Structures Bâties, ciel ouvert, RP	-
Zone plein air, RP	-
Trafics	Trafic routier, ferroviaire

Tableau 5 : Échelle de sensibilité relative

[0-20]	Faible
[20-40]	Moyenne
[40-60]	Importante
[60-80]	Très importante
[80-100]	Extrême

Cette démarche autorise notamment la comparaison des résultats concernant deux critères différents, comparaison difficile autrement.

Exemples de résultats

Le tableau 6 présente les résultats des 14 experts ayant répondu au questionnaire, concernant les effets de surpression d'une part, et la difficulté à évacuer d'autre part (tableau 6).

Discussion

Sensibilité aux effets de surpression

L'habitat collectif est évalué comme la cible la plus sensible vis

Tableau 6 : Évaluation de la sensibilité humaine par l’AHP selon deux critères : surpression (a), difficulté à évacuer (b)

(a) Sensibilité humaine selon les effets de surpression			(b) Sensibilité humaine selon la difficulté à évacuer		
Cibles humaines	Score AHP	Sc. Normalisé	Cibles Humaines	Score AHP	Sc. Normalisé
Habitat collectif	0,120	100	Trafic routier	0,167	100
Établissements de transit	0,098	81,67	Trafic urbain continu	0,085	50,90
Santé	0,095	79,17	Trafic ferroviaire	0,083	49,70
Structures bâties, ciel ouvert, RP	0,081	67,50	Santé	0,076	45,51
Trafic urbain continu	0,077	64,17	Zones plein air RP	0,074	44,31
Établissements de loisirs	0,069	57,50	Habitat collectif	0,070	41,92
Trafic routier	0,068	56,67	Structures bâties, ciel ouvert, RP	0,062	37,13
Trafic ferroviaire	0,068	56,67	Établissements de loisirs	0,062	37,13
Établissements de nuit	0,067	55,83	Trafic urbain discontinu	0,060	35,93
Enseignement	0,064	53,33	Établissements de transit	0,052	31,14
Zones industrielles & commerciales	0,050	41,67	Établissements de nuit	0,049	29,34
Zones plein air, RP	0,040	33,33	Zones industrielles & commerciales	0,048	28,74
Administrations	0,028	23,33	Habitat individuel	0,035	20,96
Équipement local	0,025	20,83	Enseignement	0,028	16,77
Trafic urbain discontinu	0,024	20,00	Administrations	0,023	13,77
Habitat individuel	0,016	13,33	Équipement local	0,013	7,78
Établissements agricoles	0,010	8,33	Établissements agricoles	0,013	7,78
Total	1		Total	1	
RI	0,05		RI	0,01	

à vis de cet effet. Il est suivi des établissements de transit, de santé, des structures bâties, ciel ouvert RP, et du tissu urbain continu. Viennent ensuite les établissements de loisirs, les trafics routier et ferroviaire, les établissements de nuit, d’enseignement, et les zones industrielles et commerciales.

Cette première partie de la hiérarchie concerne en majorité des lieux à forte densité de population, mais également des cibles dont la proximité avec la source de danger est maximale (les trafics routier et ferroviaire) ou encore des lieux n’assurant pas de réelle protection à leurs occupants en cas d’effets de surpression survenant à proximité (structures bâties, ciel ouvert, RP).

Cependant, il semble étonnant que des établissements ou bâtiments à structure *a priori* proche, ne soient pas évalués de manière identique. Ainsi par exemple, les établissements de loisirs (0,069) sont évalués comme légèrement plus sensibles que les établissements d’enseignement (0,064), et beaucoup plus sensibles que les administrations/bureaux (0,028). Pourtant, la structure des bâtiments qui les composent, et par conséquent, l’exposition des personnes occupant ces bâtiments, doivent être sensiblement identiques. Ainsi, la sensibilité de ces cibles devrait logiquement être similaire. D’autre part, la position des zones de plein air (0,04) en dernière partie de la hiérarchie s’avère très différente de celle des structures bâties, ciel ouvert, RP (0,081). Pourtant, il est légitime de s’interroger concernant le niveau d’exposition de personnes occupant ces deux cibles : d’après les résultats obtenus, il apparaît que des personnes occupant la première seraient plus protégées que des personnes occupant la seconde. L’hypothèse pouvant expliquer cette interrogation est qu’en cas d’effets de surpression, la présence

d’une structure en dur (telle que des tribunes par exemple) pourrait peut être s’avérer plus dangereuse que protectrice, tandis que dans le cas des zones de plein air, ce problème ne se pose pas.

Sensibilité selon la difficulté à évacuer

Le trafic routier se situe de loin en première position de la hiérarchie. Cette première position peut s’expliquer d’une part par l’apparition de bouchons en cas d’accident, qui implique une mobilité quasi impossible d’où une évacuation très délicate, et d’autre part, par un problème de difficulté de diffusion du message d’évacuation parmi la population automobiliste. Puis apparaissent des cibles dont la forte densité de population implique la difficulté à évacuer (Trafic urbain continu, habitat collectif), ou dont l’évacuation est compliquée par exemple par une population sensible parfois dans l’impossibilité de se déplacer (établissements de santé), ou par le caractère mobile de la cible (trafic ferroviaire). La position des zones de plein air, RP à ce niveau pourrait être liée au fait qu’une zone de plein air n’est pas forcément bien délimitée impliquant peut être une certaine divagation des personnes sur la surface en question, d’où un problème de couverture de la communication du message d’évacuation. Les cibles suivantes concernent des lieux à grande capacité d’accueil et qui ne sont pas forcément familiers à leurs occupants, ce qui peut, peut être, conditionner défavorablement l’évacuation (structures bâties, ciel ouvert, RP, établissements de loisirs, établissements de transit, de nuit, zones industrielles et commerciales).

Enfin apparaissent des cibles se caractérisant par une faible densité de population (établissements agricoles, habitat individuel isolé) ou par une forte densité de population associée

au caractère familier des lieux par les occupants (administrations/bureaux), ou par des occupants sensibilisés, de par leur fonction, aux procédures à adopter en cas d'accident de TMD (équipement local), ou encadrés pour cela (établissements d'enseignement).

Hierarchisation des cibles humaines selon la méthode Satisfaction-Regret

Une échelle de sensibilité comportant les mêmes niveaux que celle établie pour la méthode AHP a été construite spécifiquement pour la méthode Satisfaction-Regret (S/R) (tableau 7). Cependant, dans la mesure où les résultats correspondant à deux critères différents sont directement comparables, il n'est pas nécessaire de travailler avec une échelle relative dans ce cas.

Exemples de résultats

Discussion

Sensibilité aux effets de surpression

En premier lieu, il convient de constater que les scores sont extrêmement proches puisqu'ils s'échelonnent entre 0,7 et 0,8 signifiant par là que les cibles ont été très peu différenciées selon ce critère et dans le cadre de cette méthode. Par conséquent, l'interprétation s'avère délicate. Néanmoins, il est possible de dégager certaines tendances.

Deux groupes de cibles sont à distinguer. Successivement, des lieux à concentration importante de population lorsqu'ils sont occupés – TU continu, discontinu, habitat collectif, établissements spéciaux, établissements professionnels, établissements récréatifs et de transit – ont été évalués comme ayant une *sensibilité très importante*. Les structures bâties, ciel ouvert, recevant du public ont été évaluées de la même

façon et correspondent à des lieux n'assurant pas de réelle protection à leurs occupants en cas d'effets de surpression survenant à proximité.

Puis des zones d'habitation moins denses – habitat individuel isolé – et les lieux de plein air recevant du public sont considérés de manière équivalente comme très légèrement moins sensibles que les précédents. Enfin, les trafics apparaissent en dernière position mais restent dans le même domaine de sensibilité que les précédentes cibles.

Sensibilité selon la difficulté à évacuer

Les scores concernant ce critère présentent une amplitude légèrement supérieure à ceux du critère précédent, utilisant les niveaux de sensibilité « important » et « très important ». Ils s'échelonnent entre 0,6 et 0,8 et présentent à nouveau une différenciation faible.

Les premières cibles, c'est-à-dire celles considérées comme les plus difficiles à évacuer concernent logiquement à la fois des lieux à forte densité de population – trafic urbain continu et discontinu, habitat collectif -, et des lieux peu familiers à leurs occupants, ou à population dite *sensible* – établissements spéciaux -.

Les cibles suivantes, considérées comme légèrement moins sensibles vis-à-vis de ce critère, regroupent des lieux à grande capacité d'accueil et qui ne sont pas forcément familiers à leurs occupants, ce qui peut, peut-être, conditionner défavorablement l'évacuation – établissements récréatifs ou de transit, établissements professionnels, structures bâties, ciel ouvert, RP -.

Enfin apparaissent des cibles se caractérisant par une faible densité de population (établissements agricoles, habitat individuel isolé), ce qui semble faciliter l'évacuation. Les trafics ont été évalués de la même façon que ces dernières, malgré la différence de configuration des lieux qui existent entre ces deux types de cibles.

Comparaison des résultats des deux méthodes multicritères d'aide à la décision

En premier lieu, il faut rappeler que les résultats de S/R s'avèrent beaucoup moins précis que ceux de l'AHP mais

Tableau 7 : Échelle de sensibilité établie pour la méthode Satisfaction-Regret

Échelle de sensibilité	
[0,8 ; 1]	Extrême
[0,6 ; 0,8]	Très importante
[0,4 ; 0,6]	Importante
[0,2 ; 0,4]	Moyenne
[0 ; 0,2]	Faible

Tableau 8. Évaluation de la sensibilité des cibles humaines par la méthode S/R selon deux critères : surpression (a), difficulté à évacuer (b)

(a) Sensibilité humaine selon les effets de surpression		(b) Sensibilité humaine selon la difficulté à évacuer	
Cibles humaines	g(i)	Cibles humaines	g(i)
Tissu urbain continu	0,8	Tissu urbain continu	0,8
TU discontinu	0,8	TU discontinu	0,8
Habitat collectif	0,8	Habitat collectif	0,8
Étab. spéciaux	0,8	Étab. spéciaux	0,8
Étab. professionnels	0,8	Étab. récréatifs ou transit	0,75
Étab. récréatifs ou transit	0,8	Étab. professionnels	0,725
St. Bâties, ciel ouvert, RP	0,8	St. Bâties, ciel ouvert, RP	0,65
Habitat individuel isolé	0,75	Habitat individuel isolé	0,6
Plein air	0,75	Plein air	0,6
Trafics	0,7	trafics	0,6

apportent néanmoins une information exploitable. Concernant les effets de surpression, il a été constaté que les sept types de cibles considérées comme les plus sensibles dans S/R constituent principalement des lieux à forte densité de population – trafic urbain continu, trafic urbain discontinu, habitat collectif, établissements professionnels, établissements récréatifs et de transit -, parfois associés au caractère sensible de leurs occupants – établissements spéciaux -, mais aussi des lieux n'assurant qu'une faible protection à leurs occupants en cas d'effets de surpression survenant à proximité - structures bâties, ciel ouvert, RP-. Dans la hiérarchie obtenue par AHP pour ce critère, les cibles correspondantes, plus précises, se distribuent de façon globalement similaire avec quelques différences cependant. Ainsi, les six cibles considérées comme les plus sensibles aux effets de surpression correspondent également à des lieux à forte densité de population – habitat collectif, trafic urbain continu, établissements de transit -, parfois associés à des populations sensibles – établissements de santé -, et concernent aussi les structures bâties, ciel ouvert, RP. Les autres établissements spéciaux – établissements de nuit et d'enseignement – sont séparés des premiers par les trafics qui sont évalués comme légèrement plus sensibles. Cela constitue une différence à noter entre les deux classifications. Enfin, dans les deux cas, les dernières positions sont occupées par des lieux caractérisés par une faible densité de population.

Concernant les effets de surpression, la concordance entre les résultats des deux méthodes est donc mise en évidence. Vis à vis de la difficulté à évacuer, des lieux à forte densité de population se retrouvent en premières positions dans les deux cas – trafic urbain continu, habitat collectif -, ainsi que les établissements à population sensible – établissements spéciaux et notamment de santé -. Une différence importante distingue cependant les deux méthodes puisque les trafics se situent parmi les cibles les plus sensibles dans AHP, alors qu'ils apparaissent en dernière position dans S/R. En outre, le Trafic urbain discontinu considéré de manière équivalente à l'habitat collectif dans S/R, appartient à un domaine de sensibilité moindre dans AHP. Le même constat est fait concernant les établissements de santé et les deux autres établissements spéciaux.

Par ailleurs, les dernières positions concernent dans les deux cas des lieux à faible densité de population – habitat individuel isolé, établissements agricoles -. En revanche, la précision plus grande de AHP met en évidence des lieux caractérisés par des occupants sensibilisés de par leur fonction aux procédures d'évacuation (équipement local, administrations), ou encadrés pour cela (établissements d'enseignement), ce que ne permet pas la typologie des cibles utilisées dans S/R. Enfin, les cibles intermédiaires s'avèrent similaires – établissements récréatifs ou de transit, établissements professionnels, structures bâties, ciel ouvert, RP -. En revanche, une seconde différence importante concerne les zones de plein air, RP qui ont été évaluées très sensibles dans AHP, mais qui apparaissent en dernière position dans S/R.

Concernant la difficulté à évacuer, la concordance entre les

résultats des deux méthodes a donc également été mise en évidence.

A ce stade de l'étude, il apparaît que la concordance entre les résultats des deux méthodes est obtenue, même si quelques différences persistent concernant notamment les trafics pour les deux critères, et les zones de plein air RP pour la difficulté à évacuer. Plusieurs points peuvent expliquer ces différences induites soit par l'application des méthodes à la problématique, soit par les méthodes elles-mêmes.

En effet, il a été vu que la typologie des cibles utilisées dans chaque méthode est plus précise pour l'AHP que pour S/R. Cette différence implique en particulier que des cibles d'un même type dans S/R peuvent être évaluées tout à fait différemment dans AHP. C'est le cas par exemple des établissements spéciaux considérés comme très sensibles dans S/R vis à vis de la difficulté à évacuer (0,8), et qui sont traités séparément dans AHP avec les établissements de santé très sensibles (0,076), les établissements de nuit beaucoup moins sensibles (0,049), et les établissements d'enseignement encore moins sensibles (0,028).

Par ailleurs, la mise en œuvre différente des deux méthodes qui implique notamment deux façons différentes de répondre pour les experts, a pu aussi induire des différences au niveau des résultats.

Limites de la modélisation proposée

En premier lieu, les échelles de notation diffèrent complètement d'une méthode à l'autre. Ainsi, même si un effort a été fait pour que les deux échelles se ressemblent d'un point de vue sémantique, pour une même évaluation, l'expert a pu répondre différemment dans chaque méthode. D'autre part, le traitement des résultats est spécifique à chaque méthode. Dans l'AHP, il s'agit d'un calcul matriciel qui prend en compte toutes les évaluations et fournit donc un résultat agrégé qu'on peut qualifier de représentatif des réponses de l'expert. Dans S/R, il s'agit d'un calcul de maxima et minima qui ne tient donc pas compte de l'ensemble des évaluations. Par ailleurs, les évaluations ont été faites sur des cibles très détaillées dans l'AHP, et plus globales dans S/R, ce qui explique que certaines cibles de l'AHP d'un même groupe dans S/R sont évaluées différemment dans AHP (ex : trafics/trafic routier, trafic ferroviaire). Enfin, les échelles finales de sensibilité ne sont pas vraiment comparables, dans la mesure où celle de l'AHP est une échelle relative, alors que celle de S/R est une échelle absolue.

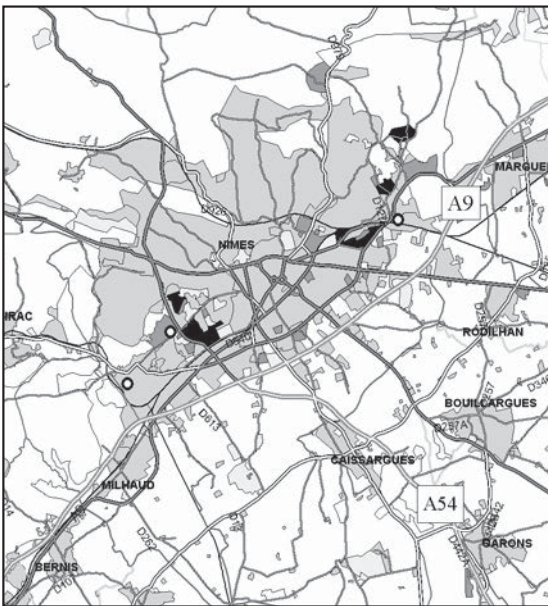
D'autre part, la hiérarchisation des cibles est établie sur la base de jugements *subjectifs* d'experts. Cette approche se justifie par la prise en compte de critères difficilement quantifiables et pourtant très intéressants à considérer pour l'objectif recherché. Elle est rendue possible grâce à l'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision. Il faut noter que le croisement des points de vue d'une vingtaine d'experts de domaines différents a pour but d'aboutir à une estimation relativement objective même si elle est issue de jugements subjectifs.

La robustesse de la méthode est appréhendée de deux

manières différentes. En premier lieu, la mesure de la cohérence des matrices par la méthode AHP donne une indication sur la façon dont ont répondu les experts. Habituellement, lorsqu'un grand nombre d'experts a pu être consulté, il est possible d'éliminer les résultats incohérents. Dans le cadre de cette étude, le nombre d'experts s'élevant à 20 n'autorise pas cela. Toutefois, la cohérence des 14 résultats agrégés est vérifiée pour les deux critères considérés ici. D'autre part, l'application en parallèle de deux méthodes multicritères d'aide à la décision a pour objectif de comparer les résultats afin de tester leur robustesse. A ce stade de l'étude, et pour les deux critères présentés, des similarités très nettes ont pu être mises en évidence confirmant ainsi une bonne cohérence des estimations. Finalement, même si la méthode AHP semble plus appropriée à la problématique dans la mesure où elle fournit des résultats plus précis permettant une meilleure interprétation, l'application en parallèle de la méthode Satisfaction-Regret permet d'une part de tester la robustesse de la méthode, et d'autre part de nuancer les résultats.

APPLICATION À LA ZONE D'ÉTUDE

Il a été vu d'une part, que la typologie des cibles utilisées dans AHP était plus précise que celle utilisée dans S/R, et d'autre part, que la méthode AHP fournissait des résultats plus dif-



Carte 2. Sensibilité humaine aux effets de suppression

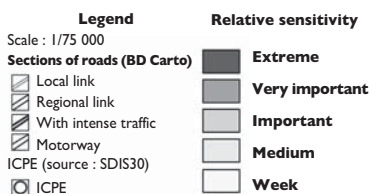


Figure 1. Légende des cartes



Carte 3. Sensibilité humaine selon la difficulté à évacuer

férenciés que S/R. Par conséquent, la représentation cartographique se base sur les résultats de AHP (cartes 2, 3), (figure 1).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette méthode d'évaluation de la sensibilité du territoire repose sur une classification des cibles et des critères de sensibilité établie par des experts. Le territoire a été envisagé à la lumière des dysfonctionnements ou des impacts potentiellement engendrés par les effets de l'accident TMD sur les cibles qui le structurent. Les dysfonctionnements principaux ont pu être identifiés en collaboration avec la Sécurité Civile, et servent de critères d'évaluation du niveau de sensibilité des cibles. Deux méthodes multicritères d'aide à la décision ont été retenues car elles permettent d'une part, de prendre en compte des critères difficilement quantifiables de façon absolue, et d'autre part de se baser sur des avis subjectifs d'experts. La comparaison des deux sert ensuite à tester la robustesse des résultats obtenus.

L'exploitation des premiers résultats issus des réponses de 14 experts a déjà mis en évidence l'intérêt de l'étude d'une part, et la robustesse de la méthode d'autre part. En effet, les résultats obtenus notamment avec la méthode AHP s'avèrent très différenciés autorisant une interprétation intéressante. Par ailleurs, chaque cible correspondant à un poste de nomenclature de l'occupation du sol, les résultats ont pu être cartographiés sur la zone d'étude. En outre, la comparaison des résultats issus des deux méthodes multicritères d'aide à la décision a révélé la grande cohérence de ces résultats, d'ailleurs confirmée par le ratio de cohérence de la méthode AHP.

Dans une deuxième phase, l'agrégation des évaluations de l'ensemble des 20 experts sera finalement réalisée. Elle

conduira à l'obtention de l'évaluation de la sensibilité du territoire pour chaque type d'effets et chaque type de conséquences d'une part, et pour l'ensemble des effets et l'ensemble des conséquences d'autre part. Cette deuxième phase adopte une nouvelle approche qui distingue le jour de la nuit, et pour laquelle les cibles sont aussi précises dans les deux méthodes. Ces seconds résultats pourront également servir de base de comparaison par rapport aux premiers et permettront là aussi d'estimer la robustesse de la méthode. Il est également prévu de tester la sensibilité du modèle grâce au logiciel Expert Choice. Ce dernier permet en effet de faire varier par exemple le poids d'un critère et d'observer les conséquences sur les résultats finaux concernant les cibles.

Par ailleurs, toute méthode ayant pour vocation d'être généralisable, la question doit être posée ici. Ainsi, il est légitime de s'interroger sur l'applicabilité de cette méthode à un autre site. Vis à vis du modèle proposé, l'applicabilité dépend principalement de la nécessité d'utiliser la nomenclature d'utilisation du sol proposée dans cette étude. Cela implique de réaliser la carte d'utilisation du sol correspondant au site considéré notamment par interprétation d'images satellitaires et apport de données exogènes appropriées dans la limite de leur disponibilité. A noter d'ailleurs, que le cas des cibles environnementales s'avère limité à des sites de même domaine climatique que la zone d'étude (Méditerranéen), dans la mesure où la typologie de ces cibles a été adaptée à ce domaine. En revanche, la hiérarchisation des cibles humaines et matérielles s'avère applicable à n'importe quel autre site français.

Cette méthode a pour vocation d'être intégrée dans un système d'information géographique, lui-même couplé à un outil de simulation des risques (logiciel Osiris). En appliquant la méthode sur une zone d'étude, des cartes de vulnérabilités humaine, matérielle et environnementale seront obtenues. Elles doivent ensuite être testées et validées par la Sécurité Civile avant de servir de support d'aide à la prévention et à la gestion de crise.

* **Chloé Griot, Sophie Sauvagnargues-Lesage, Gilles Dusserre**

Ecole des Mines d'Alès, LGEI. EMA.
6, av. de Clavières. 30319 ALES cedex.
Chloe.Griot@ema.fr

** **David Pearson**

Université Jean Monnet, Saint-Etienne, I.U.T. De Roanne.
20, Avenue de Paris. 42334 Roanne.
David.Pearson@Univ-St-Etienne.fr

*** **Chloé Griot, Henri Picheral**

Université Paul Valéry,

Références

- [BAS 93] Basak I., Saaty T., Group decision making using the analytic hierarchy process, *Mathematical Computer Modelling*, Vol. 17, No. 4/5, 1993, p. 101-109.
- [BON 98] Bonvicini S., Leonelli P., Spadoni G., Risk analysis of hazardous materials transportation : evaluating uncertainty by means of fuzzy logic, *Journal of Hazardous Materials*, 62, 1998, 15 p.
- [BRE 87] Brenot, J., Degrange, J.P., Despres, A., Hubert, P. & Pages, P. (1987). Trafic des matières dangereuses sur l'itinéraire pilote de l'agglomération de Grenoble. Evaluation du risque. Etude préliminaire. CEPN/INRETS, rapport 127.
- [ERK 97] Erkut E., Glickman T., Minimax Population Exposure in Routing Highway Shipments of Hazardous Materials. *Transportation Research Record*, 1602, 1997, p. 93-100.
- [FUL 96] Fulleringer D., « Incertitude du risque industriel majeur », Thèse de doctorat de troisième cycle, sous la direction de M. le Professeur M. Martin – Bouyer, Université de Savoie, Chambéry, 1996, 333 p.
- [FUS 94] Fustier B., « Prise de décision sur des critères qualitatifs », Note de recherche n°18, Centre d'Economie et de Modélisation Appliquées, Université de Corse, 1994, 16 p.
- [FUS 00] Fustier B., Evaluation, prise de décision et logique floue. *Economie Appliquée. Tome LIII, 1*, 2000, p. 155-174.
- [GHE 98] Gheorghie A.V., Vamanu D.V., Decision-support software tools for integrated risk assessment of hazardous substances in complex terrain, *International Journal of Environment and Pollution*, 9, 1998, p. 352-370.
- [GRI 00]^[1] Griot C., Sauvagnargues-Lesage S., Dusserre G., Picheral H., SIGRISC Project, Geographical information system for vulnerability assessment, Application to the risk of transport of dangerous goods, *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural*

Montpellier III. Route de Mende. 34199 Montpellier cedex 5

Resources and Environmental Sciences, Amsterdam, The Netherlands, July 2000, p. 267-270.

[GRI 00]^[2] Griot C., « SIGRISC », Rapport No. 2, Document interne L.G.E.I., Juin 2000, Ecole des Mines d'Alès, 64 p.

[HUB 88] Hubert P., Leroy M, Les transports de matières dangereuses, les risques et leur prévention, Journée d'étude du 27/10/88, *Revue Technique du Syndicat national des ingénieurs de l'industrie et des mines*, 6, 1988, 88 p.

[LEE 94] Leeming D.G., Saccomanno F.F., Use of quantified risk assessment in evaluating the risks of transporting chlorine by road and rail, *Transportation Research Record*, 1430, 1994, p. 27-35.

[MAN 97] Manche Y, Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles. *Revue de Géographie Alpine*, 2, 1997, p. 49-62.

[MER 87] Merunka D., *La prise de décision en management avec Expert Choice*, Editions Vuibert, Collection Gestion, Paris, 1987, 263 p.

[SAA 80] Saaty T., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980.

[SAP 97] *Le Sapeur-Pompier*, Interventions et retour d'expérience des sapeurs-pompiers, Journal Officiel de la Fédération Nationale des Sapeurs-Pompiers. Hors-Série préparé par la Commission Technique de la Fédération Nationale des Sapeurs-Pompiers, 1997, 672 p.

[SHE 97] Sherali H.D., Subramanian S., Kachroo P., Incident response : crew scheduling and rerouting of hazard carriers. *Spie Proceedings Series*, 3207, 1997, 258-269.

[WES 98] Westen C.J., Guide d'utilisation du logiciel ILWIS. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, The Netherlands, 1998.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier H.A. Donegan (Mathematics Division, Faculty of Informatics, University of Ulster) et B. Fustier (Centre d'Economie et de Modélisation Appliquées, Université de Corte) pour leur aide et leurs conseils pendant cette étude.