

# ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : METHODES ET OUTILS INNOVANTS

Y. ENNESSER & M. RAY

Egis, France

[yves.ennesser@egis.fr](mailto:yves.ennesser@egis.fr) [michel.ray@egis.fr](mailto:michel.ray@egis.fr)

## RESUME

Les événements climatiques extrêmes ont des impacts directs majeurs sur toutes les infrastructures routières. Les conséquences sont principalement économiques mais elles concernent également la sécurité. Le changement climatique influence considérablement la vulnérabilité des infrastructures à ces impacts. Habituellement, les infrastructures sont dimensionnées sur la base de réglementations et de codes de calcul qui fournissent des valeurs d'intensité types pour des phénomènes climatiques associées à une fréquence de retour (pluie décennale ou crue centennale par exemple). Si ce concept d'événement de référence, fondé sur une périodicité de retour, a été extrêmement utile par le passé, il devient dangereux dans la mesure où l'hypothèse sous-jacente, selon laquelle le climat de demain sera semblable à celui d'hier, n'est plus exacte.

En dépit d'incertitudes scientifiques persistantes concernant les questions liées au changement climatique, le coût de « l'inaction » met clairement en évidence le besoin crucial d'agir dès à présent et utilement. Des solutions concrètes et efficaces sont d'ores et déjà à la disposition des propriétaires et des exploitants d'infrastructures routières.

L'objectif de cet article est de présenter quelques initiatives remarquables, allant de l'approche institutionnelle amont à la gestion du risque en temps réel, issues de programmes de recherche nationaux et internationaux mis en œuvre ces dernières années, d'actions menées localement avec des propriétaires d'infrastructures et d'échanges dans le cadre de réseaux internationaux.

Mots clés : changement climatique, adaptation, infrastructures, risque, vulnérabilité, impact, incertitude, méthode, outil

## 1. JUSTIFICATION

Les événements climatiques extrêmes ont des répercussions directes majeures sur les infrastructures de transport. Ces conséquences sont principalement économiques, mais concernent également la santé et la sécurité. En 2005, l'ouragan Katrina en a fourni une triste illustration aux Etats-Unis. En France, la destruction ou la coupure de plates-formes routières ne sont pas rares (cf. Figure No 1), de même que les ruptures de lignes électriques. Les deux tempêtes de 1999 ont laissé des traces, tout comme la canicule de 2003 qui a entraîné une augmentation spectaculaire du taux de mortalité parmi les personnes âgées.

D'après l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), les phénomènes météorologiques extrêmes vont augmenter en quantité et en intensité dans les années à venir en France [1]. Les pays d'Europe du Nord ont déjà l'expérience des conséquences du changement climatique. Il a été reconnu que « les autorités routières ont besoin d'évaluer les effets du changement climatique sur le réseau routier et de remédier à la situation au niveau de la conception, de la construction et de l'entretien du réseau

routier » (Era-Net Road, 2008) [2]. Malgré des incertitudes scientifiques persistantes, le coût de « l'inaction » montre clairement la nécessité cruciale d'agir maintenant et de façon appropriée [3].



Figure 1 - 4 décembre 2003, inondation de la vallée du Rhône dans le sud de la France. L'autoroute A54 a été inondée pendant 11 jours.

Les infrastructures de transport sont généralement très vulnérables face aux événements climatiques qui se révèlent beaucoup plus forts que leur niveau de conception, et le sont souvent beaucoup moins face aux variations des moyennes de température, de précipitation ou de vent. Les infrastructures sont conçues sur la base de réglementations et de codes de calcul qui fournissent des données types concernant l'intensité des phénomènes climatiques (vitesse du vent, précipitations, profondeur de neige, variation de température, etc.), associées à une fréquence de retour (pluie décennale, crue centennale, etc.). Ces intensités (et ces fréquences) ont été définies à partir des phénomènes météorologiques vécus par le passé et sont réajustées sur la base des changements identifiés. Bien que ce concept d'événement de référence fondé sur une fréquence de retour se soit révélé très utile par le passé, il devient dangereux dans la mesure où l'hypothèse de base selon laquelle le climat de demain sera semblable à celui d'hier est devenue tout à fait fautive. Certaines règles de calcul ne sont plus adaptées au vu des prévisions de variabilité accrue du climat pour les temps à venir. Alors qu'il nous faut concevoir des ouvrages d'art présentant des durées de vie d'une centaine d'années ou plus, cette période correspond précisément à celle pendant laquelle le changement climatique est prévu pour être particulièrement important.

Les exploitants d'infrastructures de transport ont observé une augmentation de l'intolérance sociale vis-à-vis des risques (climatiques ou autres) au cours des années. Les besoins croissants de l'utilisateur-citoyen-consommateur et le développement de la judiciarisation de notre société peuvent être considérés comme deux facteurs supplémentaires qui rendent indispensables de nouvelles approches par les autorités compétentes, s'agissant de la vulnérabilité des réseaux dont ils ont la charge. Chacun sait à présent que le changement climatique est inévitable et qu'il est déjà en marche. En cas de litige, cela tendra à affaiblir considérablement la position de toute partie prenante en situation de responsabilité qui agit (ou, surtout, qui n'agit pas) comme s'il était totalement ignorant de la situation. De plus, la notion d'événement de référence ou de dimensionnement ne peut justifier une perte de contrôle de la situation lorsque les paramètres de référence ou de dimensionnement sont dépassés. Ceci est devenu de moins en moins tolérable et de plus en plus difficile à soutenir sur le plan social. D'autre part, dans la mesure où les budgets ne sont pas extensibles à l'infini, il est impossible de construire une infrastructure capable de résister à n'importe quel risque climatique. La seule manière raisonnable de concilier ces contraintes est d'exprimer les problèmes en termes de risques et d'y faire face par le biais d'un processus analytique multipartite. Ceci est d'autant plus indispensable que les phénomènes climatiques seront de plus en plus caractérisés par des probabilités d'occurrence et d'intensité plus complexes à définir que les données statistiques passées. Les contraintes croissantes auxquelles les budgets publics sont soumis ne doivent pas être une raison indirecte pour adopter une position attentiste. Les nouveaux Partenariats Public-Privé donnent un exemple de la façon d'intégrer des initiatives innovantes dans le secteur des transports.

Dans ce contexte, une large gamme d'approches méthodologiques et d'outils a été mise au point pour aider les acteurs du secteur des infrastructures de transport à gérer les événements climatiques extrêmes et le changement climatique. Cette expérience est décrite dans les chapitres ci-dessous, de l'approche institutionnelle amont à la gestion du risque en temps réel.

## **2. EVALUATION DE LA CAPACITE DE REACTION DU SECTEUR DES TRANSPORTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

L'adaptation au changement climatique est un problème émergent y compris dans les pays développés. A l'heure actuelle, les pays qui se mobilisent sont en nombre limité et la question constitue encore un thème de recherche. Plusieurs politiques et stratégies nationales ont été mises en place [cf. « Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation » (Impacts potentiels du changement climatique sur les transports aux Etats-Unis), 2008] [4], mais seules quelques approches méthodologiques ou techniques ont été lancées [cf. « Climate Change Adaptation Strategy, UK Highways Agency » (Stratégie d'adaptation au changement climatique, Agence chargée des routes au Royaume-Uni), 2009] [5].

Les pays du Moyen-Orient et du Maghreb risquent d'être gravement affectés par le changement climatique. Les modèles climatiques y prévoient en effet des événements climatiques extrêmes plus fréquents, caractérisés par des pluies torrentielles et des épisodes de tempête. Dans le secteur des transports notamment, ces événements pourraient avoir des conséquences dramatiques sur les infrastructures : inondation, érosion (cf. photo ci-dessous), destruction de remblais, d'ouvrages de protection, de viaducs et de ponts. Peu de pays en développement ont commencé à s'attaquer à ce problème.



© Abdelkebir El Alouaoui

Figure 2 - Destruction d'une route provinciale par une crue soudaine dans les Montagnes de l'Atlas (Maroc, 2006)

En 2008, une « Etude pilote sur l'adaptation au changement climatique dans le secteur des transports » a été conduite par la Banque Mondiale au Maroc [6]. Cette étude pilote était une tentative pour sensibiliser les pays émergents à cette question. Une approche de l'évaluation du risque a été mise en œuvre en trois étapes successives : analyse du risque, gestion du risque et définition de mesures d'adaptation.

1. Sur la base des informations disponibles (prévisions météorologiques à long terme notamment) et de deux études de cas, une typologie des événements climatiques extrêmes (et de leurs impacts potentiels) affectant les secteurs routier et ferroviaire a été définie. Les principales vulnérabilités aux événements climatiques extrêmes sur les infrastructures de transport sélectionnées ont été identifiées. Les impacts potentiels en termes de maintenance et d'exploitation des infrastructures ont été décrits. Une évaluation approximative des coûts pouvant résulter d'événements climatiques extrêmes a été réalisée.
2. Des entretiens avec les autorités marocaines ont permis d'évaluer la compréhension et la connaissance des questions liées à l'adaptation au changement climatique dans le secteur des transports, ainsi que l'intérêt qui leur est porté. Dans le même temps, l'ensemble des données relatives aux vulnérabilités des secteurs routier et ferroviaire au Maroc, à l'impact des événements climatiques extrêmes sur les infrastructures routières et ferroviaires ainsi que sur leur fonctionnement, et aux mesures d'adaptation envisageables ont été recueillies, examinées et évaluées.
3. Pour finir, l'étude a décrit une série de mesures préventives et opérationnelles : amélioration des connaissances et mise au point d'outils d'aide à la décision ; inventaire des points critiques du réseau de transport en termes de risques climatiques ; modification des normes de construction concernant, en particulier, les ouvrages hydrauliques ; mise en œuvre d'analyses de risques et d'analyses coûts-

avantages dans les processus de prise de décision pour des investissements importants ; anticipation et gestion d'événements extrêmes à l'aide de méthodes et d'outils spécifiques (RIMAROCC et GERICI par exemple) ; définition et planification de programmes de reconstruction ou de mise aux normes d'infrastructures clés susceptibles d'être affectées par le changement climatique ; et renforcement du cadre institutionnel.

### 3. EVALUATION DES QUESTIONS HYDROMETEOROLOGIQUES LORS DE LA CONCEPTION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

L'étude de cas ci-dessous, concernant l'évaluation du phénomène El Niño sur le réseau routier côtier du Pérou, peut être considérée comme l'une des premières études réalisées sur l'adaptation au changement climatique. Elle a été menée en 1999, dans le cadre d'un programme lancé par le Gouvernement péruvien sur financement BIRD/BID [7].

Le phénomène El Niño provoque des dégâts considérables sur le littoral péruvien, notamment sur ses infrastructures routières. En 1983, un de ces épisodes (période de retour estimée à 50 ans) a détruit un grand nombre de ponts. Tous ont été reconstruits sur la base des mêmes modèles de conception que les précédents. En 1997-1998, un nouvel épisode, aussi sévère que celui de 1983, a eu les mêmes conséquences sur les mêmes ouvrages (cf. Figure 3).



Figure 3 - Un important pont détruit par un épisode du phénomène El Niño en 1998

L'objectif de l'étude était d'analyser la corrélation entre le phénomène El Niño et l'hydrométéorologie régionale, de manière à mettre en place une stratégie de prévention globale contre des événements semblables à ceux provoqués par le phénomène en 1997-1998. L'approche méthodologique a comporté deux phases : (i) évaluation de l'étendue et de la fréquence des crues/inondations provoquées par le phénomène sur la base de nouveaux paramètres hydrométéorologiques ; (ii) mise en place, à l'échelle régionale, d'une stratégie globale de prévision. Les principales phases méthodologiques peuvent être résumées comme suit :

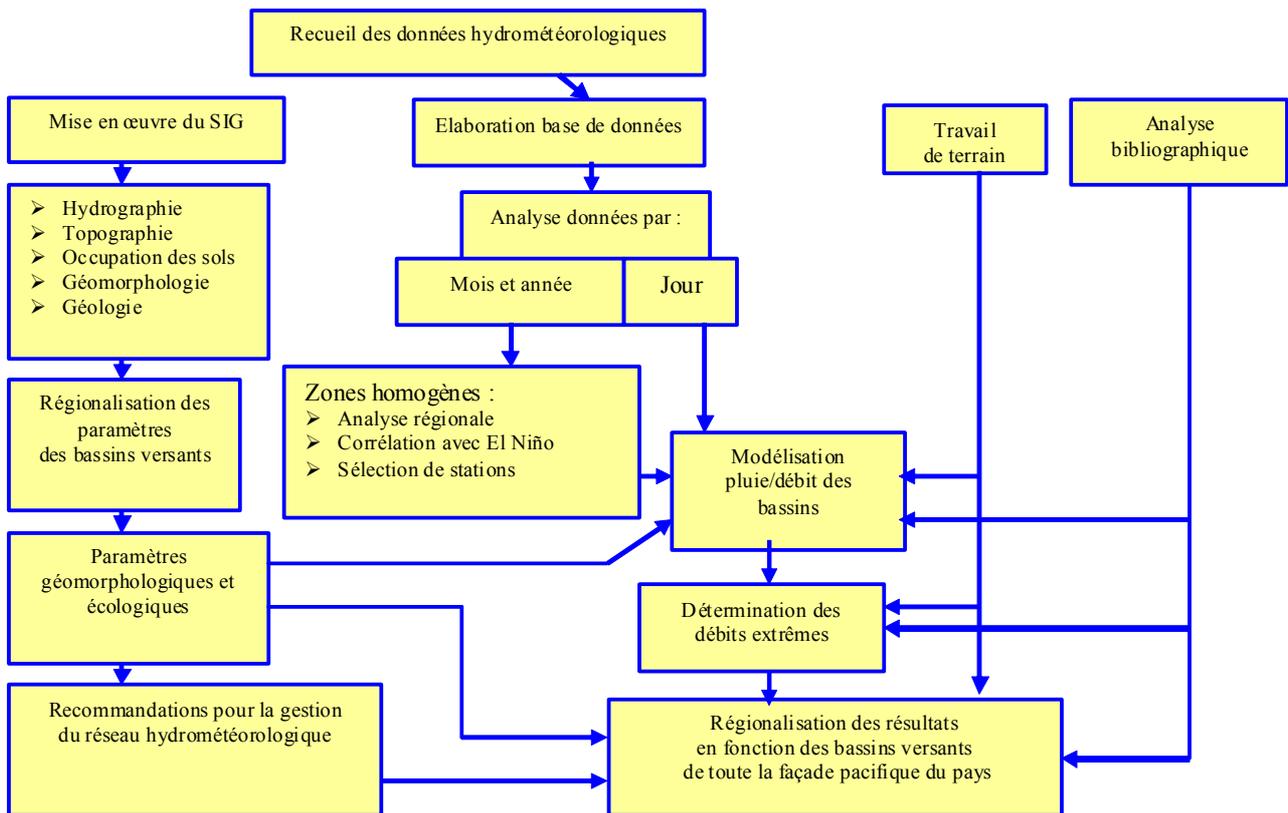


Figure 4 – Phases méthodologiques de l'évaluation du phénomène El Niño sur le réseau routier côtier du Pérou

Des recommandations ont été fournies pour adapter les infrastructures de transport. A titre d'exemple, plutôt que de reconstruire des ponts coûteux avec de grandes incertitudes concernant leur durée de vie, il a été décidé, en certains endroits critiques, de mettre en place des radiers submersibles et des structures « fusibles » en cas de forte intensité du phénomène, l'infrastructure étant normalement ouverte au trafic le reste du temps. L'étude démontre qu'une erreur dans la compréhension de la nature des changements au niveau des phénomènes climatiques peut avoir des conséquences extrêmement coûteuses alors que des solutions simples et peu onéreuses peuvent exister.

#### 4. GESTION DES RISQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

L'adaptation aux conditions climatiques changeantes doit se fonder sur une évaluation des risques et des différentes stratégies qui peuvent être retenues. Il est par conséquent nécessaire de disposer d'une méthode pour aider à structurer l'approche des risques et évaluer les résultats des différentes actions en termes de coûts-avantages. C'était l'objectif du projet RIMAROCC lancé en 2008 [8]. RIMAROCC [« Risk Management for Roads in a Changing Climate » (gestion des risques encourus par les infrastructures routières dans des conditions climatiques évolutives)] est une approche méthodologique européenne conjointe, financée par 11 administrations routières nationales, par le biais du programme de recherche « ERA-NET Road » (6<sup>ème</sup> Programme Cadre de la Commission Européenne).

La méthode RIMAROCC est conçue pour être générale et répondre aux besoins communs des propriétaires et des gestionnaires d'infrastructures routières en Europe. Elle présente un cadre et une approche globale de l'adaptation au changement climatique. Elle est fondée sur une analyse des risques et des outils de gestion des risques existants pour les infrastructures routières dans les pays membres du programme ERA-NET et dans d'autres pays. Des réflexions portant sur l'analyse des risques et le changement climatique sont actuellement menées dans de nombreux pays. La méthode proposée est conçue pour être compatible et fonctionner en parallèle avec les méthodes existantes. Elle est également cohérente avec la norme ISO 31000 relative à la gestion des risques.

Plusieurs étapes ont été nécessaires pour mettre au point la méthode RIMAROCC. Dans un premier temps, les facteurs climatiques critiques ont été identifiés grâce à une étude bibliographique et des ateliers organisés avec des climatologues. Plusieurs méthodes existantes de gestion des risques ont ensuite été examinées. Pour finir, des critères et des indicateurs de risques ont été établis. A partir des résultats de ces activités, les contours de RIMAROCC ont été esquissés, puis testé au cours de plusieurs études de cas, en France, en Norvège, en Suède et aux Pays-Bas, à des échelles géographiques diverses : au niveau d'un ouvrage (un pont par exemple), d'une section (section autoroutière de 20-50 km par exemple), d'un réseau (réseau de routes principales de 100-1 000 km par exemple) et d'une région (territoire régional par exemple).

La méthode proposée est un processus cyclique destiné à améliorer en permanence les résultats et à capitaliser les expériences. Elle commence par une analyse du contexte général, au cours de laquelle les critères de risque sont établis, et se termine par une phase de réflexion pendant laquelle les expériences et les résultats sont étayés et mis à la disposition de l'organisation routière. En pratique, ces phases ne sont pas toujours entièrement dissociées. Une partie du travail peut être assurée de façon simultanée, mais il est très important que la structure logique soit respectée. Des boucles rétroactives entre chaque étape de la démarche permettent d'enrichir la réflexion (cf. Figure 5).

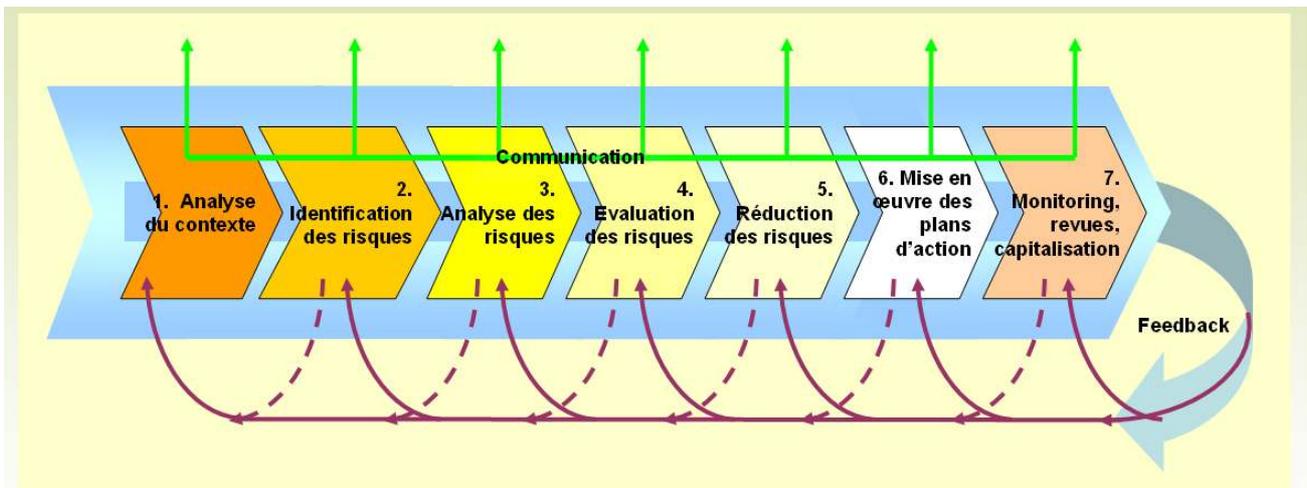


Figure 5 - Cadre de la méthode RIMAROCC de gestion des risques pour les infrastructures routières dans un climat évolutif

La communication permanente avec les parties prenantes, les experts extérieurs et autres intervenants est très importante. Elle est figurée par les flèches (vertes) tout au long du processus. Les grandes lignes des étapes de la méthode sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 - Phases clés et étapes de la méthode RIMAROCC de gestion des risques

Phases clés	Étapes
1. Analyse du contexte	1.1 Définition du contexte général 1.2 Identification du contexte particulier de chaque niveau d'analyse 1.3 Définition des critères de risque et d'indicateurs adaptés à chaque niveau d'analyse
2. Identification des risques	2.1 Identification des facteurs de risques 2.2 Identification des vulnérabilités 2.3 Identification des conséquences possibles
3. Analyse des risques	3.1 Etablissement de la chronologie des risques et de scénarios 3.2 Détermination de l'impact des risques 3.3 Evaluation des occurrences 3.4 Fourniture d'une vue d'ensemble des risques
4. Evaluation des risques	4.1 Evaluation des aspects quantitatifs avec des analyses appropriées (ACB ou autres) 4.2 Comparaison des risques climatiques avec les autres types de risque 4.3 Identification des risques acceptables
5. Mitigation des risques	5.1 Identification des options 5.2 Evaluation des options 5.3 Négociation avec les organismes de financement 5.4 Elaboration d'un plan d'action
6. Mise en œuvre de plans d'action	6.1 Déclinaison d'un plan d'action à chaque niveau de responsabilité 6.2 Mise en œuvre de plans d'adaptation
7. Suivi, actualisation et capitalisation	7.1 Suivi et revue réguliers 7.2 Actualisation en cas de données nouvelles ou de retard dans la mise en œuvre 7.3 Capitalisation du retour d'expérience sur les événements climatiques et l'avancement de la mise en œuvre
Communication et diffusion de l'information	

## 5. IDENTIFICATION DES VULNERABILITES DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Sur un cofinancement du Ministère français de l'Équipement, le RGCU (Réseau Génie Civil et Urbain) a lancé en 2003 un programme de recherche sur les impacts du changement climatique sur les infrastructures de transport. Le principal résultat de ce programme a été la mise au point, en 2007, d'un outil spécifique appelé GERICI (outil de Gestion des Risques liés aux Changements Climatiques pour les Infrastructures) développé pour les propriétaires et les exploitants d'infrastructures [9].

A partir d'une approche fondée sur l'analyse des risques, GERICI a permis de développer sous SIG un modèle de mesure de la vulnérabilité de tous les éléments sensibles d'une infrastructure (autoroute dans le cas précis, mais transposition possible aux autres infrastructures de transport linéaires). La méthode d'analyse des risques appliquée dans GERICI est une combinaison de plusieurs approches existantes telles que celles décrites dans les publications de l'AIPCR, ou la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), basée sur les enseignements tirés de la

gestion des risques dans des domaines ultra-sensibles tels que celui de l'industrie nucléaire.

L'approche systémique appliquée dans GERICI met en évidence les liens entre les éléments structurant les problématiques de danger et de risque. Elle a permis de modéliser le danger dans des termes généraux, sous la forme d'un enchaînement de processus conduisant à ce qu'une source de danger ait des effets désastreux sur les infrastructures, les usagers, les résidents, l'environnement, etc. Le schéma ci-dessous illustre les principales phases de GERICI : les cases vertes correspondent aux aspects généraux ; les bleues sont spécifiques au propriétaire de l'infrastructure.

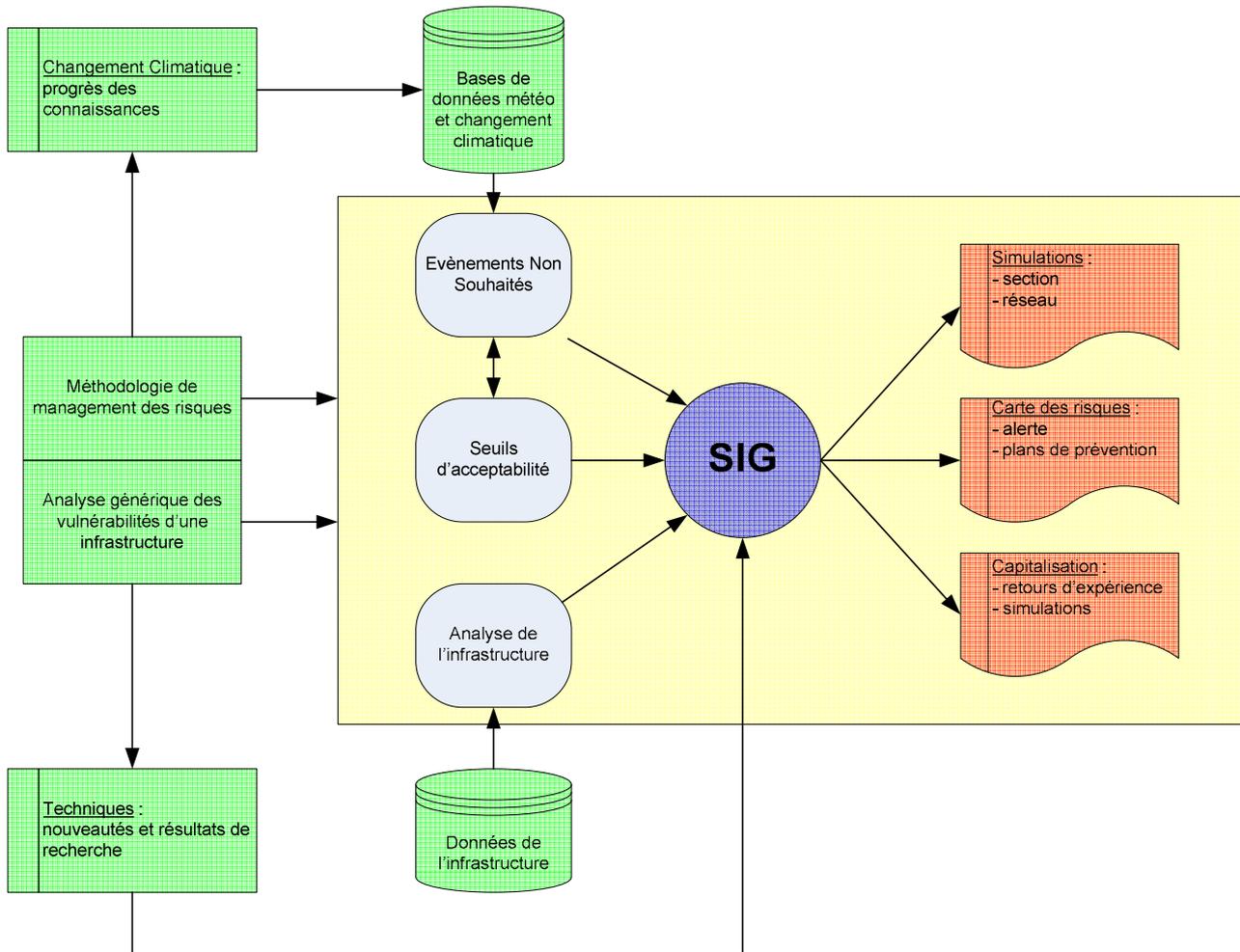


Figure 6 - L'approche méthodologique de GERICI

GERICI peut être utilisé de deux façons. En mode « simulation », l'outil peut être utilisé pour identifier les sections et objets vulnérables de l'infrastructure, permettant ainsi de prendre des mesures préventives par niveau de priorité (cf. Figure 7). En mode « alerte », lorsqu'une alerte est émise par un institut météorologique, le SIG peut servir à mesurer les conséquences probables pour l'infrastructure, et à aider les exploitants dans la prise de décision (cf. Figure 8).

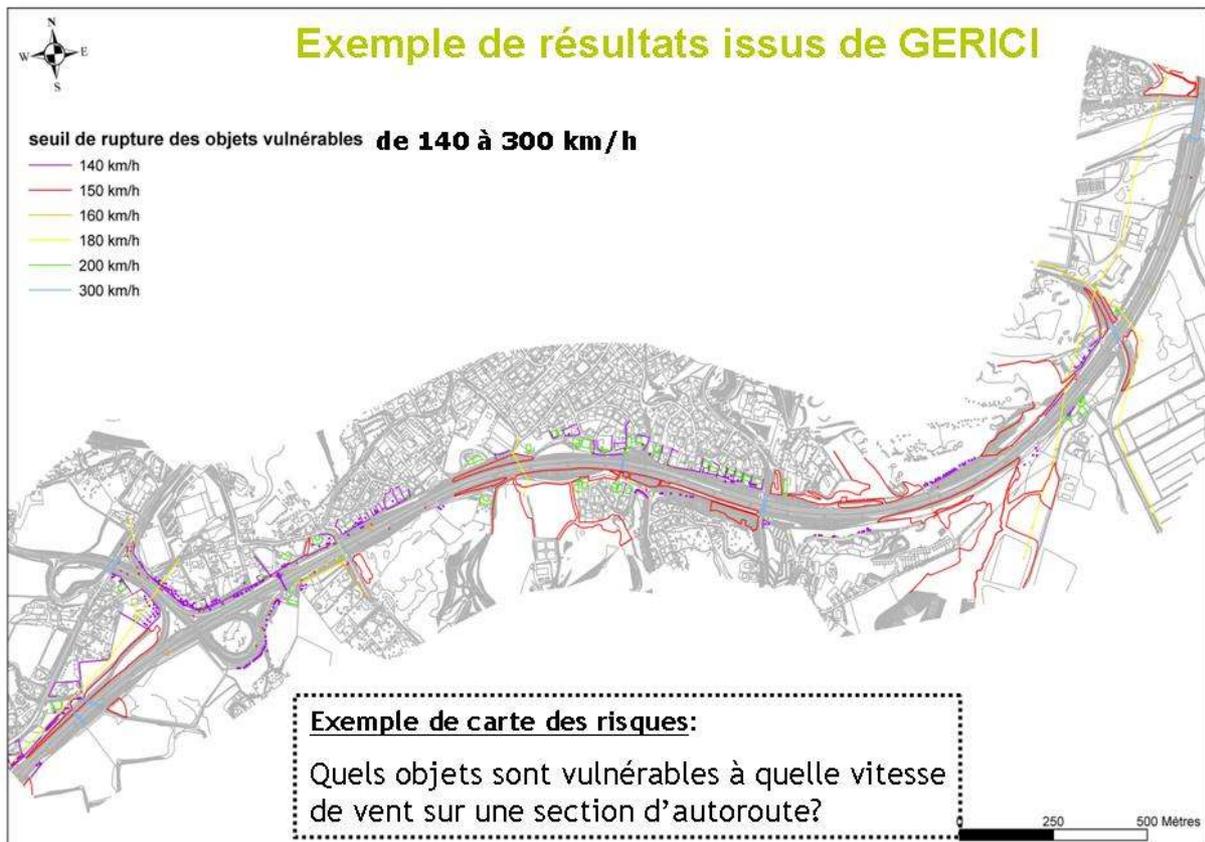


Figure 7 - Une application de GERICI : vulnérabilité d'infrastructures de transport aux vents forts

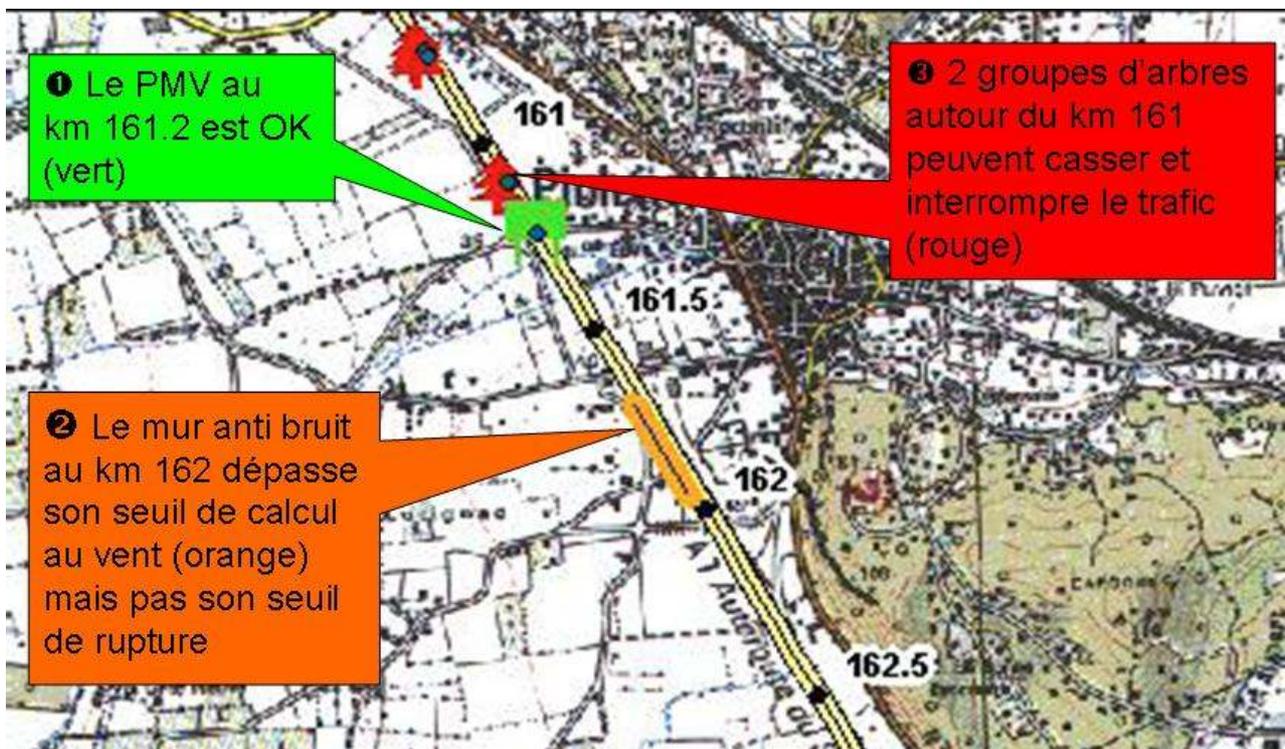


Figure 8 - Une application de GERICI : simulation d'un vent de 160 km/h

Une expertise a progressivement émergé de ces analyses pour évaluer la vulnérabilité d'un itinéraire, puis d'un réseau entier. GERICI reste le seul outil de ce type sur la scène internationale et son approche a été utilisée comme principale référence pour le projet RIMAROCC.

## 6. PREVISION ET GESTION D'ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTREMES EN TEMPS REEL

Les dégâts causés par les crues/inondations récentes (Nouvelle-Orléans aux Etats-Unis, Marseille et Nîmes en France) ont montré combien il est important pour les municipalités et les exploitants d'infrastructures de transport de réagir de façon efficace et pertinente. Face à une situation de crise (crue), les décisions doivent se prendre sur la base des informations disponibles, qui sont souvent très limitées, faute de temps pour les obtenir, les gérer et les analyser. A Nîmes, ville du Languedoc-Roussillon exposée à des précipitations très intenses, l'inondation de 1988 (plus de 400 mm de précipitation en 6 heures) a provoqué 600 millions d'euros de dégâts, causé la mort de 10 personnes et affecté 45 000 sinistrés.

Dans ce contexte, la municipalité de Nîmes a lancé le développement d'un nouvel outil capable de prévoir et de gérer les inondations urbaines en temps réel [10]. L'objectif d'ESPADA (Evaluation et Suivi des Pluies en Agglomération pour Devancer l'Alerte) est d'anticiper les crises grâce au suivi hydrométéorologique et à une organisation adaptée (cf. Figure 9).



Figure 9 – Le système ESPADA

Le système ESPADA est en mesure d'assurer les tâches suivantes en temps réel :

- Prévision météorologique en amont, par le biais d'un système de modélisation fondé sur des prévisions de précipitations issues d'images radar (prises toutes les 15 minutes pour chaque sous-bassin du bassin versant), permettant de prévoir les épisodes pluvieux extrêmes avec une précision suffisante.
- Prévision hydrologique précoce fondée sur un modèle pluie-débit et un modèle hydraulique développés pour les zones urbaines (équipé de 10 pluviomètres et 20 limnigraphes, avec recueil de données toutes les 10 minutes).
- Alerte précoce des risques de crue grâce à un modèle d'analyse des risques indiquant l'intensité de la crue et la corrélation immédiate entre la situation météorologique et hydrologique et des scénarios de crue prédéfinis sur la base des épisodes de crue extrême antérieurs (cf. Figure 10).
- Gestion et ajustement des scénarios et alertes de crue permettant d'adapter et d'accélérer la mise en œuvre du plan de crise.



Figure 10 - Exemple de scénario de crue (risques + vulnérabilités) utilisé avec le système ESPADA pour la ville de Nîmes

Le système « prêt à l'emploi » inclut l'ensemble des équipements nécessaires pour la salle de gestion de crises (meubles, matériel informatique, logiciels, équipements de communication, système d'appel automatique, alimentation électrique sécurisée, garantie et entretien) ainsi qu'un système de vidéosurveillance sur place.



Figure 11 - La salle de gestion de crise de la ville de Nîmes

Les premiers résultats en la matière, obtenus pour les inondations de septembre 2005 (fréquence estimée : 50 ans), ont été jugés très satisfaisants. Le système ESPADA est par conséquent très prometteur et constitue la preuve des progrès importants réalisés en associant les progrès de l'informatique et l'amélioration des connaissances concernant le contexte hydrologique urbain.

ESPADA s'est vu attribuer le Prix Spécial du Grand Prix National de l'Ingénierie par le Ministère de l'Équipement en 2006. Il est à présent utilisé dans plus de 18 villes/collectivités.

## **7. ALERTE DES PROPRIETAIRES, EXPLOITANTS ET USAGERS DES INFRASTRUCTURES**

Le bassin versant du Lez (une rivière au régime très changeant) s'étend sur 455 km<sup>2</sup> et 28 communes (dans les départements français de la Drôme et du Vaucluse). Les dégâts causés par les dernières crues (1993 et 2003) ont montré l'importance du défi en termes à la fois humains (3 morts) et financiers (520 millions d'euros). La gestion du Lez est assurée par le Syndicat Mixte du Bassin Versant du Lez (SMBVL) qui a décidé de faire l'acquisition d'un système complet et opérationnel capable d'alerter la population rapidement et de manière fiable en cas de risque de crue, mais également pendant les périodes d'étiage.

Le projet TRACE (système de Télécommunication Radio pour l'Alerte de Crue et d'Etiage) qui en a résulté a conduit à un outil breveté unique et innovant présentant les fonctions suivantes [11] :

- Transmission de l'information sur les conditions hydrométéorologiques du bassin versant avec la fourniture de données en temps réel par internet.
- Transmission en temps réel de l'alerte de crue ou d'étiage sur la base de seuils prédéfinis.
- Sécurisation de la transmission de l'information pendant les épisodes météorologiques exceptionnels (perturbation des méthodes classiques de

transmission et saturation des réseaux) avec mise en place d'un réseau radio numérique propriétaire pour le SMBVL, cf. Figure 12.

- Transmission de l'information et réception des alertes sur paggers (voie radionumérique) aux membres des cellules de crise dans les 28 communes concernées.
- Mise en place d'un système d'appel en masse externalisé destiné à alerter la population située dans le bassin exposé aux risques.
- Mise à la disposition des mairies de téléphones satellites pour communiquer avec l'extérieur lors de la gestion de la crise et de l'après crise.

Grâce à son principe fondé sur la définition de seuils d'alerte personnalisés (crues, étiages), le système est pérenne et permet de s'adapter aux changements dans les bassins versants (urbanisation, travaux en rivière, etc.) et aux changements climatiques. Ce système d'alerte clés en main peut naturellement être ajusté aux besoins des propriétaires, des exploitants et des usagers des infrastructures de transport.



Figure 12 – Station pluviométrique automatique, avec système téléométrique incorporé, installée dans le cadre du projet TRACE

## 8. CONCLUSION

Face au changement climatique, contrairement aux idées reçues : 1) il n'y a pas de temps à perdre ; 2) il est possible aujourd'hui d'agir utilement. Trois types de démarches s'imposent :

- Certaines règles de conception, notamment celles utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, doivent être modifiées. Basées sur l'utilisation de séries statistiques sous un climat supposé immuable, elles s'avèrent obsolètes – voire dangereuses – avec un climat évoluant rapidement (cf. étude de

cas El Niño au Pérou). Ces approches normatives sont amenées à être progressivement remplacées par des méthodes faisant appel à l'analyse des risques (cf. démarche RIMAROCC), déjà utilisées en association avec des analyses coût-bénéfice sur des sites à enjeu majeur de protection contre les risques naturels. Notons que le surcoût de l'adaptation est généralement faible lorsque l'action est décidée dès la conception.

- Les processus de conception et d'exploitation doivent être adaptés. Ils doivent s'ouvrir à des coopérations plus larges : avec les services météorologiques, entre concepteurs et exploitants (juste équilibre entre le « durcissement » de l'infrastructure et l'adaptation des conditions de maintenance et d'exploitation), entre les modes de transport (afin de garantir la continuité du service aux usagers), avec les acteurs du territoire (pour intégrer les enjeux socioéconomiques). La notion de "niveau de service dégradé mais acceptable" doit se développer concrètement, pour mieux optimiser l'exploitation des infrastructures pendant les crises, qui peuvent devenir plus fréquentes et moins prévisibles. C'est au travers de réflexions globales et transversales, conduites à un niveau institutionnel, qu'il est possible de trouver des solutions concrètes, efficaces et relativement économiques (cf. étude de cas au Maroc).
- Les infrastructures existantes nécessitent des actions concrètes. L'analyse de la criticité générale de chaque section de réseau (situation de référence) est une étape indispensable, dépendant des itinéraires alternatifs, des besoins d'évacuation, des zones desservies de population dense/d'emploi/d'hôpitaux ... Elle permet d'évaluer les « effets dominos » et sert à l'identification et au traitement prioritaire des infrastructures stratégiques. Les maîtres d'ouvrages doivent ensuite commencer à évaluer et traiter les risques liés au changement climatique. Des outils et démarches méthodologiques (RIMAROCC, GERICI, ESPADA, TRACE, ...) sont déjà disponibles ou sont actuellement développés en ce sens.

## REFERENCES

1. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (2009). « Changement climatique. Coût des impacts et pistes d'adaptation ». La Documentation Française, 195 p.
2. Era-Net Road (2008). « Road Owners Getting to Grips with Climate Change ». Guide for Applicants for the Joint Call for Proposals, 12 p.
3. M. Ray, Y. Ennesser (2009). « Les enjeux d'adaptation pour les infrastructures routières », IDDRI, Organisation Internationale de la Francophonie, Liaison Énergie-Francophonie, numéro 85, p 98-102.
4. National Research Council of the National Academies (2008). « Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation », Transportation Research Board Special report 290, 298 p.
5. Parsons Brinckerhoff et al. (2009). « Climate Change Adaptation Strategy. Volume 1 », UK Highways Agency, 46 p.
6. Y. Ennesser (2008). « Transport et Adaptation au Changement Climatique. Etude Pilote au Maroc », Egis Bceom International, Ministère marocain des TransportS, Banque Mondiale, 35 p.
7. Egis Bceom International, SOFI Consult, IRD (1999). « Evaluation hydrométéorologique du phénomène El Niño sur la Côte Pacifique » (en Espagnol), Ministère péruvien de l'Économie, BIRD/BID, 244 p.
8. SGI, Egis, Deltares, NGI (2010). « Risk Management for Roads in a Changing Climate. A Guidebook for the RIMAROCC Method ». Era-Net Road, 81 p.
9. H. Guérard, M. Ray (2006). « Le projet Gerici : gestion des risques liés au changement climatique pour les infrastructures », Egis, RGRA, No 854, décembre 2006 – janvier 2007, 8 p.
10. M. Raymond, N. Peyron, A. Martin (2006). « ESPADA, un outil unique de gestion des crues urbaines ; premiers retours d'expérience pour la crue de septembre 2005 à Nîmes », Egis Eau, 7<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur l'Hydroinformatique, HIC 2006, Nice
11. N. Peyron, E. Fazi, F. Bressand (2008). « Projet pilote d'alerte de crue dans un bassin versant géré par une collectivité territoriale », Egis Eau, 13<sup>ème</sup> Congrès Mondial de l'Eau, 1-4 septembre, Montpellier.