

Rupture des digues du Petit-Rhône : coupure de A54 pendant 11 jours (Gard-12/2003)
Rhône levees broken: A54 motorway flooded for 11 days

AUTEURS

Hervé Guérard
Chef de projet
Groupe Egis
Scetauroute

Michel Ray
Président du Comité de pilotage
Directeur technique et de l'innovation
Groupe Egis

Le projet Geric : gestion des risques liés au changement climatique pour les infrastructures

Premières leçons de trois années d'expérience d'étude des vulnérabilités

Le changement climatique modifie significativement la vulnérabilité des infrastructures, et des concepts comme la « crue centennale » peuvent même devenir dangereux dans ce nouveau contexte. Des conclusions intéressantes pour les maîtres d'ouvrage et un outil concret pour les exploitants d'infrastructures résultent de trois ans de recherche réalisée après la labellisation par le Réseau génie civil et urbain (RGCU) et avec un cofinancement du ministère de l'Équipement. Ce projet, piloté par Egis (Scetauroute et Bceom) regroupe Sanef, ASF, Météo-France, LCPC et Esri France. L'article décrit les étapes de la démarche et le système d'information géographique (SIG), outil d'aide à la réflexion technique et stratégique, convivial et transposable.

Le consortium Gerici

7 partenaires

| Groupe Egis : | |
|--|--|
| Scetauroute Hervé Guérard Gilles Habasque Marc Méreau Philippe Rome Emmanuelle Gotkovsky | Pilote du projet Expertises techniques Création du système d'information géographique (SIG) |
| Egis DTI Michel Ray | Sponsor du projet |
| Bceom Mireille Raymond | Expertise hydraulique |
| Sanef Michel Guérin Vincent Hulot Guillaume Maréchal | Concessionnaires : attentes et besoins des exploitants et gestionnaires d'infrastructures |
| Asf (une société du groupe Vinci Concession) Jean-Pierre Marchand | |
| Météo France Paul Pettré | Données météo et prévisions climatiques |
| Laboratoire central des Ponts et chaussées (LCPC) Georges Raimbault | Expertises diverses |
| Esri France Marie-Claude Musseau | Conseil SIG |

3 experts seniors :

| | |
|------------------|------------------------------------|
| Pierre Périlhon | Expert risques |
| Vincent Chagnaud | Expert en socio-économie |
| Martine Jauroyon | Expert <i>knowledge management</i> |

Les débats scientifiques s'approfondissent sur les poids respectifs des différentes causes, mais ces experts prédisent une hausse des températures moyennes de la planète durant la centaine d'années à venir, en continuité des dernières décennies. Cette hausse pourrait être plus ou moins contenue en fonction de la capacité de la société à réduire ses émissions de GES, notamment le CO₂, principal accusé dans le réchauffement.

Des tendances claires, mais des prévisions détaillées difficiles à préciser aujourd'hui

De nombreux modèles de simulation climatique planétaire sont développés. Ils s'affinent au fil des mois, en fonction des données collectées, de l'évolution continue des connaissances (interaction air/océans, action des nuages et de la vapeur d'eau, ...) et de la diminution des mailles des modèles (qui va de pair avec l'augmentation de la puissance des calculateurs). Si leurs principales conclusions sont cohérentes (hausse

des températures avec une répartition inégale à la surface du globe, plus grande variabilité en fréquence et intensité des phénomènes météo), il n'est pas possible actuellement d'en déduire d'une façon sûre une tendance plus précise sur l'évolution du climat en France. De ce fait, à 5, 20 ou 50 ans, on ne peut pas, pour l'instant, quantifier précisément l'évolution des phénomènes pluvieux, neigeux ou venteux.

Des impacts certains et grandissants sur les infrastructures

Les événements climatiques extrêmes ont des impacts directs et importants sur toutes les infrastructures de transport, qu'elles soient routières, ferroviaires, aéroportuaires ou d'énergie. Les conséquences sont d'abord économiques, mais aussi sanitaires et sécuritaires. L'ouragan Katrina en a malheureusement été le triste exemple. En France, des destructions ou coupures d'itinéraire routier ne sont pas rares (photos 1 et 2), ainsi que des ruptures de lignes électriques.



Photo 1
Incendie de forêt : coupure de A8 (Var-été 2003)
Forest fire on French Riviera (summer 2003)



Photo 2
Episode cévenol : coupure de A7 (Gard-09/2002)
Very strong storms in Cevennes: closure of A7 motorway

Un changement climatique avéré

Il n'est plus de semaine, voire de jour, sans que les médias ne fassent état du changement climatique.

Quelques manifestations mesurables et parfois très visibles sont là pour étayer la thèse d'un réchauffement de la planète :

- la température moyenne mondiale de l'air s'est déjà élevée de 0,55 °C depuis une trentaine d'années, avec des disparités très importantes selon les régions (+ 4 à 7 °C en Arctique sur 100 ans) ;
- des canicules sans précédent : été 2003 en Europe de l'ouest, été 2006 en Australie ;

- deux fois plus d'ouragans de catégorie 4 et 5 depuis 1970 (du fait du réchauffement des océans) ;
- les banquises fondent (le « passage du Nord-Ouest », au nord du Canada, devient une réalité).

Ces évolutions climatiques significatives et plus rapides que par le passé sont analysées et suivies par des experts réunis sous l'égide de l'ONU dans le Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui les attribuent pour l'essentiel à un réchauffement planétaire dû à l'accumulation de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique.

Système Gestion des risques

Les esprits ont été marqués par les deux tempêtes de 1999 et par les conséquences de la canicule sur la surmortalité significative des personnes âgées. La comparaison des incertitudes scientifiques qui demeurent encore et des coûts d'une « non-action » montre clairement qu'il faut vraiment agir maintenant, mais d'une façon pertinente.

D'après l'Observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC), les phénomènes météorologiques extrêmes seront de plus en plus nombreux et importants dans les années à venir en France.

Le concept de la traditionnelle « crue centennale » était très utile – Il est devenu dangereux s'il n'est pas adapté

Les infrastructures sont dimensionnées dans le respect de règlements et de codes de calcul qui fournissent

des intensités types de phénomènes climatiques : vitesse de vent, intensité de pluie, hauteur de neige, variation de températures, ... associées à une fréquence de retour : pluie décennale, crue centennale, ... Ces intensités (et fréquences) ont été définies en corrélation avec des phénomènes météo survenus dans le passé, et sont réajustées en fonction de l'évolution constatée de ces phénomènes : ce fut le cas notamment pour la neige après les chutes exceptionnelles relevées en France dans les années 90.

Or, si ce concept d'événement de référence, basé sur une périodicité de retour, a été très utile jusqu'à présent, il devient dangereux dans la mesure où l'hypothèse sous-jacente que le climat de demain sera semblable à celui d'hier est devenue fautive. Certains règlements de calcul risquent de ne pas s'accommoder de façon satisfaisante de la plus grande variabilité du climat prévue pour l'avenir.

Un exemple probant est le cas des ponts de l'autoroute principale du Pérou avec El Niño. Il faut concevoir des ouvrages pour des durées d'une centaine d'années ou plus, or c'est justement la période pendant laquelle le changement climatique va être fort.

El Niño et le Pérou

En 1983, un épisode El Niño (de période de retour estimée à 50 ans) a détruit une grande quantité de ponts. Ils ont tous été reconstruits avec les anciens modèles de dimensionnement. En 1998, un nouvel épisode El Niño aussi important que celui de 1983 a eu les mêmes effets, sur les mêmes ouvrages. Une étude a alors été confiée à Bceom qui a modifié en profondeur l'ancienne approche du problème. En certains endroits critiques le résultat a conduit à la réalisation de gués submersibles et d'ouvrages fusibles en cas de fort El Niño, l'infrastructure étant circulaire normalement le reste du temps.

Cet exemple montre qu'une erreur de compréhension de la nature de l'évolution des phénomènes climatiques peut avoir des conséquences extrêmement coûteuses, alors que des solutions simples et peu coûteuses peuvent exister.

y a dépassement. Cela est devenu de moins en moins tolérable et difficile à soutenir socialement.

En revanche, les budgets n'étant pas extensibles à l'infini, il n'est pas possible de construire une infrastructure capable de résister à n'importe quel aléa climatique.

La seule façon raisonnable de concilier ces contraintes est de poser les problèmes en termes de risques et de les traiter par une analyse multiacteurs. C'est d'autant plus nécessaire que les aléas climatiques devront de plus en plus être caractérisés par des probabilités d'occurrence et d'intensité plus complexes que par le passé.

Les contraintes croissantes sur les budgets publics ne doivent pas être une raison indirecte d'une position attentiste, les nouveaux partenariats public-privé sont un exemple des façons de mobiliser de nouvelles forces innovantes de nos secteurs.

Le projet Gerici vise l'objectif de relever ces défis

Fort de ce constat, le Réseau génie civil et urbain (RGCU) a lancé en 2003 un appel à proposition de recherche sur le thème : « Changement climatique et vulnérabilité des infrastructures ».

Le Groupe Egis (Scetauroute) a constitué un consortium avec l'appui de la Sanef et a présenté le projet Gerici qui a été labellisé par le RGCU, avec cofinancement du ministère de l'Équipement.

Sur la base d'une analyse de risques, Gerici a développé un modèle sous système d'information géographique (SIG) évaluant la vulnérabilité de tous les composants sensibles d'une infrastructure (autoroutière, dans un premier temps de l'étude). En s'appuyant sur une analyse socio-économique, Gerici apporte une aide aux responsables pour hiérarchiser et prioriser les investissements à opérer puis, en cas de prévision ou d'événement exceptionnel, pour définir le scénario à enclencher en vue

L'ouragan Katrina

Août 2005 en Louisiane

Une ville ravagée – un désastre humain et économique :

- 1 836 victimes ;
- 273 000 maisons détruites ;
- 80 % de la population évacuée mais 100 000 personnes sont restées (les plus pauvres et les plus dépendantes) ;
- 100 à 150 milliards de dollars US de dégâts ;
- l'onde de tempête a pénétré jusqu'à 10 km dans les terres ;
- 1/3 de la capacité de raffinage des USA immobilisé, 1/3 de la production annuelle du golfe du Mexique arrêté, plusieurs pipe-lines touchés ;
- 70 % des bouées de navigation détruites (delta et Mississipi : l'une des plus grandes voies d'exportation des USA) ;
- des routes et ouvrages détruits (photo 3).

Deux ans avant Katrina, une étude avait prévu avec une grande pertinence les phénomènes, l'enchaînement de leurs conséquences et certaines mesures préventives, ...



Photo 3
Ouragan Katrina : pont de l'US90 détruit par l'onde de tempête (USA-08/2005)
Hurricane Katrina: a US90's bridge destroyed by storm surge

L'intolérance sociale aux risques augmente

Les exploitants d'infrastructures observent, au fil des années, une augmentation de l'intolérance sociale vis-à-vis des aléas (climatiques ou autres).

Le degré d'exigence croissant des usagers-citoyens-consommateurs et le développement de la judiciarisation de la société apparaissent comme deux facteurs qui rendent nécessaire une nouvelle réflexion

de la part des responsables sur la vulnérabilité des réseaux dont ils ont la charge.

Il est désormais de notoriété publique qu'un inéluctable changement climatique est en cours. Ce fait fragilisera la position, en cas de litige futur, de tout acteur responsable qui agirait (ou surtout qui n'agirait pas) comme s'il l'ignorait complètement. De plus, la notion d'événement de référence ou dimensionnant ne doit pas conduire à ce que la situation ne soit plus sous contrôle lorsqu'il

de prendre les mesures d'urgence les plus pertinentes, en coordination avec les autres partenaires, dont les services de secours. De ces études, une expertise est progressivement constituée pour analyser la vulnérabilité d'un itinéraire puis d'un réseau entier.

Les étapes de la démarche

Avant de concevoir un outil SIG, il était nécessaire de poser les bases du travail de recherche. Il a donc fallu évaluer et définir les besoins, mettre en place un vocabulaire commun et compréhensible par tous, et déterminer les éléments à intégrer dans l'outil. La synthèse qui suit décrit les étapes de la démarche ; les enseignements généraux et particuliers, tant méthodologiques que « métiers » ont été capitalisés avec soin.

Une méthode robuste d'analyse de risques

La méthode d'analyse des risques météorologiques pour les infrastructures a utilisé les enseignements du management des risques dans les industries très sensibles comme le nucléaire. Cette analyse a permis de modéliser plus généralement le danger comme un enchaînement de processus conduisant une source de danger à avoir des effets néfastes sur l'infrastructure, les usagers, les riverains, l'environnement, etc.

Les principales sources de danger identifiées

Les sources de danger, ou événements non souhaités (ENS), pris en compte dans Gerici sont :

- la pluie (photo 4),
- les crues (photo 5),
- le vent (photo 6),
- la neige (photo 7),
- le froid,
- la chaleur élevée.

Chaque ENS est considéré comme source de danger pour la pérennité de l'infrastructure ou de ses composants, pour la continuité du service (circulation) et pour les riverains.

Lorsque des cartes de zonage existent (exemple : neige et vent dans les règles NV65¹), elles sont inscrites dans le SIG, de manière à automatiser la recherche des valeurs réglementaires.

Les vulnérabilités des infrastructures caractérisées

Chaque domaine d'une autoroute a fait l'objet d'une analyse fine par un expert senior, pour en faire ressortir sa possible vulnérabilité à des ENS. De fait, sept domaines principaux ont été expertisés :

- la grande hydraulique,
- la petite hydraulique (bassin versant < 2 km²) et l'assainissement,
- les ouvrages d'art,
- les équipements,
- la géotechnique,
- l'environnement,
- les chaussées.

Dans chacun des domaines, les éléments constituant l'infrastructure ont été classés par famille en fonction de leur sensibilité à un même événement météorologique.

La variation d'intensité de l'événement amène à identifier trois seuils types pour chaque élément :

- un seuil dimensionnant,
- un seuil critique,
- un seuil de rupture.

Des coefficients pondérateurs peuvent être appliqués à ces seuils pour tenir compte de facteurs aggravants (comme une faiblesse structurelle, un encombrement de lit de cours d'eau, la vétusté, ...), ou plus favorables. Ces analyses ont fait l'objet d'études avec des exploitants et de rapports détaillés par des experts spécialisés.

Une visualisation pratique pour l'exploitant grâce à une carte des risques

Les notions précédemment définies ont été structurées sous la forme d'un modèle conceptuel de données afin d'implémenter l'outil SIG.

¹NV65 : Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions



Photo 4
Bretelle d'accès d'autoroute inondée
Slip road flooded with surface water



Photo 5
Orages exceptionnels : coupure de A1 (Somme-07/2001)
A1 motorway flooded, following strong storms



Photo 6
Tempêtes de décembre 1999 : des rafales à 200 km/h
December 1999 storm in France: gusts of 200 km/h



Photo 7
Neige sur A40
Snowbound traffic on A40 motorway

Système Gestion des risques

Ainsi, l'infrastructure est discrétisée en objets géoréférencés, sous la forme de table. Chaque objet est unique et défini selon des caractéristiques techniques et de vulnérabilité (figure 1).

En appliquant un événement météo (de type et d'intensité

définis) à un tronçon d'infrastructure, chaque objet sensible à cet événement est visualisé graphiquement selon un code couleur correspondant à un symbole propre au seuil qu'il est susceptible d'atteindre lors de cet événement (figure 2).

Les simulations et l'alerte facilitées

L'outil élaboré pourra être utilisé aussi bien en mode de simulation que lors d'une alerte lancée par Météo France.

Simulation

La simulation permet de vérifier, « à froid », quels éléments de l'infrastructure risquent d'être les maillons faibles lors d'un événement dont on fixe *a priori* l'intensité. L'intérêt réside dans le nombre illimité de simulations que l'on peut faire, en augmentant par exemple graduellement l'intensité de l'événement de manière à appréhender la réponse des objets de l'infrastructure, jusqu'à aller à des valeurs *a priori* « irréalistes ».

Une fois repérés, les maillons faibles peuvent alors être soumis à traitement, en fonction des enjeux.

Les combinaisons d'événements météorologiques et/ou les conséquences pour l'exploitant de combinaisons de ruptures peuvent donc être simulées. Les résultats de chaque simulation ont la possibilité d'être conservés pour traitement ultérieur.

Alerte

Lors du lancement d'une alerte par Météo-France ou d'une alerte crue lancée par un service de prévision des crues (SPC), l'intensité de l'événement prévu est entrée dans le modèle afin d'évaluer les conséquences probables pour l'infrastructure. Les responsables disposent alors d'un laps de temps pour agir, en fonction des désordres prévus. A court terme, l'alerte devrait pouvoir être couplée informatiquement avec le SIG pour une plus grande réactivité, et l'exploitant aura à sa disposition une panoplie d'outils pour anticiper et proportionner sa réaction.

Un SIG convivial testé sur des sections réelles

L'élaboration de l'outil SIG s'est déroulée en plusieurs phases. Dans un premier temps, il s'agissait de définir les fonctionnalités de l'outil, de concevoir un modèle conceptuel de données à partir des éléments définis lors de la détermination des besoins et surtout de concevoir un outil convivial et transposable quel que soit le responsable de l'infrastructure. L'outil SIG ainsi conçu est basé sur un système de gestion de base de données relationnel (SGBDR)

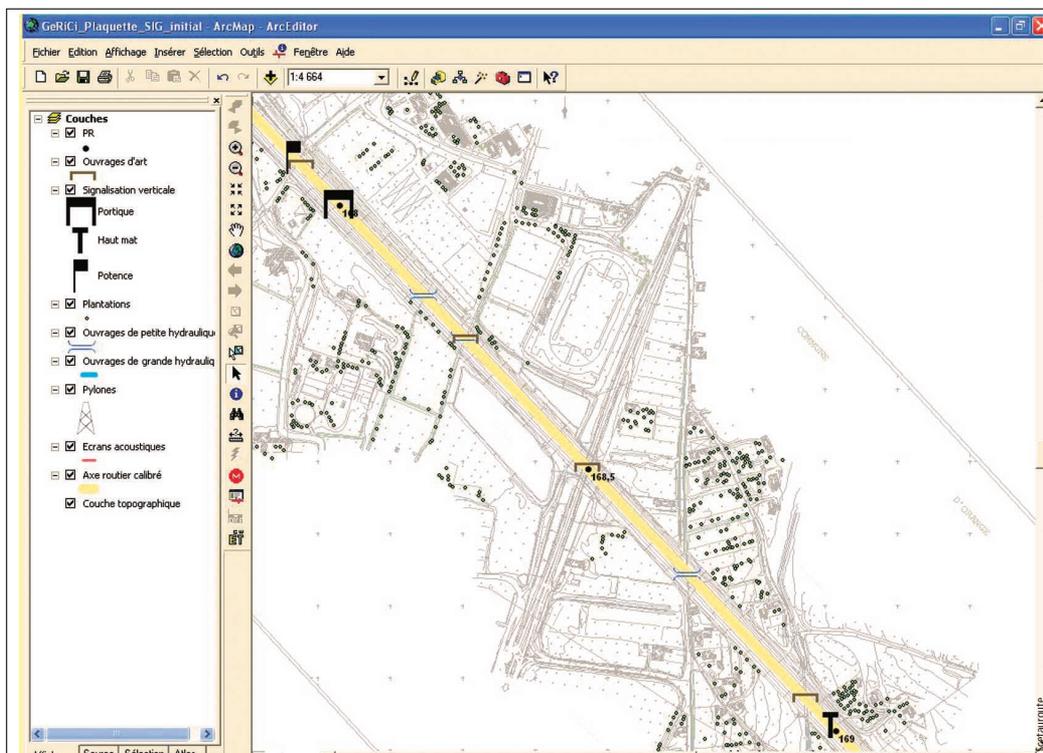


Figure 1
Cartographie des objets routiers
Road elements cartography

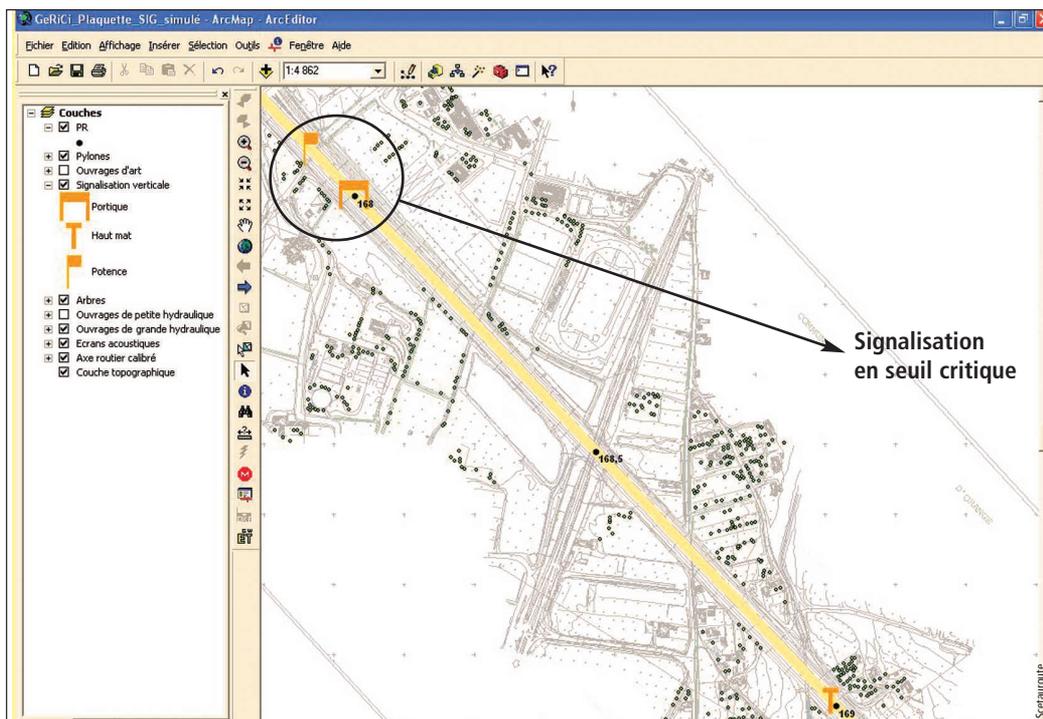


Figure 2
Résultats d'une simulation d'un vent de 170 km/h, vulnérabilité des éléments de signalisation verticale
Results of a mind simulation of 170 km/h: vulnerability of vertical road signs

associé à une interface graphique pour localiser, visualiser, renseigner, traiter et interroger les objets contenus dans le SGBDR. Une interface, sous la forme de boîtes de dialogues, guide l'opérateur dans l'utilisation de l'outil.

Afin de valider et tester le système, les concessionnaires partenaires du consortium ont proposé deux sections d'autoroutes comme sites tests :

- l'autoroute A1 entre les PK 90 et 120, au niveau de Roye (Somme), pour Sanef,
- le triangle A7-A9, près d'Orange (Gard et Vaucluse) pour ASF.

Des événements météorologiques passés sont simulés pour ajuster le calibrage des objets de manière à ce que les réactions du modèle soient au plus près de la réalité observée.

L'outil Gerici

L'outil Gerici est conçu sur la base du couplage d'un SGBDR (Access® de Microsoft®) et d'un SIG (ArcGIS® d'ESRI®).

A partir des données du tracé (axes, profils en long, ...), l'axe de la route est créé. Puis, en utilisant le principe de segmentation dynamique, les coordonnées en X et Y sont transformées en abscisse curviligne.

Chaque objet décrit sous forme de table est alors positionné automatiquement sur l'axe à partir de ses données d'implantation.

Des boîtes de dialogues garantissent à l'opérateur, d'une part de visualiser et d'interroger les objets, et d'autre part de simuler et de capitaliser un événement climatique.

Les boîtes de dialogues proposent des choix à valider avant l'exécution de requêtes pour, au final, visualiser chaque objet vulnérable à l'événement non souhaité (ENS) envisagé selon une symbolique chromatique appropriée au seuil défini. A ce stade, il est possible de capitaliser les résultats obtenus et de renseigner la base sur les mesures à mettre en œuvre.

Un outil d'aide à la réflexion technique et stratégique multiacteur

A l'aide de ce type d'outil, un dialogue multiacteur peut être facilité à différentes échelles : section critique, corridor ou réseau

avec les enjeux « entreprise », enjeux multimodaux (infrastructures juxtaposées), enjeux régionaux, enjeux nationaux ou encore internationaux. Les enjeux s'analysent également suivant un axe thématique : enjeux socio-économiques, environnementaux, sociétaux, etc. Cette approche associe à un type d'événement, un coût global pour la société, construit à la fois sur les pertes de recettes (pour l'entreprise), mais également sur l'impact socio-économique collectif, ce qui facilite aussi une analyse des motivations spontanées des différents acteurs à décider et/ou financer les actions de diminution de la vulnérabilité des infrastructures critiques.

Quelques exemples :

- Si une autoroute est la colonne vertébrale du dispositif de secours pour porter assistance aux victimes causées par un événement météo, il peut être décidé (par les pouvoirs publics) de renforcer sa résistance à cet événement.

- A contrario, un tronçon non stratégique d'une infrastructure peut être aménagé pour fonctionner en service dégradé temporaire (pour un événement d'intensité supérieure à la valeur réglementaire).
- Un remblai peut être fusible en cas de crue très exceptionnelle pour éviter l'inondation d'une zone très vulnérable située en amont (usine SEVESO, hôpital, etc.).

Les enjeux peuvent alors être hiérarchisés afin de concentrer prioritairement les actions préventives sur les sections du réseau les plus critiques, ou celles ne disposant pas d'itinéraire alternatif, ou celles stratégiques d'un point de vue accès des secours, etc.

Base de connaissance – REX

L'outil Gerici capitalisera et conservera la mémoire des événements passés, avec les données afférentes, les conséquences observées, les interventions réalisées et leurs résultats, leurs coûts, etc. Chaque acteur renseigne une fiche, dont la typification des champs permet d'effectuer toute recherche ou tri utile. Y sont annexés tous les documents, rapports, bulletins météo, etc., nécessaires à la compréhension et à l'analyse a posteriori de l'épisode événementiel. Les zones de l'infrastructure touchées sont repérées sur la cartographie SIG. Cela fait de Gerici un véritable outil de retour d'expérience pour tous les responsables, aussi bien au niveau de l'exploitation que de la direction d'une société gestionnaire, que, si nécessaire, au niveau scientifique pour des exploitations statistiques.

La richesse des fonctionnalités de l'outil Gerici

L'outil Gerici regroupera, à terme, un ensemble de fonctionnalités :

- une fonctionnalité de simulation, avec un catalogue de dispositions palliatives ;
- une fonctionnalité d'alerte, avec instructions et scénarios de décision pour les exploitants ;
- une fonctionnalité de capitalisation et de retour d'expérience sur le principe que l'on n'a pas le droit de faire deux fois les mêmes erreurs.

Aujourd'hui... et demain ?

Aujourd'hui, grâce à trois ans de travail :

- Les maîtres d'ouvrage peuvent demander une analyse des vulnérabilités de leur réseau et l'identification des sections les plus critiques.
- Les exploitants peuvent demander l'implantation durable de l'outil SIG Gerici sur des sections ou des itinéraires pour simuler les risques et développer les réactivités les plus pertinentes. Pour répondre à la demande, Egis propose des prestations de diagnostics globaux ou locaux, l'implantation de l'outil chez le client et des études particulières d'optimisation pour diminuer les vulnérabilités.

Devant la taille des enjeux émergents et la complexité des problèmes, Gerici mérite d'être utilisé, prolongé et complété par :

- L'application opérationnelle sur de nombreuses sections dans des environnements variés pour aboutir à des outils d'aide à la décision encore plus efficaces, tant pour l'exploitant



The Gerici project: management of risks related to climate change for infrastructures. First lessons of three years of vulnerability study experience

Climate change considerably modifies the vulnerability of infrastructures, and such concepts as the "hundred-year flood" can even become dangerous in this new context. Interesting conclusions were reached for contracting authorities and a specific tool developed for infrastructure operators resulting from three years of research carried out after labelling by the RGCU (civil engineering and urban network) and with co-financing by the public works ministry. This project, managed by Egis (Scetauroute and Bceom) groups Sanef, ASF, Méteo-France, LCPC and Esri France. The article describes the stages in the procedure and the geographical information system (SIG), a user-friendly and transposable support tool for technical and strategic investigations.

(niveau alerte) que pour le maître d'ouvrage (diagnostic et adaptation du réseau).

- Une extension vers un outil d'aide à la gestion des conditions de viabilité à la demande des exploitants.
- Une analyse plus poussée des complémentarités optimales respectives du régulateur, du maître d'ouvrage et de l'exploitant et surtout la nécessité de faciliter un travail en commun pertinent par rapport aux enjeux.
- L'importance d'un travail national et international dynamique et solidaire : les échanges réalisés en avril 2006 au séminaire de l'AIPCR (Association mondiale de la route) à Hanoï et au Transport Research Arena (TRA) européen de Göteborg en juin 2006 ont montré que sécuriser les infrastructures de transport vis-à-vis des changements climatiques est devenu une préoccupation mondiale. ■