



MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT

Direction de la recherche et des
Affaires Economiques et Internationales

perfectionnement de la méthodologie
d'évaluation de la vulnérabilité et du
risque sur
les P.E.R. mouvements de terrain

J.P.Asté, F.Léone, H.Kruse et M.Terrier

mars 1993
R 36866

RESUME

Cette étude est subventionnée par la Direction de la Recherche et des Affaires Economiques et Internationales (DRAEI) et fait suite à la notification n° 91146 imputée au chapitre 67-20 Article 80 paragraphe 70.

L'évaluation objective et explicite des risques générés par les mouvements de terrain est, en l'état actuel des méthodologies, une tâche extrêmement difficile. La présente étude s'appuie sur une analyse en retour de trois cas pour lesquels une approche de type PER a été réalisée.

Dans chacun des cas on propose une analyse un peu plus fine des phénomènes générateurs de dommages et on montre comment on peut améliorer, à des degrés divers, la présomption de localisation spatiale de ces phénomènes.

On propose aussi de nouvelles approches pour l'étude de vulnérabilité au sens strict des principales catégories d'éléments exposés : les biens, les activités et les fonctions sociales, les personnes.

A partir des réflexions ainsi menées sur trois cas concrets, il semble possible d'engager un programme de recherche portant en particulier sur la collecte et la structuration d'un certain nombre de connaissances acquises sur des cas vécus, et sur l'adoption d'une sémantique très rigoureuse commune à tous les acteurs de l'évaluation des risques.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
2. PRESENTATION RESUMEE DES METHODOLOGIES UTILISEES DANS LES TROIS CAS ET DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS	3
2.1. Les limites d'une présentation résumée.....	3
2.2. Le cas d'Aigueblanche	4
2.2.1. Présentation.....	4
2.2.2. Inventaire des principaux phénomènes d'instabilité	4
2.2.3. Les documents cartographiques produits dans le document P.E.R	4
2.2.4. Critiques de la méthode, remarques, propositions.	6
2.3. Le cas de Saint-Julien les Metz	8
2.3.1. Présentation.....	8
2.3.2. Inventaire des principaux phénomènes d'instabilité	8
2.3.3. Les documents cartographiques produits dans le cadre du P.E.R.....	8
2.3.4. Critiques de la méthode, remarques, propositions.	10
2.4. Le cas de Laon.....	11
2.4.1. Présentation.....	11
2.4.2. Inventaire des principaux phénomènes d'instabilité	11
2.4.3. Les documents cartographiques produits dans le cadre de l'étude d'aléa.....	12
2.4.4. Critiques de la méthode, remarques, propositions.	15
3. ESSAI DE TRAITEMENT DU PROBLEME DE CHUTES DE BLOCS ET D'ECROULEMENT A AIGUEBLANCHE.....	17
3.1. Essai d'application d'un SIG à la méthodologie préexistante.	17
3.2. Essai de caractérisation de l'aléa chute de bloc.....	17
3.3. Essai d'évaluation de la vulnérabilité aux chutes de blocs.	20
3.3.1. Evaluation des potentialités d'endommagement des chutes de blocs	20
3.3.2. Classification des biens exposés aux chutes de blocs.....	21
3.3.3. Essai de caractérisation de la vulnérabilité "matérielle" aux chutes de blocs.....	22
3.3.4. vulnérabilité, préjudices humains	23
3.3.5. Evaluation de la vulnérabilité globale (humaine et matérielle)	26
3.3.6. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la fonction communication (routes, voies ferrées, ouvrages d'art)	26
3.4. Bilan et conclusions relatifs à Aigueblanche	27

4. LE CAS DE SAINT JULIEN LES METZ : LES DOMMAGES POTENTIELS LIES A CERTAINS MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	28
4.1. Les glissements régressifs profonds qui affectent le coteau le long de la RD 1	28
4.2. Les modes d'endommagement liés à deux glissements particuliers.....	29
4.2.1. Les processus générateurs de dommages	29
4.2.2. Essai de classification des éléments exposés et évaluation de la vulnérabilité matérielle.....	30
4.3. Bilan et perspectives relatifs au cas de Saint-Julien	31
5. LE CAS DE LAON.: ETUDE EN RETOUR DE DEUX TYPES D'ALEA ET REFLEXIONS PREALABLES SUR LA VULNERABILITE.....	32
5.1. L'aléa glissement de terrain.	32
5.1.1. Une nouvelle exploitation des données saisies sur le SIG	32
5.1.2. Une meilleure appréciation du rôle de l'eau dans la prédisposition aux glissements..	34
5.2. L'aléa affaissement, effondrement.....	36
5.3. Localisation et nature des biens exposés.....	37
5.4. Potentialités et modes d'endommagement des éléments exposés.	38
5.5. Bilan et conclusions relatifs à Laon	40
6. BILAN ET PERSPECTIVES	41
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45
ANNEXES	46

ANNEXES

ANNEXE 1 : AIGUEBLANCHE

- Figure n°1bis** : Localisation de la zone d'étude d'Aigueblanche
- Figure n°1** : Carte fictive d'aléa chutes de blocs
- Figure n°2** : Carte fictive des niveaux de protection aux chutes de blocs
- Figure n°3** : Carte fictive des potentialités d'endommagement absolues liées aux chutes de blocs
- Figure n°4** : Carte de classification des éléments exposés aux chutes de blocs
- Figure n°5** : Carte fictive de résistance des biens aux impacts des blocs
- Figure n°6** : Carte fictive de la vulnérabilité matérielle des biens existants
- Figure n°7** : Carte fictive du niveau de protection aux personnes apporté par les structures
- Figure n°8** : Carte fictive des taux de fréquentation humaine par jour
- Figure n°9** : Carte fictive de la vulnérabilité humaine
- Figure n°10** : Carte fictive de la densité de population
- Figure n°11** : Carte fictive des préjudices humains en nombre de victimes potentielles (enjeux humains)
- Figure n°12** : Carte fictive de la vulnérabilité globale
- Figure n°13** : Carte fictive de la vulnérabilité de l'activité transport- communication

ANNEXE 2 : SAINT JULIEN LES METZ

- Figure n°1bis** : localisation de la zone d'étude de Saint Julien les Metz
- Figure n°1** : Classification des éléments exposés
- Figure n°2** : Carte des différents modes et intensités d'endommagement associés à deux glissements
- Figure n°3** : Carte des niveaux de vulnérabilité matérielle des différents éléments exposés

ANNEXE 3 : LAON

- Figure n°1bis** : Localisation de la zone d'étude de Laon
- Figure n°1** : Représentation 3D de la morphologie
- Figure n°2** : Représentation 3D de la morphologie après ablation de la couche calcaire.
- Figure n°3** : Représentation 3D de l'épaisseur de la couche calcaire
- Figure n°4** : Topographie du mur des formations calcaires, tubes de ruissellement souterrains.
- Figure n°5** : Concentration des eaux souterraines à la base des calcaires
- Figure n°6** : Principales classes de pentes
- Figure n°7** : Analyse de la distribution des pentes dans les argiles et dans les sables
- Figure n°8** : Facteur de sécurité au glissement sans tenir compte de la concentration en eaux souterraines
- Figure n°9** : Facteur de sécurité au glissement en tenant compte de la concentration en eaux souterraines
- Figure n°10** : Situation des zones de cavités connues ou probables par rapport aux courbes d'iso-épaisseur de la barre calcaire
- Figure n°11** : Situation de deux coupes transversales à travers la barre calcaire
- Figure n°12** : Laon - coupe 0-2000
- Figure n°13** : Laon - coupe 0-1400

1. INTRODUCTION

Plusieurs actions ont déjà été menées pour essayer de dégager une méthodologie objective d'évaluation et de hiérarchisation des risques générés par les mouvements de terrain :

- la Délégation aux Risques Majeurs (DRM) a publié "Les études préliminaires à la cartographie règlementaire des risques naturels majeurs" en proposant une méthode simplifiée de détermination de l'aléa et du risque. (réf n°1)
- le BRGM a réalisé pour le compte de la DRM une étude de faisabilité d'un système d'aide à l'élaboration d'un diagnostic relatif aux risques générés par des mouvements de terrain (rapport BRGM R30703 ENV 4S 91). (réf n°2)

Mais il y a encore beaucoup à faire pour harmoniser et consolider ces approches.

La DRAEI a accordé au BRGM une subvention n° 91146, imputée au chapitre 67.20 Article 80 paragraphe 70, pour à partir de trois sites où une approche de type Plan d'Exposition aux Risques (PER) a déjà été réalisée par des voies classiques, essayer de développer des traitements utilisant en particulier les ressources des systèmes de gestion de bases de données géo-référencées (Systèmes d'Information Géographique ou SIG).

Les trois sites choisis ont été ceux de :

- Aigueblanche, en Savoie,
- Saint Julien les Metz, en Moselle,
- Laon, dans l'Aisne.

Ces sites ont été sélectionnés parce qu'ils correspondent à des phénomènes assez différents les uns des autres, représentatifs du large éventail de ce qu'il est convenu de réunir sous le vocable de "Mouvements de terrain". L'intensité, la gravité de ces phénomènes est très variable et la notion de risque est elle même bien différente dans les trois zones concernées. De plus les démarches techniques de qualification de l'aléa et de la vulnérabilité avaient été entreprises par des organismes ou services différents : CETE de Lyon pour Aigueblanche, BRGM, Agence Lorraine, pour Saint Julien, Agence Nord Pas de Calais pour Laon.

On a choisi d'abord de présenter rapidement chaque site et de faire une analyse critique des méthodes utilisées dans chaque phase de l'approche P.E.R. Dans un deuxième temps et de façon sélective, on a essayé de montrer comment on pouvait imaginer certains traitements plus performants des informations disponibles :

Analyse en retour vulnérabilité

- à Aigueblanche, l'essai porte sur la notion de vulnérabilité des éléments exposés à des chutes de blocs.
- à Saint Julien les Metz, l'essai concerne la vulnérabilité des éléments exposés à des mouvements de terrain d'un certain type.
- à Laon, la phase de vulnérabilité ne devait pas être abordée dans le rapport analysé. on a donc choisi d'illustrer comment on pouvait arriver à une approche plus satisfaisante de l'aléa. mais cela permet d'évoquer la vulnérabilité des éléments présents sur les zones concernées.

2. PRESENTATION RESUMEE DES METHODOLOGIES UTILISEES DANS LES TROIS CAS ET DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

2.1. LES LIMITES D'UNE PRESENTATION RESUMEE

L'élaboration d'un P.E.R est une tâche assez complexe et il peut paraître hasardeux et dangereux de vouloir la résumer. Cela n'est fait, ici, que pour faciliter la lecture des chapitres suivants : le lecteur se référera aux documents originaux dont les références bibliographiques sont rappelées à la fin du présent rapport. (réf n° 3, 4 ,5)

Par ailleurs le travail présenté ici n'est en aucun cas une analyse critique des documents originaux : c'est un travail complémentaire, rendu possible grâce à l'existence des trois P.E.R et au bénéfice d'un recul et de moyens qui n'étaient malheureusement pas disponibles au moment des études opérationnelles.

Enfin, les quelques réflexions qui vont suivre ne traitent pas exhaustivement des risques mis en évidence dans chacune des trois études de base. Au contraire, pour chacune, on a sélectionné un aspect particulier des phénomènes pressentis, en essayant d'aller aussi loin que possible dans l'instruction de la connaissance du phénomène, dans l'identification des éléments exposés, dans l'évaluation du niveau d'endommagement prévisible.

C'est ainsi que l'on traitera spécifiquement :

- du risque lié aux chutes de blocs et écroulements rocheux à Aigueblanche,
- du risque lié à des glissements de terrain localisés et plus ou moins circulaires à Saint Julien les Metz,
- du risque lié aux glissements dans les argiles du Cuisien à Laon.

Les éléments exposés ont été dans les trois cas assez clairement identifiés grâce aux ressources des systèmes d'information géographiques. On verra que cela ne suffit pas pour intégrer certaines composantes socio-économiques nécessaires pour l'analyse de risque. Ces ressources eussent été trop difficiles à réunir sans une nouvelle enquête soignée sur place. On a donc choisi de créer des jeux de données fictives. Cela ne devrait pas affecter les premières tendances tirées de l'essai et qui seront présentées en conclusion.

2.2. LE CAS D'AIGUEBLANCHE

2.2.1. Présentation

L'étude conduisant à l'élaboration d'un Plan d'Exposition aux Risques sur la commune d'Aigueblanche, a été menée en 1988 par le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE) de Lyon. Elle repose sur des observations de terrain, l'analyse de dossiers antérieurs réalisés par le CETE, le BRGM, le service RTM, et des enquêtes auprès des autorités communales.

La collecte et la synthèse de ces informations a permis de caractériser les divers phénomènes d'instabilité menaçant la commune.

2.2.2. Inventaire des principaux phénomènes d'instabilité

Les glissements.

Ils sont liés essentiellement aux formations géologiques, représentées par des schistes liasiques recouverts de colluvions (schistes altérés et mêlés à des matériaux glaciaires hétérogènes).

Ils ne présentent pas de caractère réellement dangereux pour la commune compte tenu de leur faible activité.

Les éboulements.

Les éboulements se localisent dans le secteur d'Aigueblanche essentiellement en rive droite de l'Isère. Leurs effets sur les habitations, les aménagements et la population peuvent prendre des dimensions catastrophiques comme ce fut le cas avec, en 1977, l'éboulement d'environ 10.000 m³ de rocher.

2.2.3. Les documents cartographiques produits dans le document P.E.R.

La carte des aléas

La première étape a consisté en l'élaboration, pour l'ensemble des phénomènes d'instabilité recensés, d'une carte du "*zonage des niveaux de risque*". Cette carte repose sur la combinaison de facteurs lithologiques, volumétriques, morphologiques et topographiques.

La combinaison de ces facteurs s'est effectuée, sans recours aux moyens informatisés, par le biais d'un tableau, après pondération de chacun d'eux en fonction de leur pertinence pour la caractérisation du "*niveau de risque que laissent encourir les aléas retenus*".

Il en ressort quatre niveaux de *"risque"* (fort à faible), représentés cartographiquement par des couleurs différentes dans un document intitulé *"carte des aléas"* (carte synthétique des niveaux de risque).

Une étude complémentaire relative à l'aléa sismique a également été menée, mais n'a pas été intégrée dans ce document compte tenu des faibles intensités des séismes anciens rencontrés dans cette région.

Le plan de vulnérabilité.

Ce plan *"permet d'apprécier les valeurs économiques de l'ensemble de la commune. Pour les occupations et les utilisations du sol, il hiérarchise les dommages prévisibles tant corporels que matériels, compte tenu de leur nature, structure et leur implantation."* Il intéresse de préférence les zones urbanisées et les zones futures à construire, afin de leur assurer la meilleure protection possible.

On y distingue *quatre degrés de vulnérabilité*, de très fort à nul, correspondant à *quatre classes de mise en jeu économique*, différentes selon le type de bâtiment, la concentration de la population".

En fait, l'évaluation de la vulnérabilité des zones urbanisées est réalisée :

- pour les secteurs déjà existants, sur la base du Plan d'Occupation des Sols, en *"affectant à chaque type ou zone du POS un degré de vulnérabilité"*;
- pour les zones futures à aménager, sur la base d'un découpage un peu plus *"discriminant"* qui permet une analyse plus fine prenant réellement en compte les spécificités matérielles, économiques ou humaines de chaque élément exposé.

Le plan de zonage P.E.R.

Ce zonage, but de l'étude, se détermine essentiellement à partir de la synthèse des cartes précédentes de "vulnérabilité" et des "niveaux de risques"

Ce plan distingue trois zones, prévues en application du décret n°84-328 du 3 Mai 1984.

Les règles de combinaison des cartes d'aléa et de vulnérabilité sont exprimées dans un tableau de croisement qui intègre, sous forme d'un critère supplémentaire, la possibilité, pour chaque combinaison aléa/vulnérabilité d'introduire une mesure de protection "en prenant en compte la limite de 10% de la valeur vénale du bien".

2.2.4. Critiques de la méthode, remarques, propositions.

Concernant l'aléa.

Le niveau de connaissance sur les différents phénomènes d'instabilité susceptibles d'affecter la commune d'Aigueblanche est relativement élevé. On appréciera en particulier, le travail fondamental de recherche sur les événements historiques qui est reproduit dans des fiches de renseignement annexées au rapport final.

Il serait judicieux d'étendre à toutes les études de PER, et ce n'est pas toujours réalisé, une liste complète de toutes les sources de référence en vue d'un réexamen éventuel. Cette liste est bien détaillée dans ce rapport du CETE.

Si les données relatives à la pente et à la géologie sont disponibles sous forme de carte, on regrettera au contraire de ne pouvoir disposer de représentation ou de localisation géographique de certaines des données retenues par les auteurs. C'est le cas, par exemple, pour les chutes de blocs, les volumes mis en jeu, leur forme, les écrans artificiels ou naturels.

Or ces facteurs semblent déterminants pour affiner ultérieurement la localisation des différents niveaux de risque tels qu'ils ont été définis dans les tableaux de croisement. Cette remarque concerne surtout l'examen de la représentation spatiale du risque associé à l'aléa chutes de blocs qui apparaît très homogène alors que, manifestement, on pourrait davantage hiérarchiser le risque en réutilisant les critères préconisés par les auteurs.

La cartographie de tels facteurs, sous forme de cartes de données primaires telles que la géologie ou le couvert végétal, permettrait d'envisager un recours à des traitements géographiques informatisés. Ici, on ne peut pas reproduire automatiquement, à l'aide d'un SIG, les croisements effectués manuellement et qualitativement par les auteurs. La base de données "volumes mis en jeu", par exemple, est inexistante.

Comme ces remarques le suggèrent, l'utilisation éventuelle d'un SIG pour la réalisation d'un PER par croisements de données de base géo-référencées, nécessite de disposer de bases de données cohérentes.

De plus, pour revenir sur certains critères sélectionnés dans cette étude, il serait intéressant de connaître les limites non pas qualitatives, mais quantitatives des classes définies. Par exemple, pour les données sur les volumes mis en jeu, savoir à quoi correspondent les limites "faible" et "important".

Une telle démarche permettrait alors d'apprécier davantage la pertinence ou non du critère "présence ou non d'un écran naturel ou artificiel" en pouvant juger de l'efficacité réelle d'un tel écran, s'il existe, vis à vis d'un phénomène (aléa) plus finement quantifié. Il serait en effet possible de savoir si un tel écran est réellement efficace pour limiter les effets (ici, propagation) du phénomène pressenti après avoir bien défini les possibilités d'extension et de propagation du phénomène, qui vont dépendre de sa nature propre et de son environnement.

Concernant la vulnérabilité.

Cette étude ne considère en aucun moment, du moins explicitement, la nature des différents types de phénomènes impliqués. On pourrait en conclure qu'elle suppose que les chutes de blocs ou les glissements entraîneront sur les éléments de la commune exposés les mêmes modes d'endommagement, ce qui est évidemment peu réaliste. En effet, à chaque type de phénomène correspond un mode d'endommagement particulier (impacts pour les chutes de blocs, déformations, recouvrements, ensevelissements pour les glissements).

Il convient de souligner combien il est important de bien caractériser le phénomène, et notamment son extension spatiale et le ou les modes d'endommagement qu'il est susceptible de produire.

De la même façon, pour chaque mode d'endommagement ainsi défini, il est souhaitable de procéder à une classification des éléments exposés en fonction de leur capacité à subir ou à résister. Les dommages ou préjudices potentiels sur ces éléments sont donc fonction du phénomène, de l'élément, et des interactions existant entre les deux. Ce n'est qu'au prix d'une telle structuration des données que l'on pourra prétendre mener à bien une étude de vulnérabilité, puis éventuellement une quantification des dommages prévisibles et enfin une évaluation des enjeux, élément essentiel pour la prise de décision. Le premier découpage des biens et activités fourni par le Plan d'occupation du Sol, s'il est nécessaire, est loin d'être suffisant pour cette structuration.

Le recueil et la structuration des données pourront prendre un caractère très fastidieux. On appréciera donc d'autant plus de pouvoir les traiter sous un SIG. Mieux le phénomène sera localisé et caractérisé (notamment en terme de mode et de capacité d'endommagement) et plus le niveau de connaissances sur les éléments exposés devra être élevé et quantifié pour appréhender au mieux les interactions susceptibles de se manifester entre la structure de l'élément et le phénomène dommageable.

Concernant la détermination du PER proprement dit.

La synthèse conduisant au PER dépend de la pertinence des classes retenues pour l'aléa et la vulnérabilité. Elle dépend aussi de la notion de "protection possible", qui exige de bien expliciter les conditions nécessaires pour qu'une mesure de protection devienne envisageable.

C'est à ce niveau de l'étude que l'on comprend la nécessité de bien définir les relations d'endommagement pouvant exister entre les différents types de biens et les différents phénomènes.

2.3. LE CAS DE SAINT JULIEN LES METZ

2.3.1. Présentation

La commune de Saint Julien les Metz avait demandé l'établissement d'un P.E.R dès 1985. De nouveaux mouvements s'étant manifestés fin mars 1987, l'étude d'un P.E.R mouvements de terrain a été réalisée courant 1989 par l'Agence Lorraine du BRGM.

Les auteurs se sont basés sur une solide expérience des types de mouvements connus dans la région mosellane :

- glissements profonds régressifs , souvent anciens, quelquefois plans,
- glissements pelliculaires avec solifluxion.

Ils ont pu localiser trois secteurs où se sont déjà manifestés des mouvements et s'efforcent de reconnaître les formes ou indices susceptibles de renseigner sur la possible occurrence ou extension des mêmes types de phénomènes.

2.3.2. Inventaire des principaux phénomènes d'instabilité .

Il y en a trois types principaux, parfaitement identifiés :

- des glissements pelliculaires affectant les argiles de Levallois qui affleurent à mi-pente du thalweg du ruisseau de Vallières, au sud de la commune, dans une zone largement urbanisée. Ces glissements sont actifs et provoquent des désordres légers.
- un "glissement profond" régressif au pied du Fort Saint Julien et qui s'étend jusqu'à proximité des lotissements construits dans le thalweg au sud du Fort.
- une "série" de huit glissements profonds régressifs qui affectent la puissante série argileuse couvrant le coteau boisé longeant la RD1.

2.3.3. Les documents cartographiques produits dans le cadre du P.E.R

Il y a trois cartes annexées au rapport :

- une carte "factuelle" de localisation des mouvements connus,
- une carte dite des "risques de mouvements de terrain" dont la légende correspond, en fait, à ce qui dans le texte qualifie l'aléa. On reviendra ci-dessous sur cette notion,
- un plan d'exposition aux risques qui délimite les traditionnelles zones Rouge, Bleue et Blanche de la nomenclature P.E.R.

Carte d'aléa

Leur hiérarchisation s'est faite suivant deux critères : l'intensité du phénomène et sa probabilité d'apparition. Les qualificatifs retenus sont les suivants :

- concernant l'intensité du phénomène, on considère soit l'extension, (hectométrique à décamétrique), soit la profondeur (pelliculaire ou multimétrique, entre 5 et 10 mètres)
- concernant la probabilité d'apparition, on distingue les phénomènes actifs ou potentiels, et, dans ce cas, avec une probabilité forte, moyenne, faible ou nulle.

Cela conduit à une grille d'évaluation qualitative de l'aléa que l'on a tenté de reproduire, en l'éclairant, ci-dessous :

Intensité	Extension		Profondeur	
	hectométrique	décamétrique	moyenne	pelliculaire
Probabilité				
Actif	A		A	
Potentiel, fort	A	B	B	C
Potentiel, moyen		D	C	D
Potentiel, faible		D		
Potentiel, nul	E			

Mais, à cette grille, on a voulu rajouter l'influence de la pente en utilisant les critères suivants :

Nature des phénomènes inventoriés sur le site	Pente naturelle		
	10 à 15%	15 à 20%	> 20%
Glissements d'extension hectométrique et de profondeur supérieure à 5 mètres actifs		A	A
Glissements anciens en apparence stabilisés	C	B	A
Glissements pelliculaires	D	C	B
Pas de mouvement visible	E	D	B

Carte de vulnérabilité

Il n'y a pas de véritable carte de vulnérabilité. La définition de la vulnérabilité qui est donnée est la suivante : *"La vulnérabilité consiste à déterminer les zones exposées et à les hiérarchiser en fonction de la valeur des biens et activités existants ou futurs et du préjudice subi si le phénomène se produisait."*

On reviendra plus loin sur la validité de cette définition. Elle conduit naturellement à définir comme zones les plus vulnérables celles qui sont urbanisées et pour lesquelles la classification de l'aléa est A. Une carte sommaire basée sur cette définition est donnée page 28 du rapport de présentation du P.E.R.

Ainsi, la véritable signification de la vulnérabilité est occultée. On ne s'interroge nulle part, et en tous cas pas de façon explicite, sur le niveau d'endommagement potentiel des biens sous l'effet d'un phénomène dont la nature est pourtant assez bien connue.

Carte de Risque

Elle est effectivement fournie par combinaison simple de la carte d'aléa et de la pseudo-carte de vulnérabilité

2.3.4. Critiques de la méthode, remarques, propositions.

Carte d'aléa

Au niveau de l'aléa, compte tenu de la bonne identification des trois types de phénomènes susceptibles d'affecter le territoire de la commune, on aurait souhaité plus de détail sur les conditions d'occurrence de ces phénomènes. On ne fait pas ici référence au contenu habituel des études géotechniques, avec calculs de stabilité à l'appui : la mention de ces études est faite dans le rapport BRGM 30195 LOR 4S 89 qui sert de support technique au rapport de présentation.

On pense surtout à quelques explications possibles sur la genèse ou les conditions d'extension spatiale des phénomènes. Si on prend par exemple le secteur du Fort Saint Julien, la zone en glissement actif semble correspondre exactement à l'affleurement des argiles à Promicroceras du Lotharingien, à la faveur d'une faille qui coupe en deux la zone étudiée, sans que cela ne soit autrement souligné dans l'analyse, alors même que l'on peut s'attendre le long de cette faille à un mode particulier de circulation des eaux.

Si la présence de ces argiles, au voisinage de la faille est un élément déterminant de la manifestation de phénomènes d'instabilité, il n'y a pas lieu d'étendre ailleurs la connotation en terme d'aléa d'un phénomène parfaitement circonscrit.

On verra plus loin des commentaires de même type faits sur les glissements qui affectent le coteau le long de la RD1.

Pour revenir aux critères de détermination de l'aléa explicités par les tableaux, il est très intéressant d'avoir tenté de caractériser l'intensité et la probabilité (d'occurrence du phénomène), mais les descripteurs d'intensité et de probabilité restent trop subjectifs. On ne dit rien du mode d'estimation de la probabilité. Quant à l'intensité, elle se caractérise par deux critères qui demeurent assez flous et dont on a du mal à mesurer l'interaction : extension et profondeur.

La vulnérabilité

Comme on l'a déjà souligné, la définition proposée reste très douteuse.

La vulnérabilité est une mesure du degré d'endommagement subi par un bien, de dysfonctionnement ou de préjudice subi par une activité, une personne ou une fonction sociale. C'est donc bien cette estimation du dommage ou du préjudice qu'il faut s'efforcer d'analyser, en évitant toutes les troubles assimilations entre vulnérabilité et valeur des biens. On y reviendra plus loin.

2.4. LE CAS DE LAON

2.4.1. Présentation

La commune de Laon a connu au cours de sa longue histoire de nombreuses vicissitudes liées aux phénomènes de mouvements de terrain. Ils y revêtent plusieurs types. Les plus récents et les plus marquants ont été un certain nombre d'effondrements dans la ville ancienne et le glissement qui a affecté dans les années 80 le secteur de la Porte Vinox. (réf n° 6)

Un P.E.R a donc été prescrit fin 1990 et la réalisation de la carte d'aléa correspondante a été confiée à l'Agence Nord Pas de Calais du BRGM.

Il s'agit donc, dans ce troisième cas d'une analyse en retour, non pas sur un P.E.R dans sa globalité, mais seulement sur l'aléa. Le cas est cependant très intéressant puisqu'il se termine par un essai de carte interprétative essayant de prendre en compte l'intensité de l'aléa, E, et le niveau de " gravité ", H, selon les indications fournies dans une récente publication de la Délégation aux Risques Majeurs (réf n° 1).

2.4.2. Inventaire des principaux phénomènes d'instabilité

Les principaux phénomènes d'instabilité recensés sur le territoire de la commune se répartissent en deux types.

Les affaissements et les effondrements :

Ils correspondent à un mouvement vertical du sol. Ils apparaissent à l'aplomb des vides laissés par les nombreuses extractions souterraines de matériaux utiles. Ils se produisent essentiellement sur le plateau de Laon, là où la densité des constructions est la plus forte. Leur rythme d'occurrence est élevé, leur importance très variable.

Certains se développent sur quelques dizaines de mètres carrés. Ils sont situés sur les pentes sableuses à l'aplomb d'anciennes galeries n'ayant aucune stabilité à long terme. Les autres sont dus à des ruptures de voûte ou de piliers de soutènement qui se produisent dans les anciennes galeries présentes sous le plateau. Au total 18 accidents ont été répertoriés; ils nécessitent toujours des travaux, parfois des évacuations, voire des démolitions d'habitations.

Les dimensions de ces vides, ainsi que l'enchevêtrement des cavités et réseaux de galeries, parfois sur plusieurs niveaux, sont très mal connus.

Les zones d'affaissement potentiel retenues dans le cadre de cette étude correspondent aux secteurs d'excavation répertoriés, c'est à dire connus de façon sûre, à partir du traitement des archives.

Les glissements :

Les glissements de terrain recensés se produisent sur les pentes qui entourent la butte de Laon. Ils s'échelonnent depuis la base des calcaires jusqu'au tiers inférieur de la pente. Ils ont des caractéristiques et des dimensions extrêmement variables. Au total, 34 glissements ont été répertoriés.

Le plus récent et le plus spectaculaire d'entre eux est celui de la Porte Vinox, à l'Ouest de la ville, qui s'est développé au contact des calcaires et des formations argileuses sous-jacentes et qui a détruit ou fortement endommagé des habitations, mais aussi certains éléments du patrimoine historique, ainsi qu'une voie de communication importante.

A côté des deux principaux types évoqués ci-dessus, il faut aussi noter la manifestation de ravinements importants sur certains secteurs de la pente.

2.4.3. Les documents cartographiques produits dans le cadre de l'étude d'aléa.

On ne retrouvera pas ici le découpage mentionné dans les cas précédents : il ne s'agit en effet que de présenter ce qu'il est convenu d'appeler la carte d'aléa.

Plusieurs documents cartographiques intermédiaires ont été élaborés pour aboutir aux documents de synthèse que sont :

- la carte des mouvements de terrain,
- la carte d'aléa proprement dite,
- la carte "interprétative".

Ces documents intermédiaires sont des cartes de facteurs de prédisposition; il s'agit de :

- la carte géologique,
- le modèle numérique de terrain obtenu à partir de la digitalisation des courbes de niveau de la carte à 1/5000,
- la carte des pentes,
- la carte d'occupation du sol, à partir d'une définition assez sommaire du mode d'occupation du sol,
- les cartes de prédisposition aux effondrements, ravinements et effondrements.

La carte des mouvements de terrain

C'est une carte factuelle, comme celle établie à Saint Julien les Metz.

Elle permet de délimiter ou de situer l'ensemble des évènements repertoriés d'après les recherches d'archives. Il lui correspond une série de 73 fiches descriptives, ce qui constitue une excellente mémoire de ces évènements.

Malheureusement, il n'existe qu'une image en mode raster de cette carte : si les contours des zones affectées ont été saisis par digitalisation sur le fonds topographique à 1/5000, la transcription de ces contours est dégradée par la taille des pixels retenue pour l'expression finale, c'est à dire 30 mètres.

Les cartes de prédisposition aux principales catégories de phénomènes dommageables

Aléa affaissements et effondrements

La prédisposition "P" à la manifestation de ces phénomènes a été établie selon l'algorithme suivant :

$$P_{a,e} = N \cdot 3G$$

avec $N = 1$ pour les argiles, $N = 2$ pour les sables, $N = 3$ pour les calcaires et

$G = 1$ pour les zones où les galeries sont possibles, $G = 2$ pour celles où elles sont probables, $G = 3$ pour celles où elles ont été repérées.

Ainsi, $P_{a,e}$ vaudra 27 pour des zones de calcaires dans lesquelles des galeries ont été repérées.

Aléa ravinement

Les facteurs pris en compte ici sont la nature du terrain, la pente et le mode d'occupation du sol.

De la même façon que précédemment, on aura :

$$P_r = 2N \cdot I \cdot O$$

avec $N = 1$ pour les calcaires, $N = 2$ pour les argiles et $N = 3$ pour les sables, et

$I = 1$ pour les pentes inférieures à 20 degrés, $I = 2$ entre 20 et 30 degrés et $I = 3$ au dessus de 30 degrés.

$O = 1$ sur les secteurs urbanisés et anciennes terrasses, $O = 2$ sur les secteurs boisés et $O = 3$ sur les secteurs découverts tels prairies, champs et jardins.

Aléa glissements

Dans cette troisième partie, on a retenu encore une fois la pente, la nature du sol, le mode d'occupation du sol et la "présence d'eau".

$$Pg = 3N*2I*O$$

avec N = 1 pour les calcaires, N = 2 pour les argiles, N = 3 pour les sables,

I = 1 pour des pentes inférieures à 17 degrés, 2 pour des pentes comprises entre 17 et 36 degrés, 3 pour des pentes comprises entre 36 et 56 degrés et 4 au dessus,

O = 1 pour les terrasses, 2 pour les zones urbanisées et les remblais, 3 pour les prairies, champs et jardins et 4 pour les forêts et carrières.

La carte d'aléa dite " globale "

Le principe, mal explicité dans le texte, de cette carte, est de trouver une expression commune et cumulative (mais quelle signification cela a-t-il vraiment?) du "danger" créé par les divers types de phénomènes passés en revue précédemment. Cela revient à répartir en quatre classes :

- nul - faible - moyen - fort

les "scores" de prédisposition déterminés auparavant.

L'aléa résultant pourra alors, à son tour, faire l'objet d'une estimation algorithmique du style :

$$A = aPa,e + bPg + cPr$$

Reste à savoir, évidemment, comment utiliser les coefficients a, b et c. Le processus est d'utilisation simple à condition de ne pas oublier le fondement de la démarche d'expertise qui consiste en une bonne et claire justification du mode d'utilisation de l'outil ainsi forgé.

La carte "interprétative"

Cette carte a été réalisée pour essayer de prendre en compte les recommandations de la DRM (réf n° 1)

Or ces recommandations ont été établies dans l'esprit des procédures de "Porté à connaissance" sur des territoires plus vastes que celui concerné ici.

La carte a été établie de façon subjective : elle ne résulte plus, comme les autres d'une analyse explicite et assistée par ordinateur. Elle s'appuie cependant sur les résultats réunis dans les cartes précédentes, mais la démarche n'est pas facile à suivre.

2.4.4. Critiques de la méthode, remarques, propositions.

La méthode utilisée à Laon est originale et très intéressante puisqu'on y utilise les ressources d'un MNT, et les possibilités de visualisation cartographique de la répartition spatiale des facteurs de prédisposition à la manifestation de tel ou tel phénomène.

Il paraît regrettable cependant que la réflexion sur les causes et mécanismes des phénomènes n'ait pas été plus approfondie. Le résultat aurait vraisemblablement, alors, été plus intéressant.

On reviendra ci-dessous sur quelques propositions relatives à ce qu'auraient pu être ces réflexions.

Pour en rester, ici, à l'utilisation proprement dite de l'analyse des facteurs avec l'outil SYNERGIS, on soulignera quelques points nécessaires pour améliorer la capacité d'analyse et d'expression.

Le MNT a été obtenu par digitalisation des courbes de niveau de la carte topographique à 1/5000. Ce MNT est essentiel pour les phénomènes concernés. L'acuité des résultats dépend largement de sa précision. Fallait-il dans ces conditions, s'en tenir à un pixel de 30 mètres de côté ? Le souci a sans doute été de limiter la taille des fichiers, mais d'autres expériences, depuis, ont montré qu'il était possible de faire mieux en ce domaine et donc d'arriver à une vision plus fine des terrains étudiés.

L'analyse des facteurs de prédisposition laisse planer bon nombre de questions.

Concernant la prédisposition aux affaissements et effondrements, on prend assez naturellement en compte la nature des terrains et la probabilité (exprimée à travers une analyse d'archives) d'existence ou pas de galeries. On aurait aimé juger de ces critères par une analyse en retour du degré de corrélation existant entre les zones déclarées hautement suspectes et les points où se sont effectivement produits des affaissements ou effondrements. Par ailleurs, les galeries se développant essentiellement dans les calcaires, était-il nécessaire d'introduire les autres terrains dans la grille de pondération ? Il eût sans doute été préférable de pousser la réflexion sur l'épaisseur de la dalle calcaire. Paradoxalement, il semble que les données disponibles en Banque des Données du Sous-sol aient été sous-utilisées.

Concernant l'aléa glissement, on a eu recours à un calage sur les calculs de stabilité de type géotechnique, comme à Saint Julien les Metz, et cela justifie des classes de pente. Peut-être eût-il été, là encore, souhaitable de s'interroger sur les valeurs de pente au voisinage des nombreux points où des ruptures se sont effectivement manifestées. Le critère mode d'occupation du sol est certainement intéressant, l'homme ayant sa part dans le déclenchement des phénomènes d'instabilité, mais la façon dont est présentée sa prise en compte n'est pas très claire!

Enfin, le critère eau, en dépit de son extrême importance n'est que fugitivement évoqué. L'expérience de la Porte Vinox fournissait pourtant abondante matière à réflexion. La disponibilité d'un MNT permettait aussi de mieux expliciter les modes de concentration du ruissellement superficiel, leur aggravation par l'urbanisation. On pouvait, là encore, améliorer l'analyse des facteurs de prédisposition au ravinement.

Il est difficile de commenter la dernière carte, dite interprétative puisqu'elle se situe à l'écart de la démarche d'ensemble. On aurait aimé quelques explications plus détaillées sur son mode de conception.

3. ESSAI DE TRAITEMENT DU PROBLEME DE CHUTES DE BLOCS ET D'ECROULEMENT A AIGUEBLANCHE

3.1. ESSAI D'APPLICATION D'UN SIG A LA METHODOLOGIE PREEXISTANTE.

La localisation de la zone d'étude est fournie en Annexe 1, figure n° 1bis.

Comme on l'a dit plus haut, l'utilisation rationnelle et optimale d'un SIG pour une étude de PER nécessite de posséder des données référencées géographiquement.

C'est ce que l'on a tenté de faire en digitalisant tous les documents disponibles sur Aigueblanche :

- carte des classes de pentes générée à partir du fichier altitude, lui même produit à partir de la digitalisation des courbes de niveau, à 1/5000.
- carte géologique,
- carte PER,
- carte vulnérabilité,
- POS,

puis en essayant de reproduire de façon automatique le croisement des données ainsi reconstituées, selon la méthode préconisée par les auteurs du rapport.

On a alors été confronté à l'absence déjà citée, d'informations concernant les volumes mobilisés et les critères de détermination des protections.

On a donc poursuivi l'application SIG en essayant de développer, sur des données souvent fictives mais cohérentes, de nouvelles pistes de recherche méthodologique, toujours dans l'esprit de l'étude préexistante, mais simplement plus adaptées aux possibilités des SIG.

Ces développements ont également pour but de montrer le style de traitements nouveaux que favorisent les SIG (en l'occurrence ILWIS, de ITC, réf n° 7), ceci dans un souci d'objectivité, tout en précisant à chaque étape les limites de l'outil et les contraintes qu'il peut imposer.

L'idéal serait dans une phase finale de dégager une méthode fiable et transposable de réalisation assistée par ordinateur de PER. Ceci passe donc par une phase expérimentale et la partie suivante peut en représenter une première étape.

3.2. ESSAI DE CARACTERISATION DE L'ALEA CHUTE DE BLOC.

Compte tenu du réel danger que représentent les chutes de blocs pour la commune d'Aigueblanche (cf. événements de 1937 et 1977), on a décidé d'accorder un intérêt particulier à ce type de phénomène en délaissant délibérément les autres types d'instabilité représentés sur la commune.

Pour affiner la cartographie préexistante de l'aléa chute de blocs, on a utilisé le logiciel de trajectographie GENCONe dans l'environnement du SIG ILWIS.(réf n° 7) On a sélectionné assez arbitrairement des zones de départ potentiel de blocs sur les falaises surmontant la commune, bien que des informations précises existent, notamment dans un rapport du BRGM (réf n°8).

GENCONe permet de dessiner l'enveloppe conique des trajectoires possibles pour un bloc qui se détacherait de la falaise. Une telle trajectoire se développe en effet sous une ligne d'énergie liant le point de départ et le point d'arrivée du bloc. Facile à déterminer pour un évènement déjà survenu, cette ligne peut se calculer à l'aide de logiciels aujourd'hui classiques. Ce cône-enveloppe intercepte la topographie définie par un MNT suivant une ligne gauche qui peut être considérée comme la limite d'extension des trajectoires de blocs en provenance d'un point donné.

Toutes les trajectoires, observées ou calculées se composent de deux parties principales :

- une partie amont où le bloc se déplace en général par rebonds successifs, avec, entre les rebonds, des hauteurs de vols variables. Dans cette partie, on peut théoriquement calculer les caractéristiques dynamiques du mouvement du bloc et ainsi déterminer en tout point son énergie cinétique, sa vitesse de rotation et sa vitesse de translation. Cela suffit à déterminer l'énergie dissipée en cas d'impact sur un élément.
- une partie aval où le bloc se déplace par roulement, glissement, ou rebonds, mais de faible hauteur. Là encore, on peut calculer les caractéristiques d'un impact. On peut même et surtout dimensionner un obstacle susceptible d'arrêter la course du bloc. On remarquera que dans la partie amont de la trajectoire, un tel dimensionnement, bien que théoriquement possible n'aurait pas été réaliste en regard de l'altitude de vol des blocs.

La figure 3.1 ci contre permet d'illustrer ce propos. On voit que, en dessous du cône-enveloppe précédemment évoqué, on peut définir un cône intermédiaire dont la génératrice relie le point de départ du bloc au point au delà duquel le bloc ne dépasse plus une hauteur de vol modeste (par exemple deux mètres) ce qui rend possible une parade par interception.

En considérant ce cône intermédiaire, et de la même façon que ci-dessus, on peut déterminer une limite d'extension de la zone où le bloc n'est pas interceptable.

En répétant le traitement pour plusieurs zones de départ, on peut tracer l'enveloppe des deux limites ainsi considérées.

La visualisation et l'édition de ces zones s'effectuent grâce à ILWIS par traitement graphique des résultats de GENCONe. On obtient deux types de zones (Annexe 1, fig n° 1), chacune caractérisant un mode de propagation différent (zone des blocs qui "rebondissent" et zone des blocs qui "roulent").

On pourra alors associer à chacune des deux zones définies dans ce document, un potentiel d'endommagement particulier correspondant à un mode de propagation particulier.

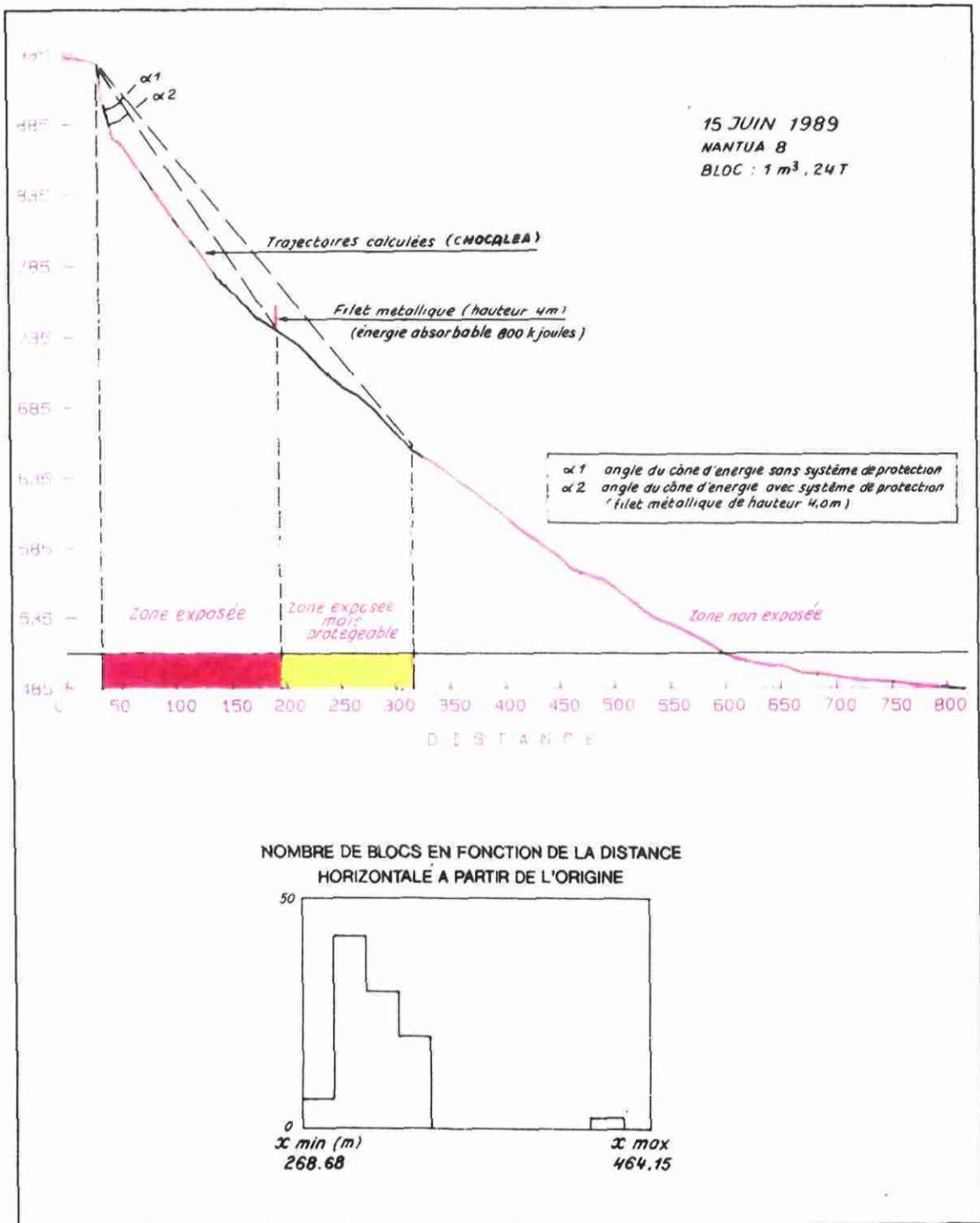


Fig n° 3.1 ILLUSTRATION DES DEUX PRINCIPALES PARTIES DE LA TRAJECTOIRE D'UN BLOC

Ainsi, la zone exposée aux blocs dits "rebondissants" se caractérisera par des blocs de très forte énergie avec une capacité de destruction majeure due à des impacts directs.

La zone exposée aux blocs dits "roulants", se caractérisera pour sa part par des blocs d'énergie plus faible avec une capacité de destruction plus faible mais variable suivant la position des éléments exposés vis à vis de la trajectoire de ces blocs.

3.3. ESSAI D'EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX CHUTES DE BLOCS.

3.3.1. Evaluation des potentialités d'endommagement des chutes de blocs .

Pour affiner l'étude de vulnérabilité préexistante, on a besoin de bien caractériser l'aléa chutes de blocs vis à vis de son potentiel d'endommagement (intensité) absolu, c'est à dire sans se soucier de la qualité des éléments qui y sont exposés. On suppose pour cela que les blocs qui "rebondissent" ou qui "roulent" ont le même processus d'endommagement, c'est à dire par impact.

Ce potentiel est fonction de l'énergie de ces blocs, elle même fonction de leur mode de propagation, de leur forme, de leur densité, de leur volume etc. Or, si on considère leur mode de propagation conformément aux hypothèses retenues précédemment, on peut envisager d'affiner la variation spatiale de ce potentiel d'endommagement absolu.

Pour ce, on considère, comme précédemment, que la zone des blocs qui rebondissent correspond à une capacité d'endommagement maximale, où tous les éléments du paysage sont uniformément exposés. Par contre, pour la zone des blocs qui roulent, on peut introduire un gradient du potentiel d'endommagement, ou d'énergie destructrice.

On va alors compléter et affiner l'analyse en considérant qu'un bloc qui roule perd le maximum d'énergie à chaque impact majeur avec un obstacle situé sur sa trajectoire. C'est la présence ou non de ces obstacles ainsi que leur nombre qui vont se révéler déterminants pour apprécier le potentiel destructif des blocs en différents points de leur trajectoire présumée.

Ces hypothèses de travail nécessitent d'introduire quelques règles, aussi imparfaites et perfectibles soient-elles :

- on suppose que les seuls obstacles véritablement efficaces contre des blocs roulants sont, de par leurs dimensions et leur nature, les bâtiments,
- on a considéré que le plus gros bloc se propagerait au plus jusqu'au lit de la rivière (ce qui correspond aux observations de terrain), et ne s'arrêterait définitivement que s'il rencontre (et endommage) trois bâtiments au moins,

- pour développer cette règle, on a considéré des propagations suivant des profils parallèles conformes aux observations faites lors de la catastrophe, en identifiant la position du premier, puis du deuxième bâtiment sur chacun de ces profils. La carte de la figure n° 2, annexe 1, montre l'enveloppe des points de rencontre avec le premier bâtiment (bleu clair) et le second bâtiment (bleu foncé),
- on définit quatre zones correspondant à autant de niveaux de capacité d'endommagement (fig. n° 3, ann. 1) en combinant le mode de propagation (fig n° 1bis, ann. 1) et le document précédent. Le niveau maximal correspond évidemment à la zone de trajectoires aériennes (blocs rebondissants), pour laquelle en cas d'impact l'énergie libérée par le bloc est maximale.

Cette règle pourrait être affinée en considérant les caractéristiques propres de chaque bloc, de chaque bâtiment et en connaissant mieux les lois qui régissent les interactions entre une structure et un bloc. On touche sur ce point à toute la complexité qu'introduit une analyse de vulnérabilité matérielle de biens.

De la même façon, une meilleure analyse des trajectoires potentielles des blocs permettrait de préciser davantage le contour de ces trois zones. Enfin, une telle méthode pourrait être modélisée et automatisée en combinant sous un SIG un logiciel de trajectographie avec une base de données relative aux différents obstacles rencontrés sur chaque trajectoire de bloc.

3.3.2. Classification des biens exposés aux chutes de blocs

La première difficulté qui apparaît dans cette étude de vulnérabilité sous SIG est de définir une bonne classification des éléments du paysage en vue de la constitution de bases de données pour chacun de ces éléments. Une bonne classification permettra de digitaliser une fois pour toutes le contour de ces éléments et de travailler toujours sur le même découpage géographique. C'est ce qui a été réalisé sur la figure n° 4, annexe 1.

Le découpage géographique retenu, repose sur une typologie de ces biens. Mais il a fallu essayer de mettre au point une typologie spécifique basée sur le mode d'endommagement :

- infrastructures de transport de biens, de personnes, d'énergie ;
- infrastructures de production ou de stockage d'énergie ;
- zones d'habitat; espaces naturels etc...

Ce découpage est orienté en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire dans cette étude de vulnérabilité. Il repose notamment sur la notion d'endommagement différentiel des éléments vis à vis d'un même type de phénomène d'instabilité. Le problème n'est qu'abordé sommairement ici et nécessitera de longues recherches.

3.3.3. Essai de caractérisation de la vulnérabilité "matérielle" aux chutes de blocs

Dans un premier temps, on va s'intéresser à la vulnérabilité matérielle, c'est à dire au niveau d'endommagement potentiel des biens recensés sur la zone directement exposée aux chutes de blocs. Les dommages éventuels sur ces biens vont dépendre de leur capacité à résister physiquement à un bloc d'énergie donnée. On parlera de tolérance physique de ces biens.

Si on commence par les biens, plutôt que par les personnes ou les activités, c'est parce que, à priori, les relations d'endommagement existant entre ces biens et le phénomène considéré sont plus faciles à appréhender. D'autre part, les dommages ou préjudices sur les personnes, et surtout sur les activités vont dépendre directement de ces dégâts matériels, ces biens pouvant abriter (habitat) ou supporter (voies de communications) des personnes et permettre le fonctionnement d'activités (production, tourisme, communications par exemple).

Essai de caractérisation de la tolérance physique des biens aux chutes de blocs

Compte tenu de la complexité des interactions susceptibles d'apparaître entre un bloc et une structure on a eu du mal à trouver un critère commun à tous les biens exposés qui permette de traduire au mieux leur résistance physique vis à vis des chutes de blocs. Une étude plus poussée aurait nécessité de trouver le ou les critères de résistance les plus pertinents pour chaque type d'élément. Mais une telle analyse est d'une complexité dépassant le cadre de cette simple étude de faisabilité. On s'est donc efforcé d'apprécier qualitativement la valeur de cette résistance physique des différents biens aux impacts des blocs, en prenant en compte des critères comme leur épaisseur, leur hauteur, leur densité, etc...

Cependant, on a eu du mal à caractériser la résistance physique de certains biens, notamment fonciers. En effet, comment, par exemple, traduire simplement la vulnérabilité matérielle d'un champ en jachère ? La notion de vulnérabilité matérielle perd son sens pour un tel élément : l'endommagement est faible, mais l'utilisation future du bien sera entravée par son exposition à de nouvelles chutes potentielles.

On s'est donc contenté de considérer seulement les biens matériels manufacturés et par extension également quelques éléments du paysage naturel comme les forêts et les cultures (vignobles). Les zones inoccupées, n'ont pas été prises en compte.

La carte fig n° 5, annexe 1 illustre le découpage retenu.

Evaluation des dommages matériels potentiels liés aux chutes de blocs

Cette évaluation est obtenue numériquement (fig. n° 6, ann. 1)) en combinant la carte des "potentialités d'endommagement liées aux chutes de blocs" (fig. n° 3, ann. 1) et la carte de "résistance des biens aux impacts de blocs".(fig. n° 5, ann. 1).

On a :

- quatre classes de potentialités d'endommagement (intensité) auxquelles on attribuera un score "I" avec :

$$0 < I \leq 1$$

On se réserve ultérieurement d'affiner l'évaluation du score en considérant par exemple une quantité de référence, l'énergie maximale du bloc pendant sa trajectoire.

- six classes de résistance, "R" avec :

$$0 < R \leq 1$$

La valeur 1 correspond ici aux biens les moins résistants.

La vulnérabilité sera évaluée par le produit :

$$V = R * I$$

Elle sera maximale pour $I = 1$ et $R = 1$. On a choisi ici de séparer six classes de vulnérabilité (fig n° 6, ann. 1).

Ce premier exemple n'a d'ambition que d'évoquer une future méthodologie. Dans le cas présenté, on a choisi empiriquement les valeurs de I et de R pour les divers ensembles cartographiés.

Un travail de recherche très important reste à accomplir pour mettre au point des règles d'évaluation de ces éléments (intensité et interaction ou résistance au phénomène)

3.3.4. Vulnérabilité, préjudices humains

On a traité jusqu'ici des éléments de type "biens" c'est à dire des éléments immobiles. On a essayé de trouver une expression du niveau d'endommagement potentiel (vulnérabilité) de ces biens pour un phénomène qui se produit effectivement en un endroit donné et dont on a cherché à caractériser l'intensité. On n'a pas introduit la notion de probabilité d'occurrence dans l'espace ou dans le temps de ce phénomène : ce sera une autre partie de l'analyse du risque.

Pour des éléments mobiles, et en particulier pour les personnes, une confusion essentielle doit être évitée.

Il est évident, en effet, que si la personne n'est pas présente en l'endroit précis où se produit le phénomène, elle ne subira aucun préjudice. Ce n'est pas pour autant que sa "vulnérabilité" au phénomène est nulle. Il faut prendre en compte un autre facteur : la probabilité que la personne soit présente au bon endroit, au bon moment. Mais cette prise en compte doit se faire à l'extérieur du concept de vulnérabilité, tout comme la probabilité d'occurrence du phénomène.

En y regardant de plus près, une personne a, par rapport à un objet, une capacité de mobilité qui peut lui permettre d'éviter l'impact par une esquive ou une fuite et sans doute doit on considérer cela comme un élément de pondération de la vulnérabilité.

En contrepartie, les préjudices subis sont souvent la conséquence des dommages aux biens qui abritent les personnes ou qui les transportent.

Les préjudices humains (vulnérabilité des personnes) générés par les chutes de blocs vont donc dépendre :

- du phénomène, et notamment de son mode de manifestation et de son rythme (favorisant l'effet de surprise par exemple),
- de l'endommagement potentiel des biens associés à une présence humaine,
- de beaucoup d'autres facteurs tels que la capacité de mobilité des gens, le niveau de protection apporté par les structures, la possibilité d'être rapidement secouru, les habitudes de vie, le niveau d'information vis à vis du danger etc...,

Ne pouvant prétendre ici procéder à une analyse exhaustive du problème, on a choisi de faire avancer la réflexion sur quelques points particuliers.

La probabilité de présence en un endroit donné ou taux de fréquentation.

Ce taux de fréquentation a été calculé pour chaque élément exposé du paysage sous étude, sur la base de données fictives mais suffisamment discriminantes. Il est calculé en nombre d'heures de fréquentation pour une journée. Si la démarche est facile à mettre en oeuvre pour les lieux de résidence :

- habitats (sur une base de 16 heures/jour soit un taux $t=0.66$)
- lieux de travail (sur une base de 8 heures/jour soit $t=0.33$),

le calcul se complique pour les voies de communications où l'on doit considérer la vitesse moyenne des véhicules ainsi que la longueur de la portion de territoire exposé traversée.

La figure n° 8, annexe 1 illustre l'application fictive faite à Aigueblanche.

Le niveau de protection apporté par les structures .

Parmi les critères évoqués ci-dessus, on a retenu le niveau de protection apporté par les structures, ce qui conduit à différencier une vulnérabilité directe d'une vulnérabilité induite, non plus des personnes aux chutes de blocs, mais à la ruine des biens qui les abritent du fait de leur propre endommagement par ces mêmes blocs.

La figure n° 7 (ann. 1) illustre cette notion en différenciant par exemple la vulnérabilité des personnes se trouvant sous le tunnel de celle des personnes circulant sur une route et protégées par la seule épaisseur de la carrosserie de leur voiture.

L'évaluation de la vulnérabilité humaine

On distinguera :

- la **vulnérabilité directe** : lorsque la personne est au contact direct du phénomène chute de bloc. Comme on l'a vu plus haut, dans le cas particulier de la chute de bloc, il est légitime d'afficher $V = 1$: si le bloc tombe sur la personne, il la tue. Mais, on a vu aussi que cette vulnérabilité directe pouvait être amoindrie par une série de facteurs, au premier rang desquels figure la mobilité, m_i , de la personne, et notamment de la personne avertie et attentive. On pourra envisager une expression de la forme :

$$V = I/(1+m_i)$$

- la **vulnérabilité** que l'on serait tenté de qualifier d'indirecte : la personne ne subit plus l'effet du bloc, mais l'effet de la ruine du bien.

Il importe là encore d'être très rigoureux. Ce n'est plus le bloc qui provoque le préjudice, c'est la ruine ou la dégradation du bien qui subit la chute du bloc.

La personne est vulnérable à ce nouveau type de phénomène induit par le premier. La vulnérabilité de la personne peut résulter de la démolition totale ou partielle du bâti, elle peut aussi par exemple résulter de la perte de contrôle d'un véhicule devant lequel chute, sans le frapper, le bloc.

En l'état actuel, on n'est pas en mesure de développer l'application correspondante sur Aigueblanche. On a cependant tracé une carte de "vulnérabilité humaine", (fig. n° 9, ann. 1) sur des critères qui demeurent insatisfaisants : mais que l'on affinera par la suite :

- carte des niveaux de protection apportés par les structures (fig. n° 7, ann. 1)
- carte de potentialité d'endommagement des biens (fig. n° 3, ann. 1)

pour permettre d'évoquer les phases suivantes d'une future méthode.

L'évaluation des préjudices humains potentiels en nombre de victimes (enjeux humains)

On a dressé une carte de "densité de la population" (obtenue en divisant pour chaque élément le nombre de personnes qu'il accueille en moyenne par sa surface, (fig. n° 10, ann. 1), pour appréhender le préjudice humain en nombre de victimes potentielles (fig. n 11, ann.1).

Pour compléter ce dernier document, on pourrait introduire une nouvelle notion très difficile à quantifier : il s'agit pour chaque élément exposé du paysage d'évaluer le nombre de personnes qui serait mis en jeu dans l'éventualité de sa destruction totale, du moins au niveau de la zone d'impact. Ceci pour introduire le fait que la destruction de certains équipements pourrait avoir des effets indirects dramatiques pour les personnes.

Ainsi, la destruction du barrage ou de la voie ferrée présentent-ils un caractère tout à fait préjudiciable pour les personnes qui y sont directement ou indirectement associées. Ces informations, très subjectives qui se chiffrent en nombre de victimes potentielles indirectes par type d'élément exposé sont regroupées dans la carte intitulée "enjeux humains indirects". Ainsi, par exemple, on supposera que la destruction d'un tronçon de route ou son recouvrement par un bloc pourra entraîner en moyenne la mort de 6 personnes, surprises par l'obstacle, etc..., les préjudices seront davantage élevés pour un train (possibilité de déraillement), et pires encore pour le barrage susceptible de libérer une lame d'eau dévastatrice.

Le document final sera donc une carte des enjeux humains globaux traduisant la potentialité de voir des victimes par type d'élément endommageable.

3.3.5. Evaluation de la vulnérabilité globale (humaine et matérielle).

Le croisement des cartes de "vulnérabilité humaine" et de "dommages potentiels matériels (vulnérabilité matérielle)" donne la carte dite de "vulnérabilité globale", figure n° 12, annexe 1. Ce document hiérarchise les niveaux de dommages potentiels, tant humains que matériels, qui menacent la portion de la commune d'Aigueblanche exposée aux chutes de blocs. Ce sont donc les zones les plus menacées par le ou les phénomènes d'une part, les plus vulnérables d'autre part, qui nécessiteront une attention plus particulière en terme de mesures de prévention prioritaire pour tenter de réduire ces dommages ou préjudices potentiels. Ceci est d'autant plus important quand on ne peut pas agir directement sur l'aléa, pour le détourner ou le résorber.

3.3.6. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la fonction communication (routes, voies ferrées, ouvrages d'art) .

Dans cette dernière partie, on a tenté d'évaluer la vulnérabilité de la fonction transport des biens et des marchandises et communication des personnes, en considérant pour chaque élément de communication, Ec, trois critères déterminants qui sont :

- la quantité de marchandises transitant, en Tonnes par jours (T/j),
- le nombre de personnes transitant par jour (np/j), qui sont une mesure de l'importance de l'activité de chaque élément de communication (routes, voies ferrées, viaducs etc...).
- la possibilité de trouver une déviation dans l'éventualité d'une interruption du trafic, que l'on traduit par un coefficient de déviation Cd tel que $Cd = 1+d$, avec d=nombre de déviations possibles par type d'élément de communication.

La règle de calcul adoptée est la suivante : pour chaque élément de communication E_c , on définit un coefficient de vulnérabilité de la fonction communication VE_c , tel que :

$$VE_c = \frac{(np/Snp + T/ST)}{1 + d} / 2$$

avec Snp = nombre total de personnes transitant par jour sur l'ensemble des éléments de communication de la vallée.

et ST = quantité totale de marchandises en tonnes transitant par jour sur l'ensemble des éléments de communication de la vallée.

VE_c sera compris entre 0 et 1.

Par exemple, pour la voie ferrée : $VE_c = (3000/50170 + 1500/14740) / 1+0 / 2 = 0.08$

Autre exemple, pour la route départementale traversant le centre ville : $VE_c = (1200/50170 + 100/14740) / (3+1) / 2 = 0.004$

Le traitement graphique sous ILWIS de ces données donne la carte dite de "vulnérabilité de l'activité communication" présentée figure n° 13.(ann.1).

3.4. BILAN ET CONCLUSIONS RELATIFS A AIGUEBLANCHE

Toutes les cartes présentées n'ont pour ambition que de lancer les prémisses d'une méthode d'analyse des vulnérabilités des divers éléments exposés pour un type de phénomène assez simple à caractériser, la chute de blocs. Il semble que moyennant quelques recherches complémentaires, une voie ait été ouverte, difficile d'accès si l'on ne consent pas l'effort préalable de structuration des données qui va de pair avec l'adoption d'une sémantique rigoureuse. Mais ces démarches peuvent et doivent être menées conjointement pour tous les éléments exposés aux divers phénomènes naturels générateurs de risque. Il s'agit donc d'un effort long mais fructueux et auquel il faut consacrer un minimum de travail dans les prochaines années.

4. LE CAS DE SAINT JULIEN LES METZ : LES DOMMAGES POTENTIELS LIES A CERTAINS MOUVEMENTS DE TERRAIN

4.1. LES GLISSEMENTS REGRESSIFS PROFONDS QUI AFFECTENT LE COTEAU LE LONG DE LA RD 1

La figure n° 1bis de l'annexe 2 permet de localiser le secteur d'étude.

Parmi les trois types de glissement qui affectent le territoire de la commune, deux semblent assez bien circonscrits, le premier dans les argiles de Levallois, le second, en dessous du Fort Saint Julien, sur un plaquement argileux d'extension limitée au voisinage de la faille.

Il a paru plus intéressant de considérer les manifestations du troisième type, celles qui affectent le coteau, le long de la RD 1. En effet il y a là huit glissements identifiés, c'est à dire un échantillon assez nombreux de mouvements relevant à peu près tous du même type de phénomène, décrits comme des glissements régressifs profonds qui affectent la puissante série argileuse couvrant le coteau boisé.

L'existence et la multiplicité de ces glissements a conduit les auteurs du rapport à afficher un aléa fort et homogène sur l'ensemble du secteur. C'est une solution raisonnable et prudente lorsque l'on n'a pas les moyens de pousser davantage la réflexion, puisque la relation entre la nature des matériaux, la pente et la multiplicité des événements recensés est très forte.

En prenant un peu de recul et de temps par rapport à ce premier diagnostic, il peut devenir très intéressant d'essayer d'analyser un peu plus finement les conditions réunies autour de chaque glissement.

La première remarque à faire concerne tout simplement la géomorphologie : le coteau est à peu près rectiligne et sa pente générale est assez homogène, mais, en y regardant de plus près, on y voit bien des différenciations morphodynamiques liées à son histoire plus ou moins ancienne.

Dans la moitié nord, la pente est assez homogène et raide. Un seul (double) glissement, mais d'importance, est cartographié, là où le coteau atteint sa hauteur maximale, et à proximité de la zone centrale, légèrement dépressionnaire par rapport à la forme générale du coteau.

La zone centrale est en fait la trace d'un ancien glissement dont la forme globale, différente des autres témoigne du rôle d'une abondante circulation d'eau profonde. Un réseau hydrographique semble s'y être développé et il eût été très intéressant d'essayer de recueillir et d'interpréter des renseignements hydrogéologiques. Cette circulation est presque certainement alimentée par la faille qui coupe en deux le secteur étudié. C'est à l'amont de cette zone de glissement ancienne, dans sa bordure haute mal stabilisée que l'on a choisi l'un des glissements actuels pour affiner la connaissance de son mode d'endommagement.

Dans la moitié sud, les cinq glissements actuels s'inscrivent dans une zone déstabilisée assez raide. Ils semblent correspondre à des manifestations localisées d'un vaste déséquilibre. La raideur du versant laisse penser que dans ce secteur, l'eau joue un rôle moins déterminant que dans le précédent et que c'est surtout la pente qui doit être considérée comme le facteur essentiel de déséquilibre. Le deuxième glissement actuel choisi pour une réflexion complémentaire sur la vulnérabilité se situe à la limite du secteur central et du secteur sud.

Ainsi, l'ensemble du coteau serait déstabilisé essentiellement par l'action érosive de la rivière, avec des ruptures importantes, notamment au sud sur des parties de versants hautes et raides. Le processus de déstabilisation serait plus avancé au sud qu'au nord où la seule zone de glissement identifiée correspond précisément :

- à l'endroit où le versant a une hauteur maximale,
- au voisinage immédiat de la zone centrale, elle-même plus intensément déstabilisée par le jeu d'un facteur supplémentaire : l'eau profonde.

Toutes ces remarques, à condition d'être revues et amendées par un travail supplémentaire sur le terrain, qui n'était pas possible dans le cadre de la présente étude pourraient conduire à une expression plus nuancée de l'aléa sur l'ensemble du coteau.

4.2. LES MODES D'ENDOMMAGEMENT LIES A DEUX GLISSEMENTS PARTICULIERS

4.2.1 Les processus générateurs de dommages

On a limité l'analyse à deux cas de glissements de terrain déclarés, de type circulaires assez profonds (5 m), régressifs, sélectionnés surtout pour la nature et la diversité des biens qu'ils sont susceptibles de mettre en péril et dont on va essayer d'évaluer la vulnérabilité.

La première étape a consisté à définir les différents modes d'endommagement associés aux glissements. On a retenu trois processus mécaniques générateurs de dommages pour les éléments présents à la surface du sol :

- l'affaissement, à composante essentiellement verticale, qui domine dans la partie supérieure des glissements;
- la déformation classique pour les zones centrales et périphériques,
- le gonflement ou le recouvrement (bourrelet de pied), à composante essentiellement horizontale pour la partie aval.

Cette classification reste très schématique et mériterait d'être affinée, du moins dans sa représentation spatiale. La grande difficulté reste de caractériser la propagation du glissement ainsi que les zones d'interférence de ces différents processus d'endommagement.

De plus, il fallait caractériser chaque mode d'endommagement par une intensité qui peut être assimilable à une amplitude des déformations.

Sont définis ainsi trois niveaux d'intensité (de 1-faible à 3-fort) pour le mode affaissement (af.), deux niveaux pour le mode déformations (def.) et deux niveaux pour le mode recouvrement (re.).

Processus	Intensité	faible, niveau 1	moyenne, niveau 2	forte, niveau 3
Affaissement		cm à dm	dm à m	multi m
Déformation diffuse			dm à multi dm	m à multi m
Gonflement de pied			dm à multi dm	m à multi m

Les processus et intensités estimés sont regroupés sur la figure n° 1 de l'annexe 2.

4.2.2. Essai de classification des éléments exposés et évaluation de la vulnérabilité matérielle.

On a sélectionné trois types d'éléments exposés : des routes, des bâtiments et des zones soit de cultures (vergers) soit de bois (fig. n°2, ann. 2). Ces éléments, de par leur nature variée, vont subir des dommages différents vis à vis du processus de déformation auquel ils vont être soumis.

Une autre difficulté, ici, est de caractériser au mieux leur niveau d'endommagement potentiel mais aussi de définir, pour des éléments différents, une grille d'endommagement générale.

Seule la vulnérabilité des éléments matériels sera considérée ici (biens et activités). La faible extension des zones de désordre, le rythme lent des mouvements et l'existence de déviations possibles pour les réseaux divers permettent de n'accorder qu'une importance secondaire à la vulnérabilité personnelle et sociale.

Le niveau d'endommagement (biens) ou de dysfonctionnement (activités) retenu pour les éléments soumis à un affaissement, une déformation ou un recouvrement (gonflement) est exprimé par le tableau suivant :

Processus	Intensité	Vulnérabilité		
		Cultures, bois	Routes	Bâtiments
Affaissement	1	0	2	1
	2	0	3	2
	3	2	3	3
Déformations	2	0	2	2
	3	1	2	2
Gonflement	2	1	1	0
	3	2	2	1

Les valeurs 0, 1, 2, 3 ayant les significations suivantes :

- 0 : dommages sans conséquences directes sur l'activité de l'élément
- 1 : dommages superficiels entraînant seulement une cessation d'activité à court terme
- 2 : dommages structuraux légers pouvant entraîner une gêne à moyen terme pour l'activité de l'élément
- 3 : dommages élevés se traduisant par une destruction de l'élément et entraînant des travaux de réhabilitation très importants. Interruption de l'activité à long terme

Sur les zones où interfèrent plusieurs processus d'endommagement, on a retenu la valeur la plus élevée.

Les informations obtenues dans ce tableau sont représentées dans la figure n° 3 de l'annexe 2, dite de "vulnérabilité matérielle des biens existants".

4.3. BILAN ET PERSPECTIVES RELATIFS AU CAS DE SAINT JULIEN

Au terme de cette brève réflexion sur le cas de Saint Julien, on retiendra :

- une possibilité d'analyser plus finement l'aléa en introduisant la prise en compte de deux facteurs supplémentaires assez aisément accessibles et cartographiables : la morphologie et l'hydrogéologie,
- une ébauche de méthode pour l'analyse sélective de la vulnérabilité induite par les types de glissements reconnus sur la commune.

Ces conclusions ne sont qu'indicatives : elles ne prétendent pas se substituer à celles qui ont été mises en évidence dans le P.E.R proprement dit, mais ouvrir des voies nouvelles d'analyse dans la perspective d'une révision et d'un approfondissement de l'évaluation et de la hiérarchisation des risques encourus sur la commune.

5. LE CAS DE LAON : ETUDE EN RETOUR DE DEUX TYPES D'ALEA ET REFLEXIONS PREALABLES SUR LA VULNERABILITE

5.1. L'ALEA GLISSEMENT DE TERRAIN.

5.1.1. Une nouvelle exploitation des données saisies sur le SIG.

La figure n° 1bis de l'annexe 3 permet de localiser le secteur d'étude.

On a vu au paragraphe 2.4.3 que la méthode utilisée pour la détermination d'une prédisposition aux glissements restait trop peu explicite. En particulier le rôle de l'eau y était évoqué mais pas véritablement pris en compte dans l'expression "algorithmique" de la prédisposition.

Pourtant l'expérience acquise avec le traitement du glissement de la Porte Vinox a clairement montré que les principaux glissements qui affectent les versants de la butte de Laon sont liés à la présence d'eau à la base des formations calcaires et à l'infiltration de ces eaux dans les argiles de faibles caractéristiques mécaniques sous-jacentes.

Les auteurs soulignent bien leur souci de ne pas avoir pu établir de corrélation fiable entre les diverses sources (qu'ils ont pourtant soigneusement recensées) et les rares informations disponibles en sondages. Il est en effet toujours très délicat d'essayer de corréler des niveaux d'eau mesurés dans des sondages à des moments différents et dans des circonstances très variables d'équipement du sondage et de méthodologie de mesure.

Il a paru intéressant dans ces conditions de s'interroger sur le mode de concentration de cette eau plus que sur la mesure de ses niveaux.

L'eau, d'origine naturelle ou anthropique qui s'infiltré sous la dalle calcaire qui sert de fondement à la vieille ville de Laon chemine vers le bas jusqu'à rencontrer des horizons moins perméables, et en particulier, au sommet du Cuisien, les fameuses argiles sous-jacentes déformables et faiblement résistantes. En fonction de la forme du toit de ces argiles (du mur de la barre calcaire), l'eau finira par s'accumuler dans des dépressions ou par ruisseler, en profondeur, sur ce toit dont la morphologie devient ainsi un élément essentiel de la répartition des flux d'eau souterraine.

Il serait donc très intéressant de connaître cette morphologie. On peut exploiter pour cela les sondages existants, ce qui semble ne pas avoir été fait dans l'étude. Mais on peut aussi exploiter des renseignements stockés parmi les données cartographiques disponibles.

En effet la carte géologique a été digitalisée, ce qui signifie en particulier que l'on connaît la position en projection plane de tous les points qui définissent le contour du contact entre les calcaires et les argiles, c'est à dire l'intersection du fameux toit des argiles avec la topographie existante. La structure tabulaire, en butte témoin, constitue évidemment une circonstance très favorable!

Disposant d'un MNT, on peut calculer l'altitude de chacun de ces points et finir par disposer ainsi d'une série de points calés en X, Y, Z de la surface recherchée. On peut alors, par simple interpolation manuelle esquisser la forme de cette surface et tracer les courbes de niveau correspondantes, puis les lignes de plus grandes pentes perpendiculaires à ces courbes de niveau.

C'est ce qui a été fait sur la figure n° 4, annexe 3 et cela révèle que cette surface est beaucoup plus tourmentée que ne le laisse prévoir le qualificatif de structure tabulaire communément utilisé.

Partant de cette surface, on a dessiné sur les figures n° 1 et 2, annexe 3 deux blocs diagrammes représentant en 3D la morphologie de la butte de Laon avec et sans la barre calcaire qui la couronne. La figure n° 3, d'un moindre intérêt représente l'épaisseur de la barre calcaire dont on voit qu'elle est très irrégulière.

Une fois esquissée la forme du substrat imperméable sur lequel l'eau s'accumule ou ruisselle, il est plus facile de comprendre comment cette eau souterraine peut circuler et où elle va se concentrer.

Le milieu est supposé isotrope; les lignes de plus grandes pentes sont assimilées aux lignes de courant.

On a donc dessiné un réseau de lignes de courant orthogonales aux courbes de niveau de la surface et on a déterminé des pseudos-bassins versants souterrains avec leurs possibles exutoires. On a essayé de faire en sorte que chaque tube de courant (intervalle entre deux lignes de courant) ait une largeur d'exutoire identique. Ainsi sur chaque segment du contour géologique correspondant à la limite calcaire-argile, on aura un flux de ruissellement souterrain, "F", proportionnel à la surface du tube de courant considéré.

Cela n'est évidemment pas très orthodoxe au plan hydrogéologique : il faudrait aussi tenir compte du gradient dans le tube de courant, du stock d'eau en régime semi-permanent, de circulations fissurales, de l'importance du milieu non saturé....

Il ne s'agit donc ici que de montrer une voie qui reste à affiner et à consolider.

Cette réserve majeure étant faite, on peut continuer à exploiter l'idée et dire par exemple que les exutoires possibles de cette circulation souterraine sont des points où le rôle de l'eau va être très pénalisant pour l'équilibre de la pente.

5.1.2. Une meilleure appréciation du rôle de l'eau dans la prédisposition aux glissements

La figure n° 5, annexe 3, montre les points de concentration des ruissellements souterrains.

A partir de ces points de concentration ou flux maximal, il faut maintenant imaginer comment traduire le rôle néfaste de l'eau sur la stabilité des formations argileuses, puis sableuses du Cuisien, à l'aval.

On admettra que cette influence se dissipera progressivement lorsqu'on s'éloigne de la zone d'émergence, mais qu'elle concernera une certaine fraction, par exemple 70% de la longueur de la pente argilo-sableuse.

Ainsi, sur les documents cartographiques du rapport de synthèse, à l'échelle de ces documents, en projection plane la largeur moyenne de la zone d'affleurement des argiles et sables cuisien sur le pourtour de la butte est d'environ 3 centimètres. La zone d'influence aura alors une largeur de 2,1 centimètres.

Par ailleurs, on supposera que l'influence de l'eau de ruissellement se traduit par une réduction du coefficient de sécurité au glissement plan de :

- 30% dans le tiers supérieur de la zone d'influence ainsi déterminée, soit sur 0,7 cm,
- 20% dans le tiers moyen, entre 0,7 et 1,4 cm,
- 10% dans le tiers inférieur, entre 1,4 et 2,1 cm.

Or, la distribution spatiale des flux disponibles est fonction de la surface des tubes de courant correspondants. Il faudra donc pondérer la largeur de la zone d'influence en fonction de ces flux.

Pour chaque sous bassin, on pourra calculer la valeur médiane de ces surfaces, en nombre de pixels, puis la répartition en classes que l'on définiera (tableau ci-dessous).

Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

Secteur, ou sous bassin versant	Surface du tube de courant médian	Largeur cartographique (en cm) concernée par une réduction de l'indice de stabilité, I, de :					
		coefficient de réduction de 30%		coefficient de réduction de 20%		coefficient de réduction de 10%	
		entre	et	entre	et	entre	et
1	1000	0	0,57	0,57	1,23	1,23	1,65
2	3000	0	0,60	0,60	1,29	1,29	1,74
3	5000	0	0,63	0,63	1,35	1,35	1,82
4	7000	0	0,66	0,66	1,41	1,41	1,91
5	10000	0	0,70	0,70	1,50	1,50	2,10
6	14000	0	0,76	0,76	1,62	1,62	2,18
7	18000	0	0,81	0,81	1,74	1,74	2,32
8	2500	0	0,91	0,91	1,95	1,95	2,60
9	45000	0	1,15	1,15	2,40	2,40	3,20

Ce tableau permet de tracer une nouvelle carte de réduction Delta I, de l'indice de stabilité sous l'effet de l'eau.

Reste à calculer cet indice de stabilité, avant de le réduire. On utilise pour cela, pixel par pixel, la formule classique de stabilité au glissement plan :, sans nappe.

$$I = (C + Gz \cos^2\beta \cdot \text{tg}\varphi) / Gz \sin \beta \cdot \cos \beta$$

avec :

- C : cohésion du matériau,
- φ : angle de frottement,
- Z : profondeur de la surface potentielle de glissement,
- G : densité du sol,
- β : pente du sol.

On a utilisé pour ces paramètres les valeurs tirées de l'expérience de la Porte Vinoux

En appliquant la réduction Delta I aux valeurs ainsi trouvées, on obtient une image beaucoup plus réaliste de la répartition de la présomption d'instabilité. Ce résultat est illustré par les figure n° 8 et 9, annexe 3. On peut percevoir une meilleure correspondance entre les zones de forte présomption et la délimitation des secteurs déjà affectés par des glissements de terrain sur la carte de la figure n° 9, en tenant compte des exutoires d'eau souterraine que sur la figure n° 8 où l'on n'a pas appliqué la diminution Delta I de l'indice de stabilité. Les figures n° 6 et 7 montrent, quant à elles la répartition des pentes dans les formations argileuses et sableuses du Cuisien et le décalage entre les histogrammes de pentes correspondant aux deux types de matériaux..

On souligne cependant que l'approche n'est pas encore parfaite, puisque la plus connue de ces zones, celle du glissement de la porte Vinoux n'est pas révélée. On peut expliquer ceci facilement par le fait que la méthode utilisée n'a pas permis de mettre en évidence une forte concentration d'eau souterraine dans cette zone où l'on connaît pourtant l'existence et le rôle déstabilisateur des "abreuvoirs de la Reine". C'est bien la preuve que la méthode est encore très perfectible et qu'il ne faut pas oublier d'intégrer dans les outils de traitement de l'information disponible l'expérience particulière que l'on peut avoir du terrain. Il serait en particulier très intéressant ici de reprendre la méthodologie esquissée en la complétant par les renseignements disponibles en banque des données du Sous-sol et en lançant une enquête hydrogéologique sérieuse qui vienne compléter ou amender les tendances affichées, notamment en prenant en compte le stock d'eau existant dans le sol et la possible concentration en certains lieux (cavités souterraines artificielles) de rejets anthropiques non contrôlés.

5.2. L'ALEA AFFAISSEMENT, EFFONDREMENT.

La démarche suivie par les auteurs est essentiellement basée sur l'existence de vieilles cartes ou plans indiquant approximativement la position des galeries ou caves reconnues. C'est là une information extrêmement importante mais que l'on aurait aimée assortie d'indications sur l'origine et la fiabilité de ces documents, ainsi que de quelques explications historiques sur le mode et le rythme de développement de ces cavités sous Laon. Il paraît probable que les matériaux extraits à des fins constructives l'ont été d'abord pour les édifices les plus importants (cathédrale, hôpitaux), et vraisemblablement à l'écart de leurs zones de fondation.

Sans doute eût-il aussi été souhaitable, sur la base de considérations lithologiques fines de savoir quelle catégorie de matériaux avait été exploitée de préférence, ce qui aurait permis de mieux situer les volumes d'excavation par rapport à la "tranche" de matériaux calcaires.

Les phénomènes d'affaissement ou d'effondrement se produisent quand l'épaisseur de matériaux disponible au dessus d'une cavité devient inférieure à une certaine épaisseur critique, elle-même fonction de l'extension de la cavité et de la nature des matériaux qui en constituent le toit.

Il est intéressant, dès lors, de revenir sur la figure n° 3 qui souligne les variations d'épaisseur de la table calcaire. A supposer que les excavations ne se soient faites que sur des hauteurs de l'ordre de 2 à 3 mètres, et selon le niveau lithologique où elles se situent dans la série calcaire, il devient possible de déduire une probable épaisseur de couverture résiduelle et sa variation sur l'ensemble du périmètre construit.

On a tracé sur la figure n°.10 les courbes d'iso-épaisseur de la couverture calcaire et la localisation (spatiale, mais pas altimétrique) des zones d'excavation connues. Par ailleurs, sur deux profils repérés sur la figure n°.11, on a extrait automatiquement les profils altimétriques correspondants :

- au terrain naturel,
 - à la limite inférieure des calcaires,
- et on a repéré les zones probables et possibles d'excavation.

En développant un peu plus cette approche, on comprend qu'il serait possible d'affiner beaucoup la caractérisation de l'aléa. Là encore, il serait nécessaire d'opérer quelques vérifications sur la base des sondages de la Banque des données du Sous-sol. Il faudrait aussi opérer quelques vérifications sur les dimensions des cavités souterraines existantes.

Les critères à prendre en compte pour une caractérisation plus fine de l'aléa seraient alors :

- l'épaisseur de couverture résiduelle,
- la dimension des cavités existantes,
- la position des horizons lithologiques qui pouvaient être intéressants pour l'exploitation,

mais aussi la connaissance des modes de sollicitation anthropiques récents : remblaiement, surcharges, rejet non contrôlé d'eaux souterraines...

5.3. LOCALISATION ET NATURE DES BIENS EXPOSES.

Bien que le rapport examiné ne comprenne pas de volet "étude de vulnérabilité", on a réuni ci-dessous quelques considérations sur les éléments exposés aux divers phénomènes naturels générateurs de risques sous Laon.

L'étude de vulnérabilité intéresse seulement la ville haute de Laon (Vieille ville intra-muros), établie sur le plateau calcaire, là où la densité en biens et en phénomènes d'instabilité est la plus élevée.

Les différents éléments structurels plus ou moins directement menacés par les deux phénomènes retenus peuvent être classés de la façon suivante :

- des voies de communication :
 - rues piétonnes,
 - voies routières secondaires,
 - voies routières principales ;
- des bâtiments, que l'on peut classer par fonction :
 - des habitations, souvent anciennes, mitoyennes (forte densité),
 - des bâtiments d'intérêt public :
 - une préfecture,
 - deux lycées publics,
 - une école normale d'instituteurs,
 - une école maternelle,
 - un hôtel de ville,
 - un conservatoire municipal de musique,
 - une caserne ;
 - des bâtiments à forte valeur patrimoniale (culturels, historiques) :
 - une abbaye
 - une église
 - une cathédrale
 - un rempart, mur d'enceinte de la vieille ville, avec ses tourelles, ses portes...
- des réseaux :
 - de communication (lignes téléphoniques)
 - d'assainissement (conduites souterraines)
 - d'alimentation en eau (conduites souterraines)
 - d'alimentation en électricité

5.4. POTENTIALITES ET MODES D'ENDOMMAGEMENT DES ELEMENTS EXPOSES.

L'analyse de vulnérabilité proprement dite consiste à évaluer la capacité que vont avoir ces différents types d'éléments exposés à subir différents modes et degrés de dommages. Ces dommages potentiels vont dépendre de l'intensité du phénomène (qu'il convient de caractériser en terme de potentiel d'endommagement avec des critères de volumes déplacés, pour les phénomènes d'effondrement ou de glissement, des critères d'importance des déformations pour les glissement seuls par exemple).

Ils vont dépendre aussi de la nature de l'élément et de son interaction avec le phénomène, c'est à dire d'un certain nombre de facteurs qui vont rendre cet élément plus ou moins sensible vis à vis du phénomène pressenti.

Disposant de trop peu d'informations sur les caractéristiques du phénomène, on va s'attarder seulement sur les facteurs de prédisposition aux dommages des éléments en supposant l'occurrence de phénomènes d'intensité modérée et représentatif des événements passés : soit des affaissements de quelques dizaines de mètres cubes et des glissements profonds de quelques mètres, mais lents

Pour ce qui est des effondrements :

- **Les dommages aux bâtiments** seront probablement importants (arrachements, effondrement, désolidarisation) et irrémédiables pour les structures situées directement à l'aplomb de la cavité ainsi formée. Par contre les structures ou bâtiments mitoyens non directement exposés auront probablement à subir des dommages moins sévères (fissuration) et dont la gravité sera largement fonction de leur niveau de solidarisation avec les parties effondrées.

On peut donc penser que la géométrie de la structure du bâti, qui va conditionner ou non la propagation des déformations, est un premier critère de vulnérabilité de l'élément bâtiment qui mériterait d'être plus finement analysé.

De la même façon, la nature et la géométrie des fondations des bâtiment constituent un second critère de vulnérabilité. Si ces fondations tiennent compte de l'existence d'une cavité sous-jacente en se faisant par exemple par l'intermédiaire de piliers reposant sur la base de la cavité, leur vulnérabilité sera évidemment moins forte que dans le cas contraire.

Ainsi, les constructions relativement récentes seront vraisemblablement plus vulnérables que les vieux édifices, tels que le monastère, l'abbaye, la cathédrale, dont la conception est probablement contemporaine des extractions de calcaires qui ont servi à leur construction. On peut penser que les bâtisseurs de l'époque ont eu l'intelligence de gérer leur extractions en assurant à leurs ouvrages des assises solides en continuité avec le substratum calcaire. Pour des ouvrages anciens, mais moins prestigieux, comme la plupart des maisons ordinaires de la vieille ville, il n'en a vraisemblablement pas été de même! leur vétusté peut certainement aggraver leur vulnérabilité.

- **les dommages aux voies de circulation** pourront prendre un caractère dramatique compte tenu de la brutalité du phénomène, principalement sur les axes routiers de desserte de la cité, en surprenant les conducteurs.
- **les dommages aux différents types de canalisations** dépendront directement de leur résistance et de leur niveau d'enfouissement (épaisseur en matériaux qui les surmontent).
- **les dommages aux remparts**, structure linéaire mais non moins homogène, dépendront du moins pour ce qui est de leur distribution spatiale, du niveau de cohésion de la portion exposé. Les parties linéaires seront certainement de ce fait moins vulnérables que les courbures ou les angles qui présentent souvent des discontinuités de construction. D'autre part, compte tenu de la localisation de ce mur d'enceinte situé en périphérie extrême du plateau calcaire, tout effondrement jouerait le rôle de catalyseur de dommages en dégageant le mur de son assise calcaire et en l'exposant à sa base à une érosion régressive entretenue par des glissements et des ravinements dans les argiles.

Pour ce qui est des glissements :

Ces glissements affectent essentiellement les pentes périphériques du plateau. Les dommages susceptibles d'y être associés concerneront donc essentiellement ici le mur d'enceinte de la vieille ville. Les critères de fragilité de ce mur seront donc les même que ceux évoqués pour les effondrements. Les dommages occasionnés sur cette structure prendront la forme d'effondrements, d'affaissements pour des vitesses de glissement élevées, ou de fissurations plus ou moins continues pour des phénomènes plus lents.

Quant aux désordres au bâti, les événements de la Porte Vinox en fournissent une excellente nomenclature....

5.5. BILAN ET CONCLUSIONS RELATIFS A LAON

Dans le cas de Laon, on s'est surtout attaché à montrer comment on pouvait singulièrement améliorer la connaissance de l'aléa en utilisant plus efficacement les outils disponibles (qui offrent, il est vrai, aujourd'hui des possibilités nettement supérieures à celles disponibles au moment de l'étude) et les nombreuses données factuelles sur les évènements ayant affecté le site. Bien que l'étude de vulnérabilité n'ait pas été traitée, l'existence dans la ville de zones d'architecture très différenciée doit conduire assez facilement à une expression très sélective de la vulnérabilité des biens.

Meilleure connaissance des phénomènes, bonne connaissance de la vulnérabilité : il y a de quoi faire de Laon un cas exemplaire pour la prévention des risques liés aux mouvements de terrain.

6. BILAN ET PERSPECTIVES

L'analyse en retour des trois cas présentés ci-dessus a permis de mesurer la difficulté qu'il y a à mener à bien un P.E.R mouvements de terrain, mais elle a permis aussi de préciser et d'affiner un certain nombre de concepts.

La connaissance des phénomènes et de leur mécanismes de déclenchement est un élément essentiel de la procédure. On a montré comment, en sortant des démarches traditionnelles et en utilisant avec discernement les moyens offerts par les outils de type SIG, on pouvait améliorer singulièrement l'affichage de l'aléa. Cela permet en général de réduire considérablement l'extension spatiale des zones d'aléa fort. Cela devrait permettre aussi d'exprimer mieux les conditions d'occurrence des phénomènes.

La vulnérabilité est une notion délicate à manipuler. Une confusion préjudiciable apparaît souvent entre vulnérabilité et risque ou encore entre vulnérabilité et valeur économique, alors que ces notions doivent rester absolument disjointes si l'on veut avoir une chance d'aller au bout des analyses dites de risque.

On doit bien, pour étudier la vulnérabilité, admettre que le phénomène se produit effectivement avec un type, une intensité et un rythme donné, ce qui renvoie à une obligation de bonne définition de l'aléa.

On n'a pas voulu et surtout pas pu aborder la notion de risque dans cette étude. Il eût fallu arriver à une meilleure maîtrise des deux éléments pris en compte, l'aléa et la vulnérabilité.

Le risque a souvent été présenté comme le produit de l'aléa et de la vulnérabilité : là où il y a une possibilité de voir se manifester un phénomène dommageable et où existent des éléments exposés (susceptibles d'être endommagés), la communauté concernée court le risque de subir une perte.

La valeur de la perte encourue peut s'apprécier au moyen d'indicateurs multiples. Le plus accessible, et le seul qui est évoqué ci-après est l'indicateur économique :

- valeur du bien
- importance économique de l'activité
- coût ou importance des fonctions sociales
- valeur, mais beaucoup plus difficile à mesurer, de la vie humaine ou des préjudices subis par les personnes.

Il y a cependant d'autres unités de mesures :

- environnementales :
- socio-politiques :
- socio-psychologiques...

Le M.I.T (Massachussets Institute of Technology) a développé une approche vectorielle du risque (Réf n°9), qui permettra sans doute un jour d'accéder à une meilleure analyse globale des risques générés par une situation donnée.

Toutefois, face à cette complexité, il faut trouver des moyens simples d'expression et d'évaluation du risque. On doit inévitablement recourir à une démarche analytique.

Au terme de cette analyse, on perçoit encore davantage le nécessité de développer les outils correspondants qui apporteront une aide appréciable à l'expert dans l'exercice de sa responsabilité première : fournir des éléments explicites d'appréciation pour la seule partie qui relève de sa compétence, et laisser aux décideurs la responsabilité des choix finaux.

Il faut bien voir qu'actuellement, les concepts de risque et de vulnérabilité peuvent prêter à différentes définitions. Un programme de recherche triennal est entrepris depuis 1992 autour d'une thèse pilotée conjointement par le BRGM et l'Institut de Géographie Alpine de l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Ce travail devrait viser essentiellement à identifier des relations entre éléments exposés et niveau d'endommagement ou de préjudice pour un phénomène de caractéristiques données.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Réf n°1 : Les études préliminaires à la cartographie des risques naturels majeurs, Secrétariat d'Etat auprès du Premier ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs, DEPRR, Délégation aux risques Majeurs, La documentation Française, 1990

Réf n°2 : Asté J.P.(1991) - Faisabilité d'un système d'aide à l'élaboration d'un diagnostic relatif aux risques générés par des mouvements de terrain, Rapport BRGM R 30703 ENV 4S 91

Réf n°3 : Plan d'exposition aux risques "Mouvements de terrain" du fond de la vallée de la Tarentaise entre Feissons sur Isère et Moutiers. Rapport CETE DE Lyon. Dossier P/17275. 1988

Réf n°4 : Plan d'exposition aux risques naturels (Mouvements de terrain). Commune de Saint Julien les Metz. Rapport de présentation. BRGM, SGR Lorraine, Direction départementale de l'Equipement de la Moselle

Réf n°5 : Laon, Plan d'exposition aux risques de mouvements de terrain, carte d'aléa, Rapport BRGM R 33015 NPC 4S 91.

Réf n°6 : Glissement de la promenade Saint Martin, solutions de confortement de la promenade au niveau des Abreuvoirs de la Reine, rapport BRGM 889 SGN 519 NPC, Mai 1989.

Réf n°7 : ITC Journal, (1988) Special ILWIS issue. International Institute for Aerospace Survey and Earthsciences, 7500 AA Enschede, the Netherlands.

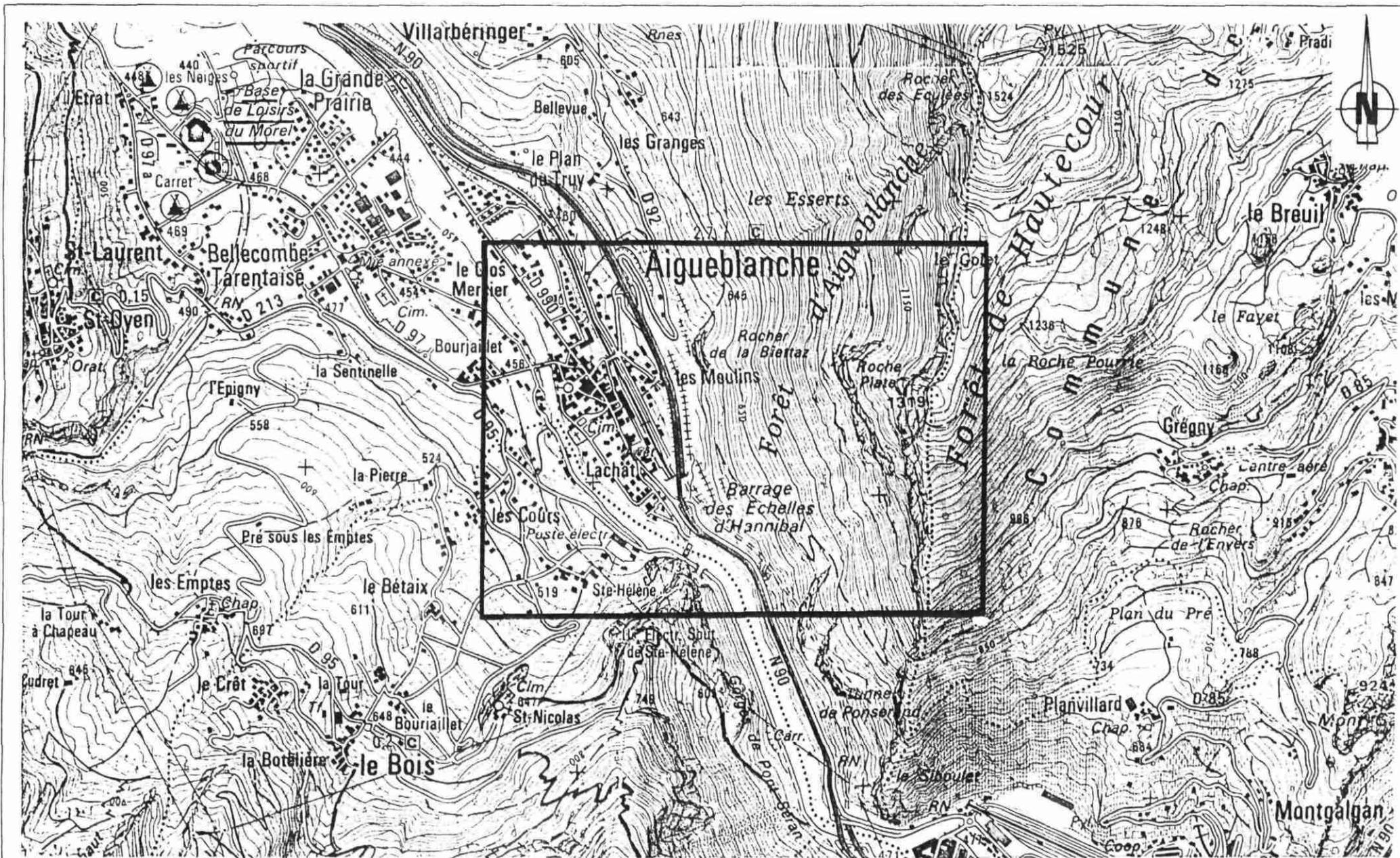
Réf n°8 : Asté J.P, Barfety J.Cl.(1978) - L'écroulement des falaises d'Aigueblanche en Savoie . Rapport BRGM

Réf n°9 : Einstein H.H. (1988) - Special lecture : Landslide risk assessment procedure - International symposium on landslides, Lausanne, vol. 2, pp 1075-1090

ANNEXES

ANNEXE 1

AIGUEBLANCHE





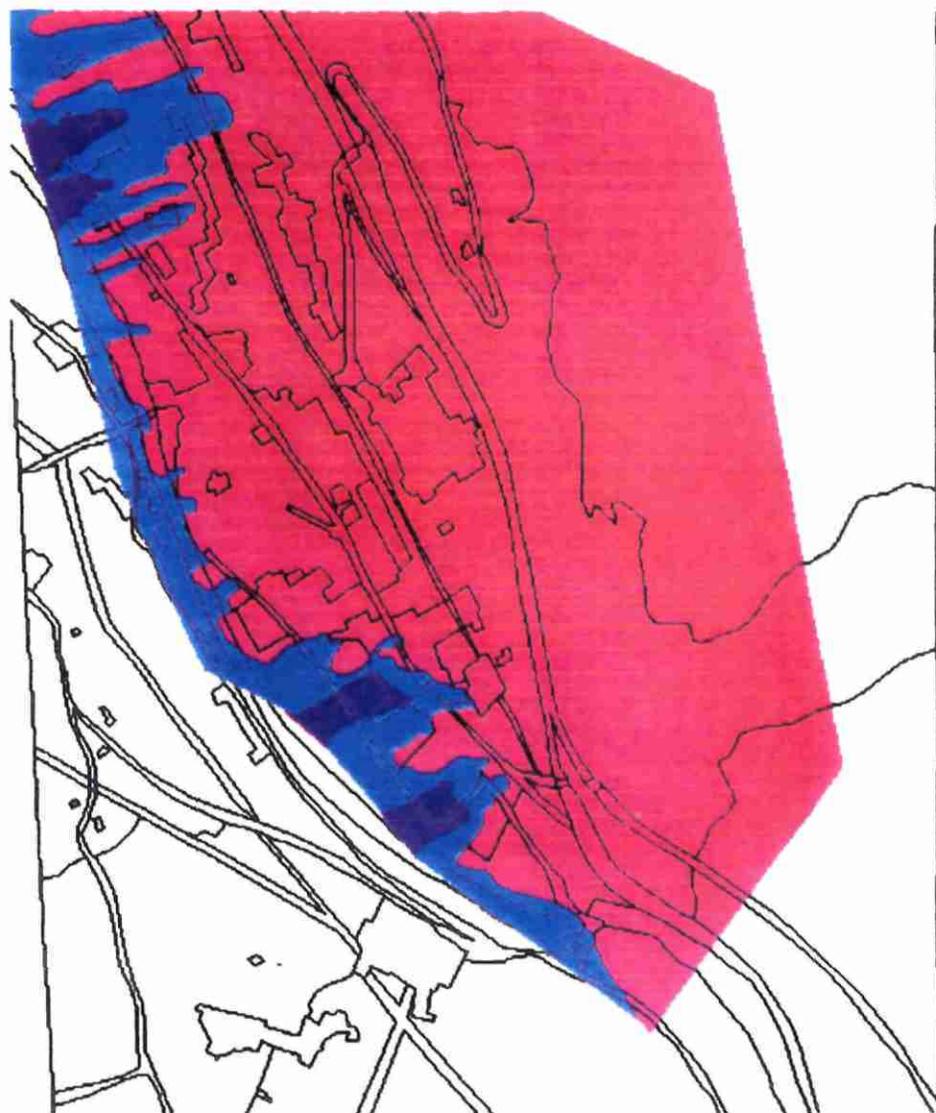
Commune d'AIGUEBLANCHE (Savoie)

1. Carte fictive de l'aléa chutes de blocs:

-  zone de blocs rebondissant avec une capacité de destruction majeure
-  zone de blocs roulant avec une capacité de destruction variable

0 70 140 m





2. Carte fictive des niveaux de protection aux chutes de blocs:

-  Protection impossible (aucun niveau de protection existant ou protections inefficaces)
-  Protection faible (un seul niveau de protection)
-  Protection moyenne (deux niveaux de protection)

0 70 140 m



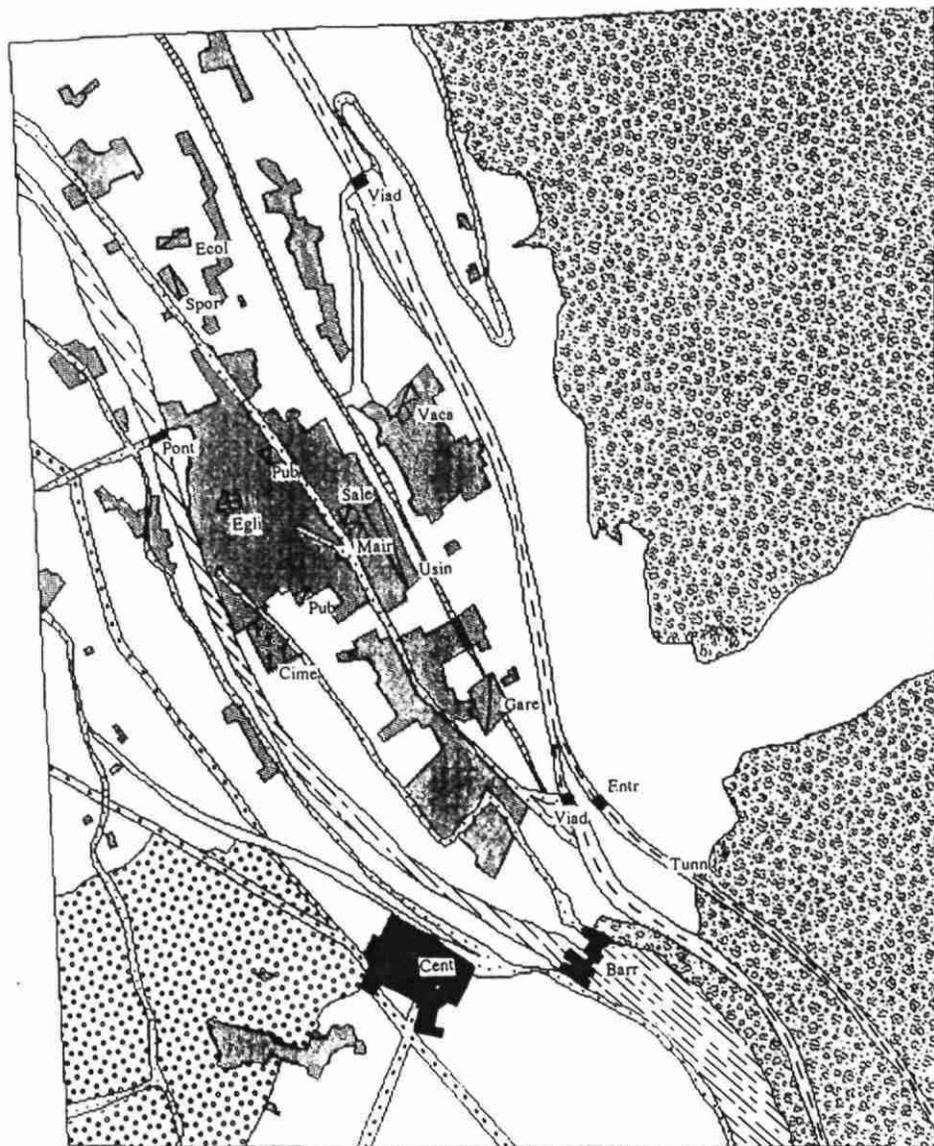


3. Carte fictive des potentialités d'endommagement absolues liées aux chutes de blocs:



0 70 140 m





4. Carte de classification des éléments exposés aux chutes de blocs:

Voies de communication et infrastructures associées:

-  chemin départemental
-  route nationale
-  ligne ferroviaire
- Entr: entrée du tunnel
- Tunn: tunnel
- Viad: viaduc
- Pont

-  Bâtiments d'habitat
-  Bâtiments publics, culturels, religieux, sportifs et industriels:
 - Mair: mairie ; Sale: salle des fêtes
 - Egli: église; Cime: cimetière
 - Garc: gare ferroviaire; Ecol école
 - Pub: autre bâtiment public; Vaca: centre de vacances
 - Spor: terrain de sport; Usin: usine

Ouvrages de production d'énergie:

- Barr: barrage
- Cent: centrale électrique
-  ligne électrique aérienne

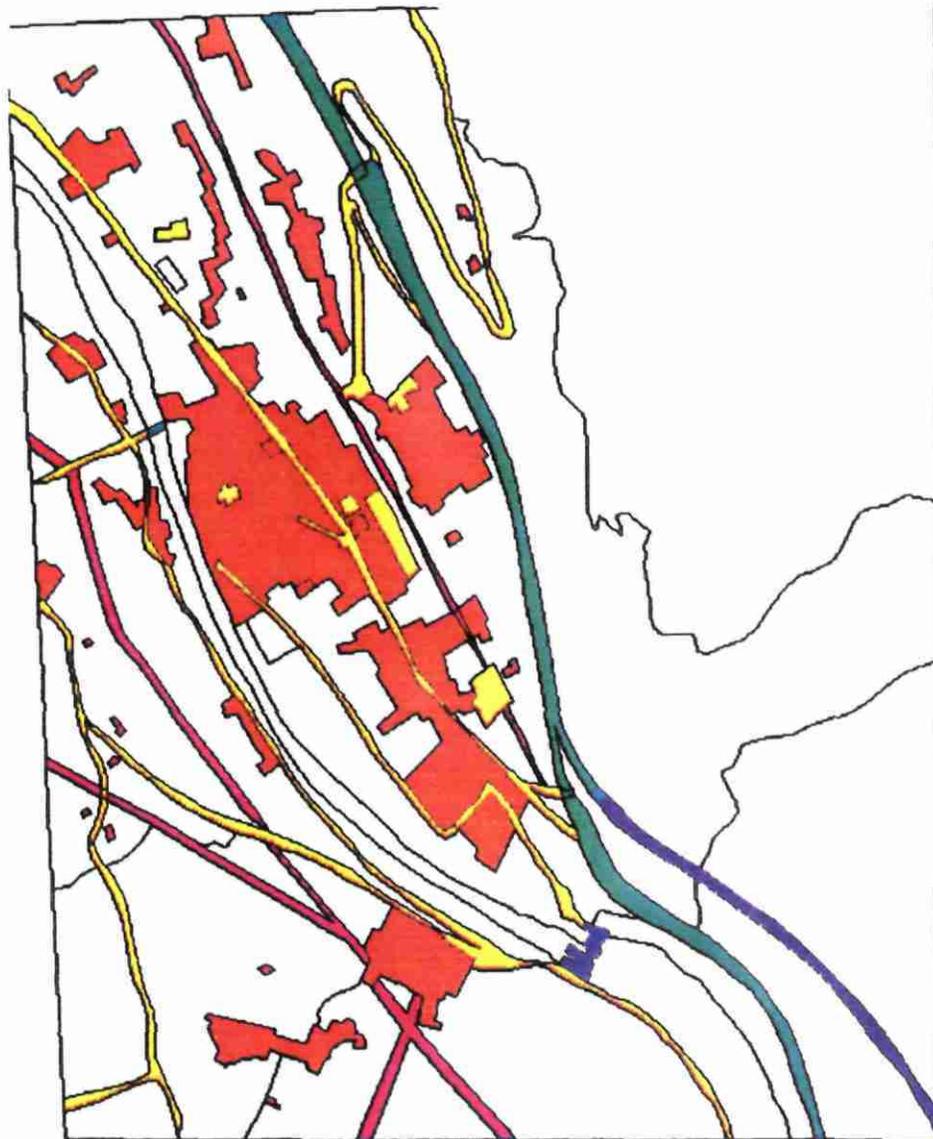
Milieu naturel

-  vignobles
-  forêt
-  cours d'eau
-  retenue d'eau

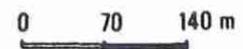
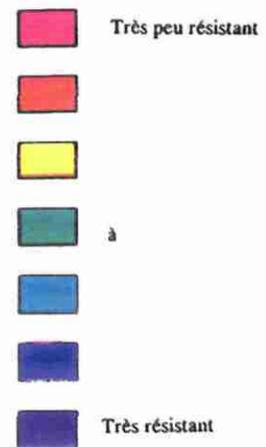
-  Zones inoccupées

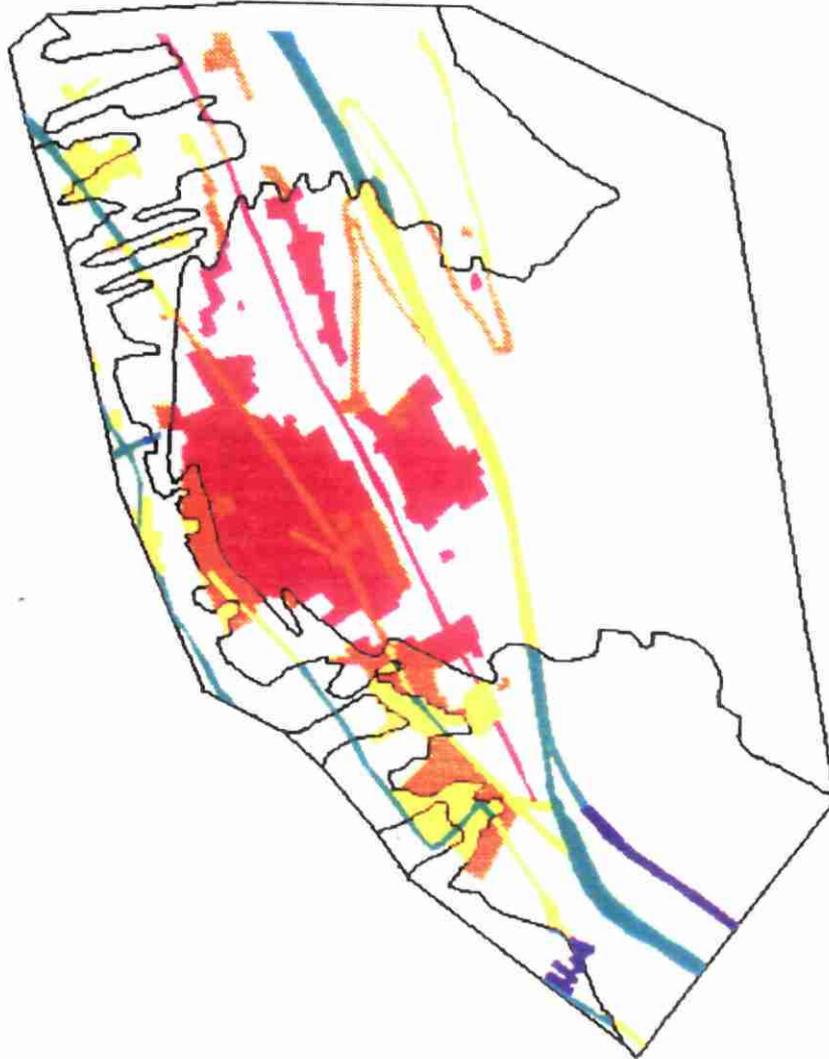
0 70 140 m



5. Carte fictive de résistance des biens aux impacts de blocs:



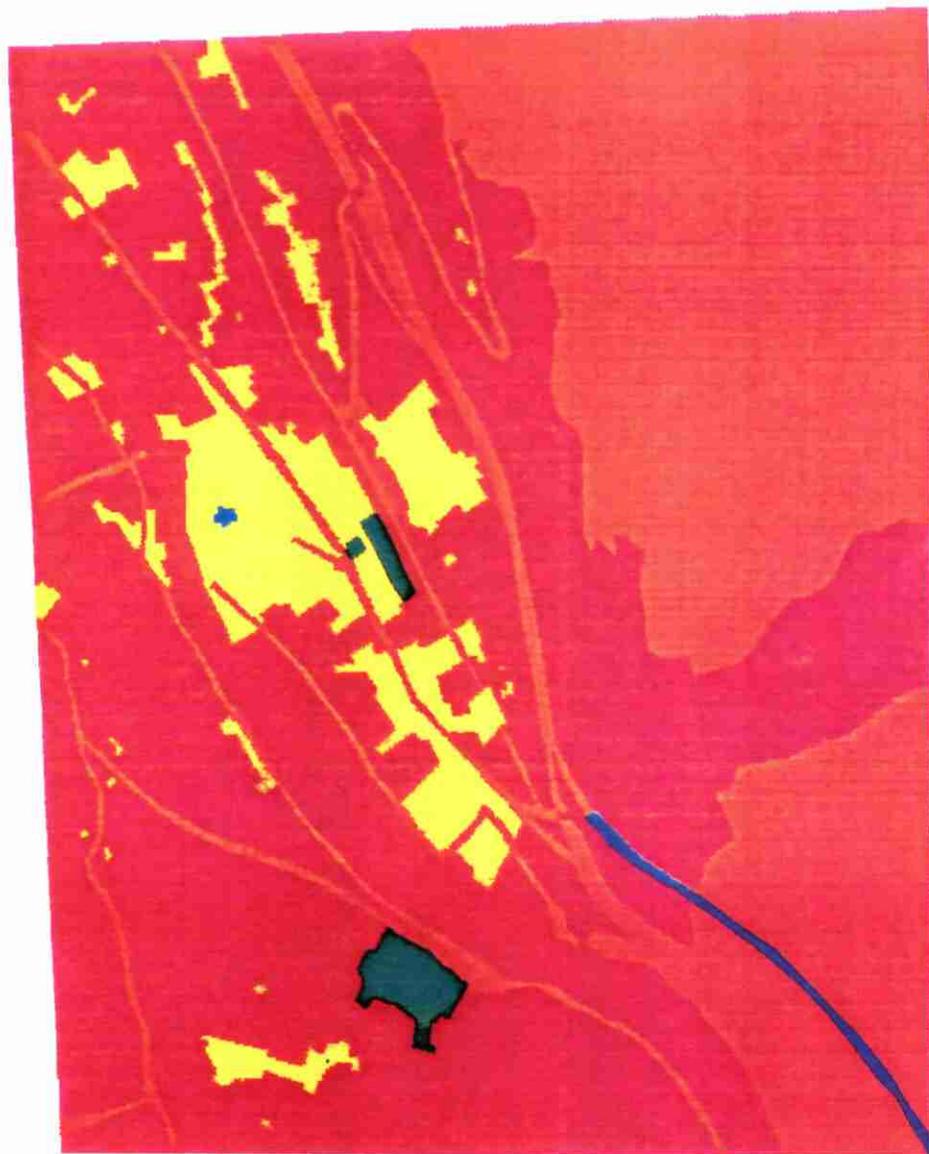


6. Carte fictive de la vulnérabilité matérielle des biens existants
aux chutes de blocs:

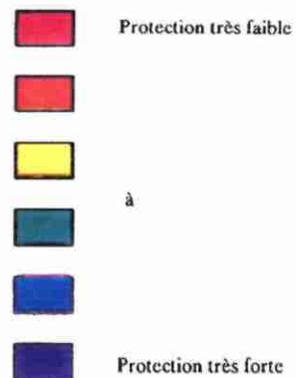


0 70 140 m



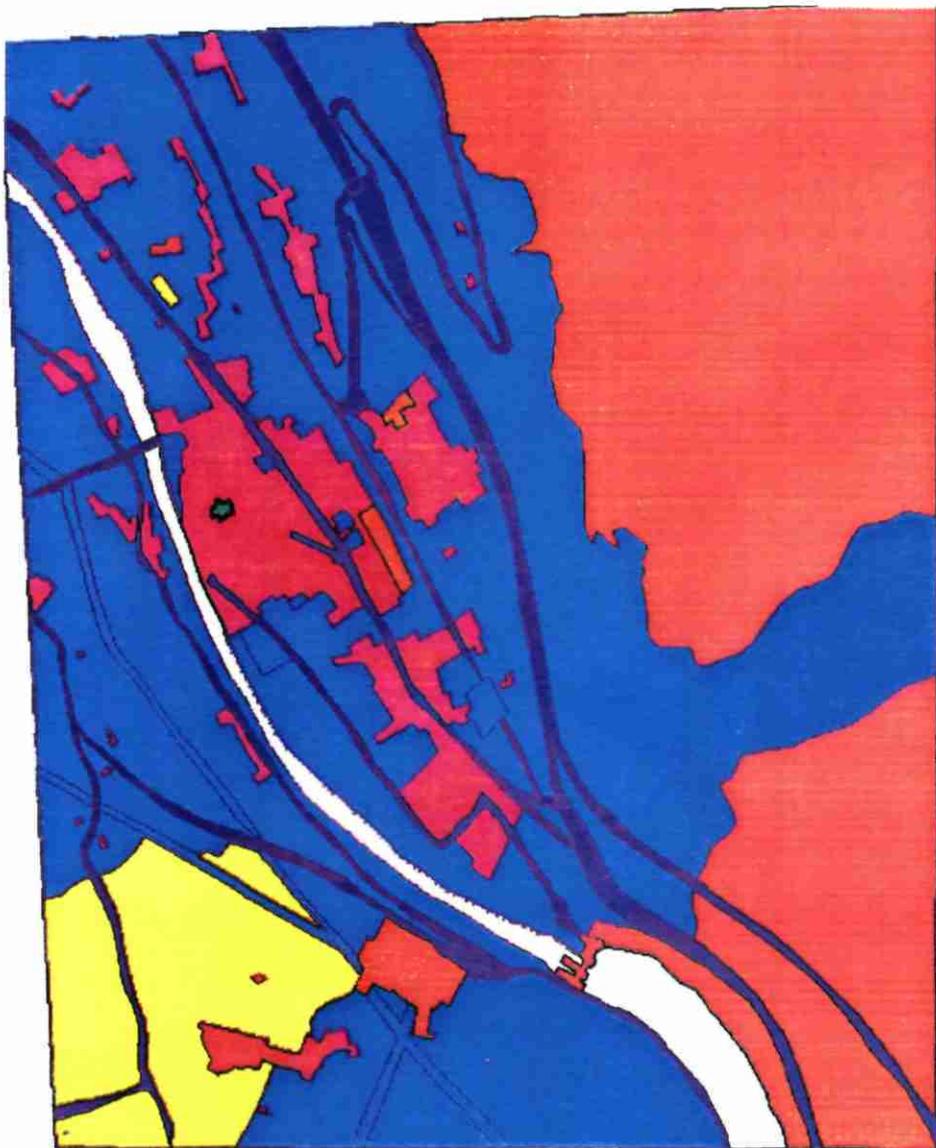


7. Carte fictive du niveau de protection des personnes apporté par les structures:

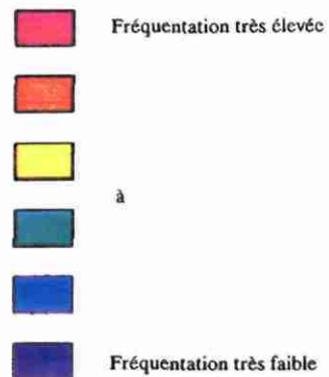


0 70 140 m



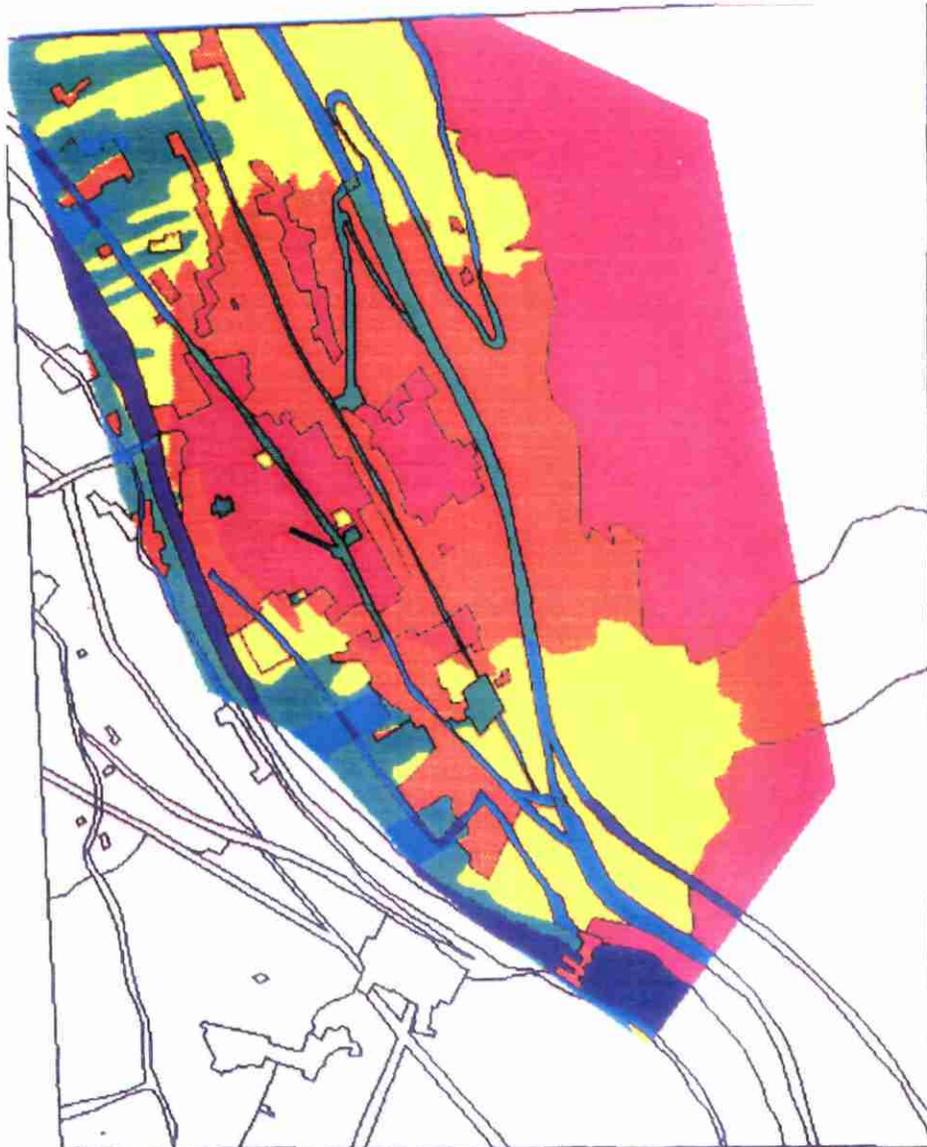


8. Carte fictive du taux de fréquentation humaine par jour:

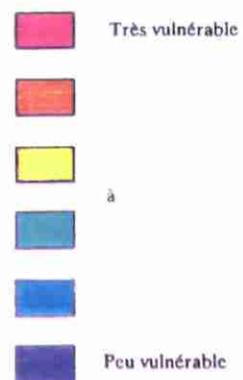


0 70 140 m





9. Carte fictive de la vulnérabilité humaine

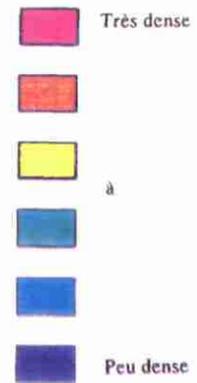


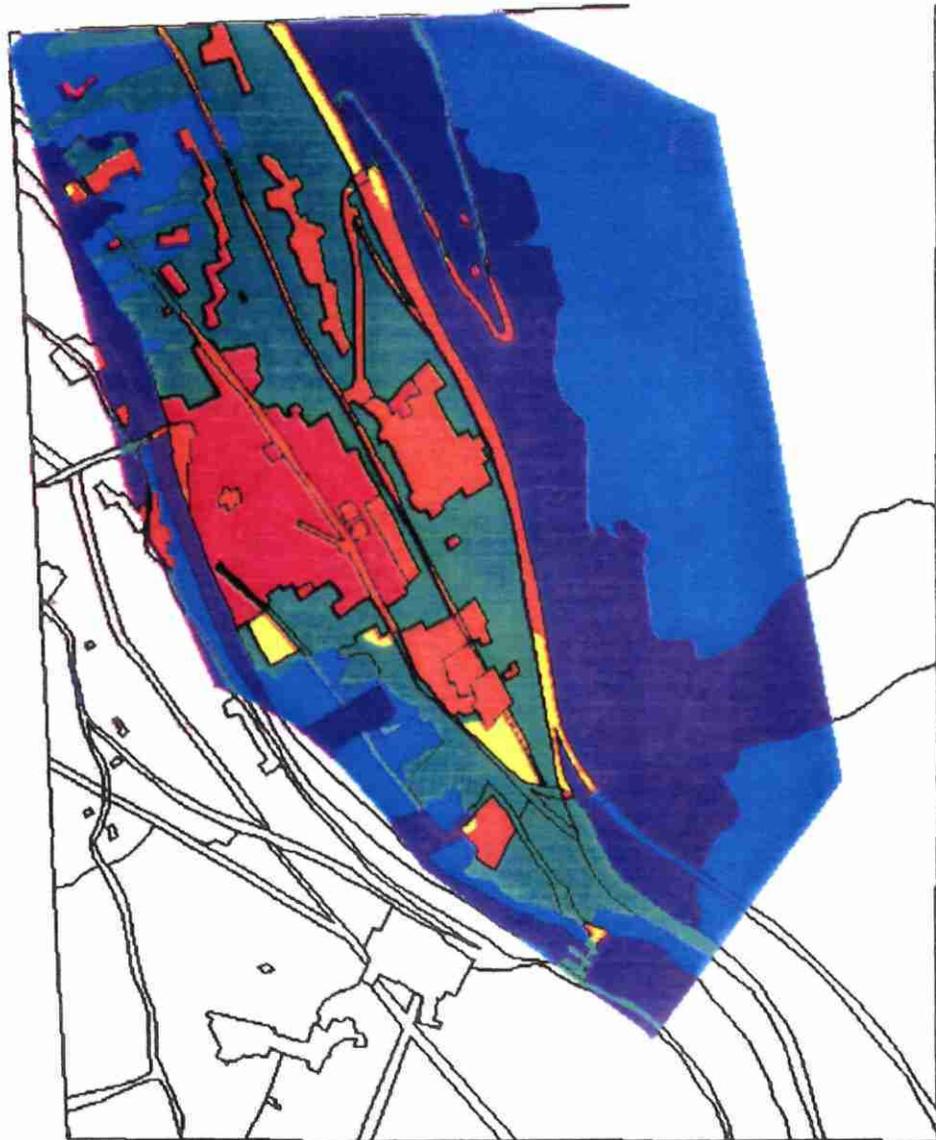
0 70 140 m



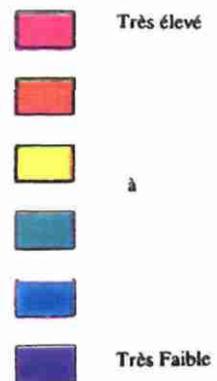


10. Carte fictive de la densité de population:



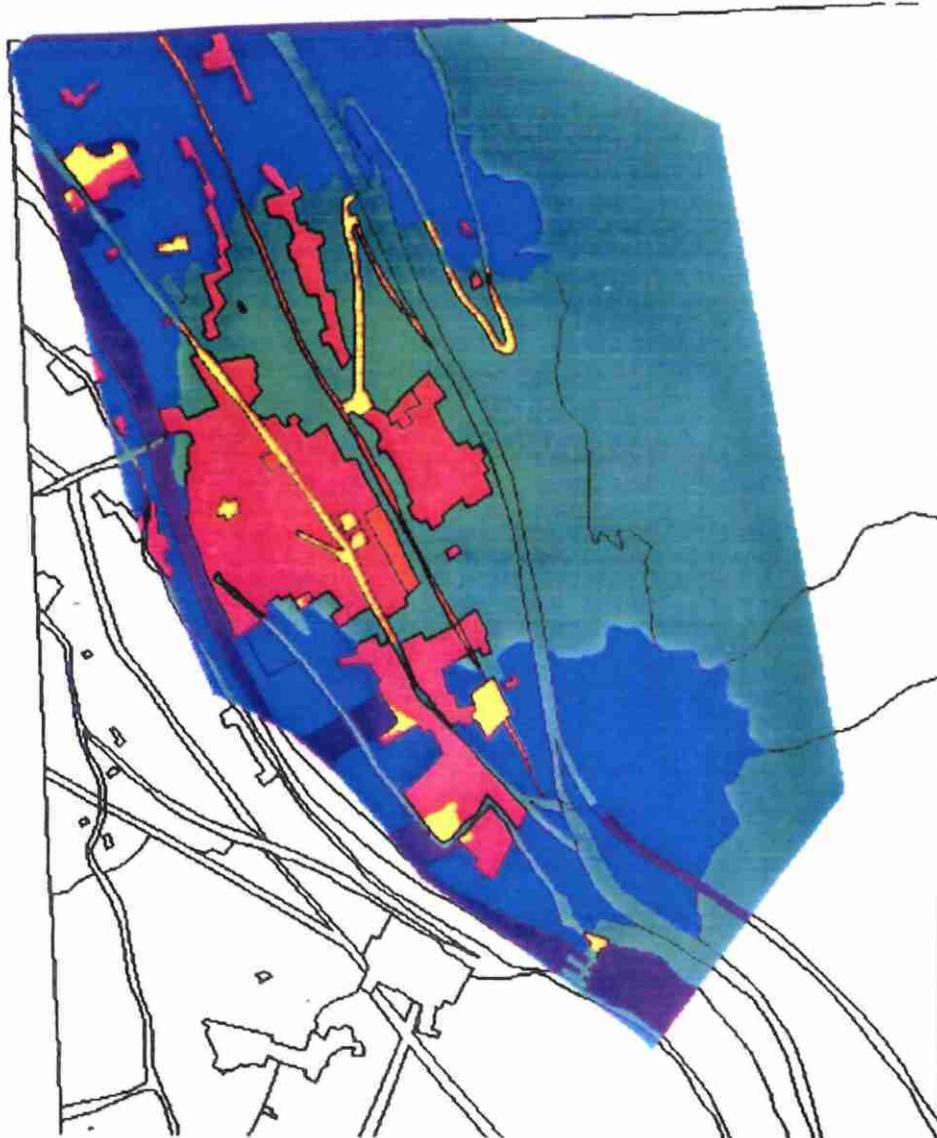


11. Carte fictive des préjudices humains en nombre de victimes potentielles (enjeux humains):

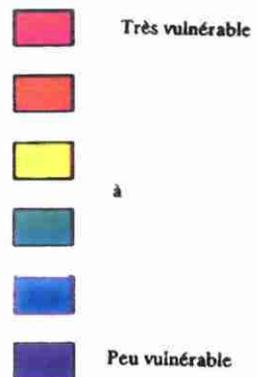


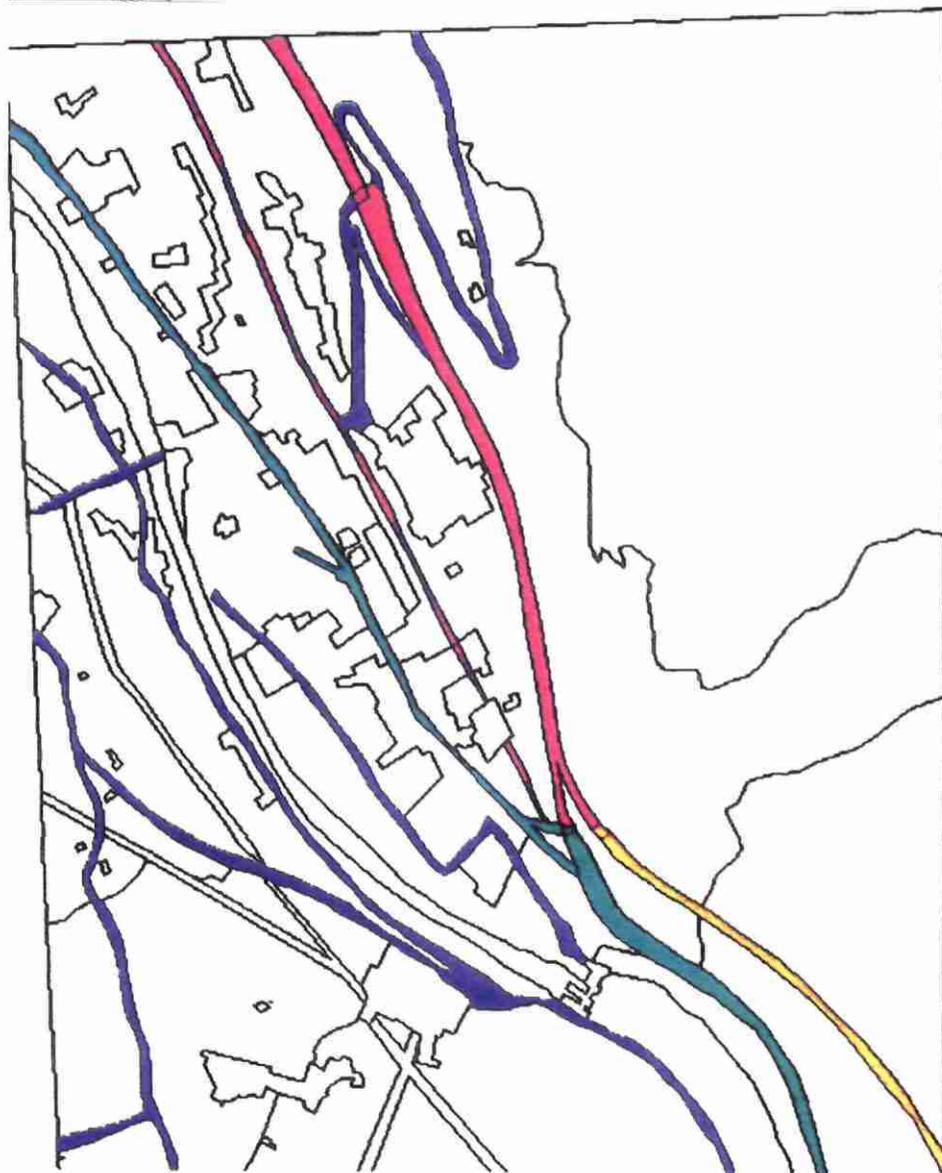
0 70 140 m





12. Carte fictive de la vulnérabilité globale





13. Carte fictive de la vulnérabilité de l'activité transport-communication.

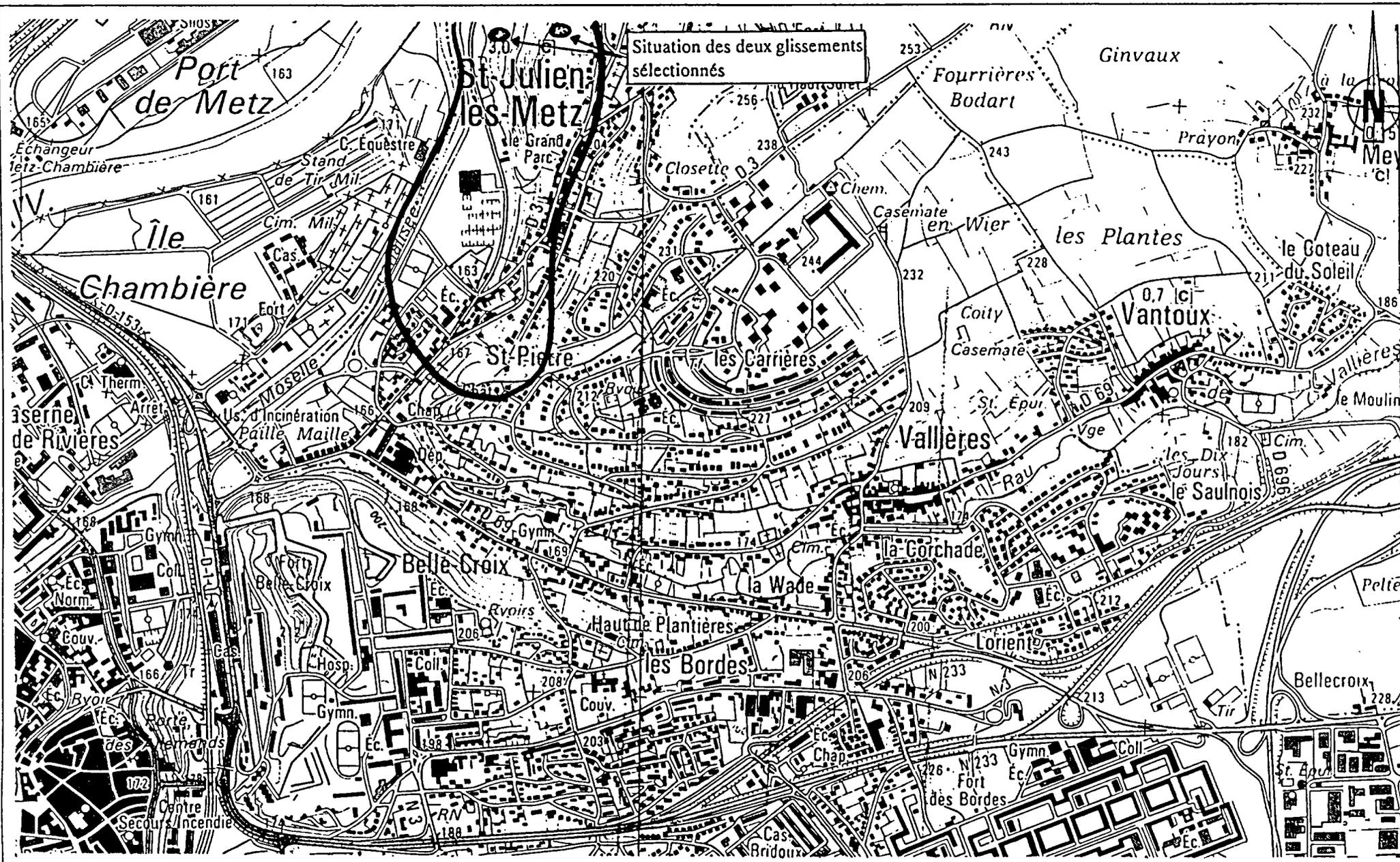


0 70 140 m

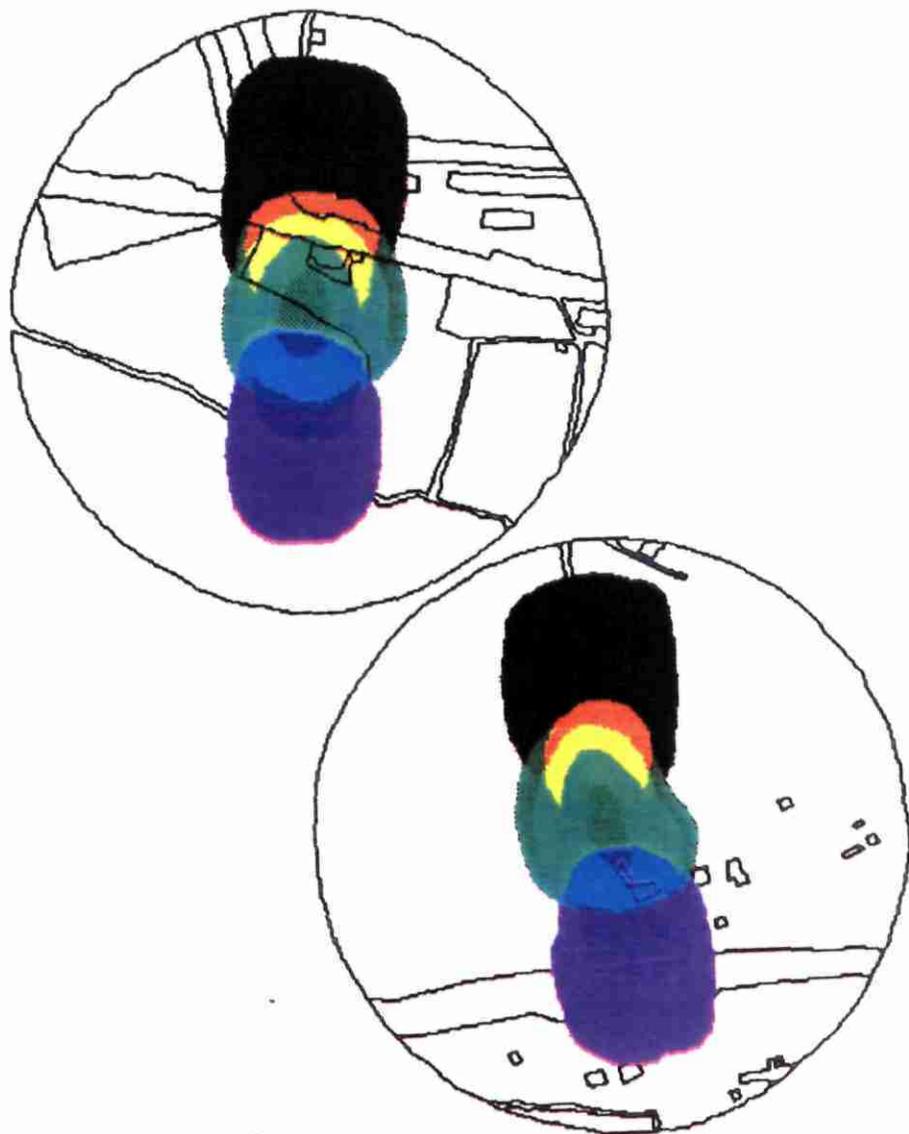


ANNEXE 2

SAINT JULIEN LES METZ



Saint Julien les Metz - Carte des différents modes et intensités d'endommagement associés à deux glissements.



- af1**
- def1 - af2**
- def1 - af1**
- def2 - af1**
- def2 - af2**
- def2 - af3**
- def2**
- def1**
- def1 - re2**
- def1 - re1**
- def2 - re2**
- def2 - re1**
- re2**
- re1**

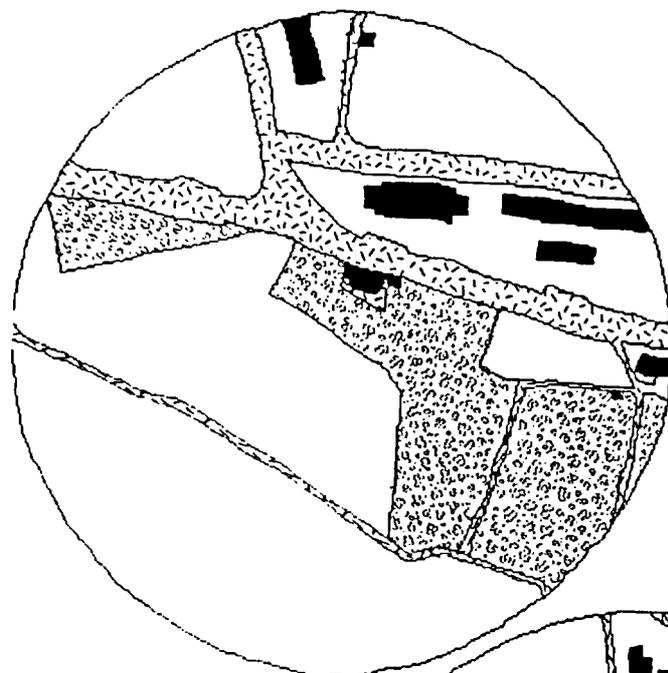
Modes d'endommagement:

Af: affaissement
Def: déformation
Re: recouvrement

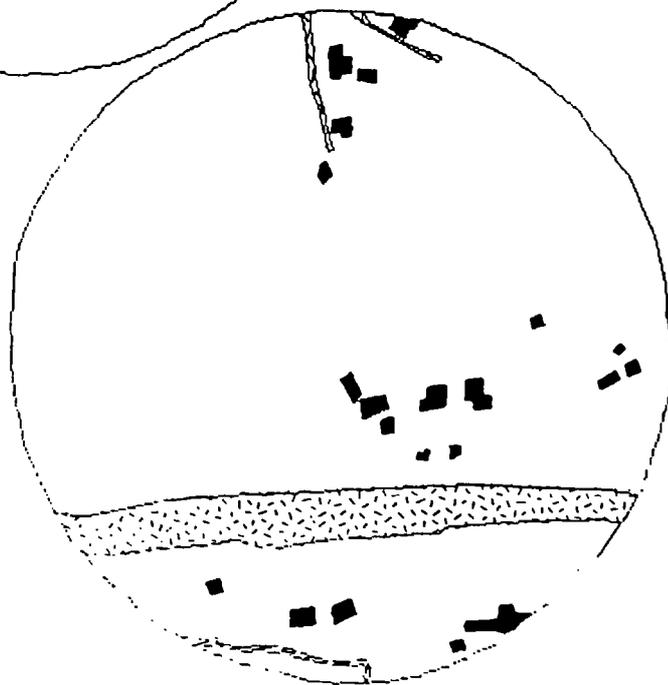
Intensités des modes d'endommagement:

3: Forte
 2: Moyenne
 1: Faible

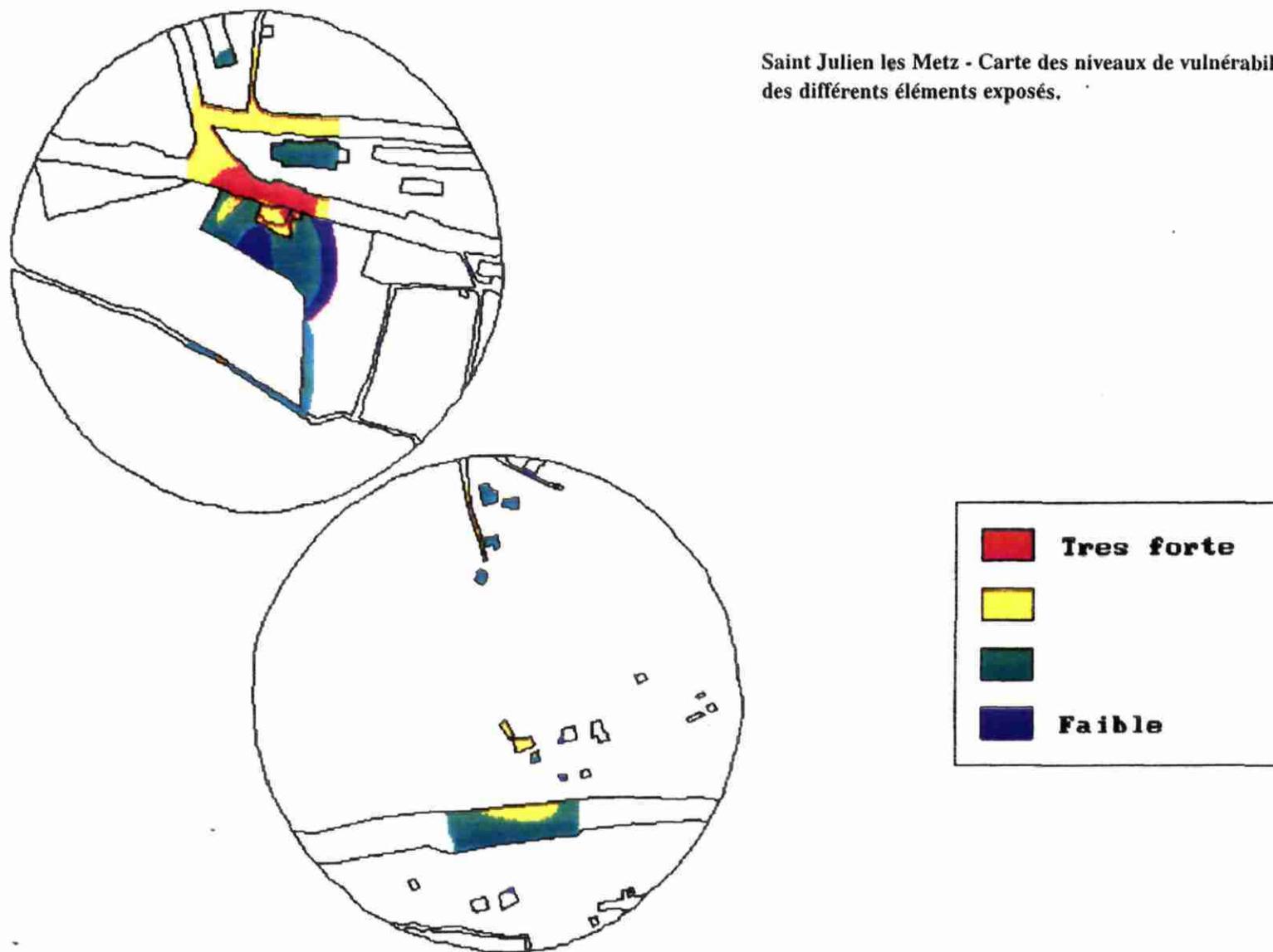
Saint Julien les Metz - Classification des éléments exposés



-  Bâtiments
-  Zones de cultures, bois
-  Routes
-  Zones inoccupées

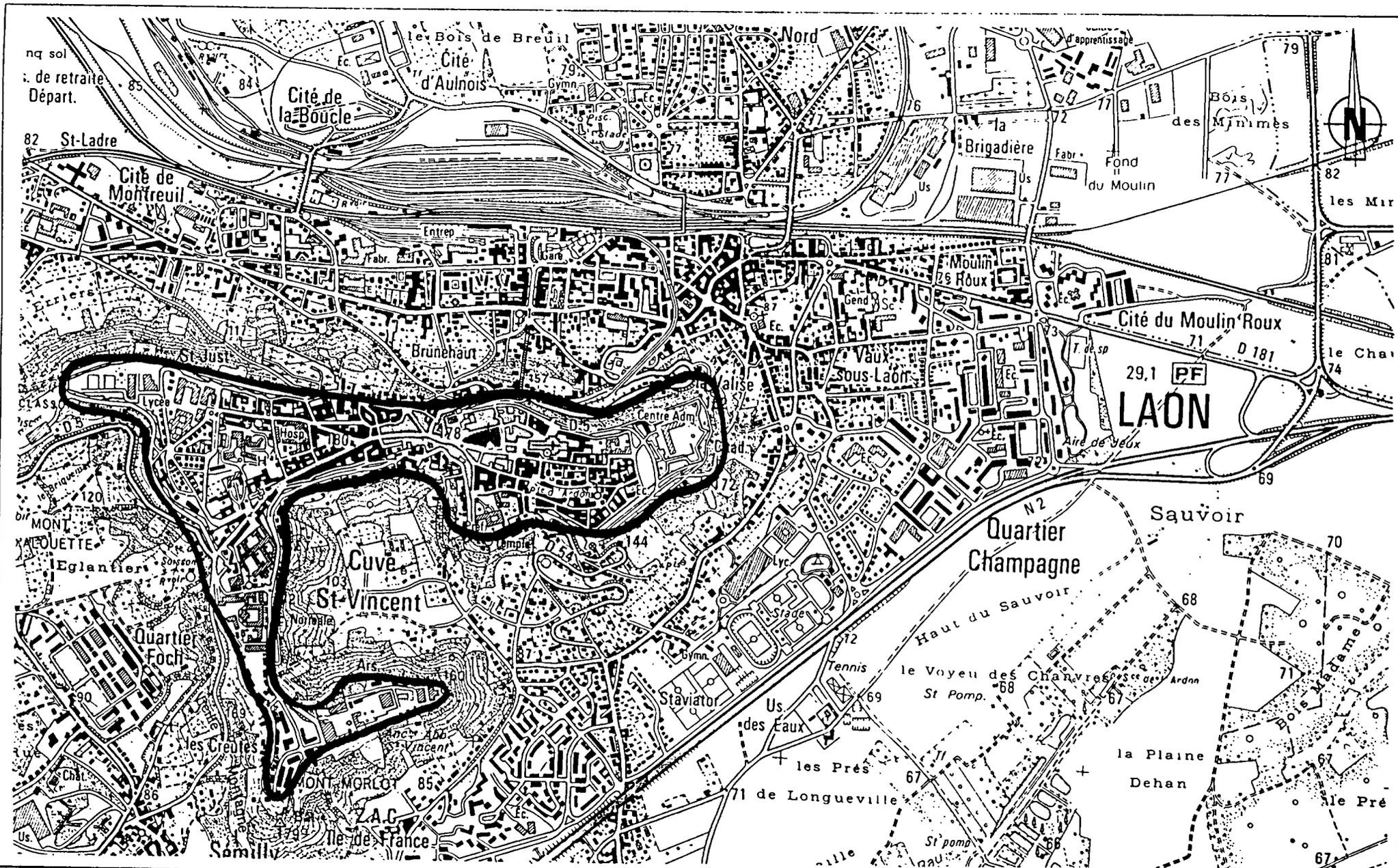


Saint Julien les Metz - Carte des niveaux de vulnérabilité matérielle
des différents éléments exposés.



ANNEXE 3

LAON

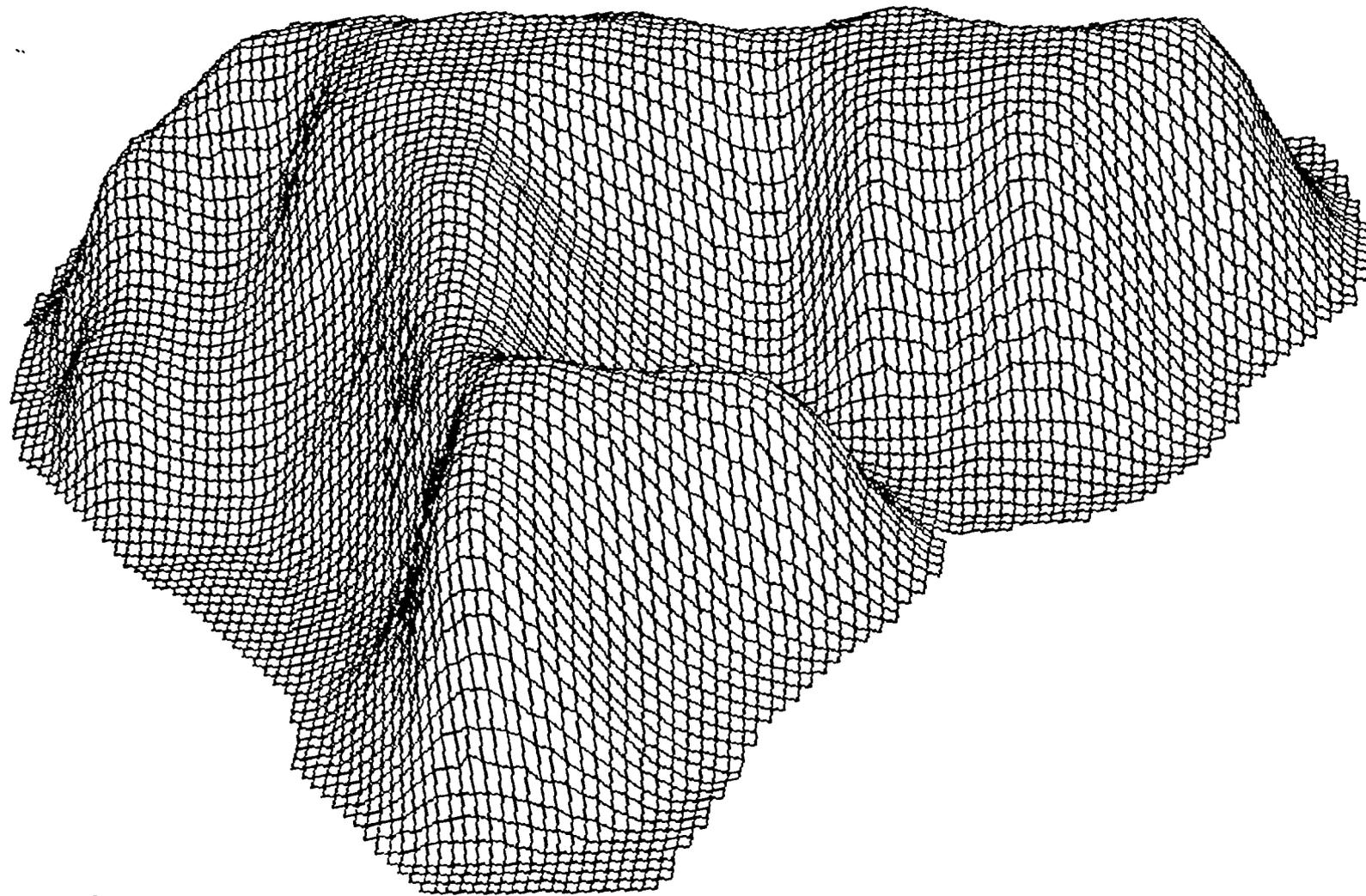


Rapport BRGM R 36866
GEO/SGN/RNG 93

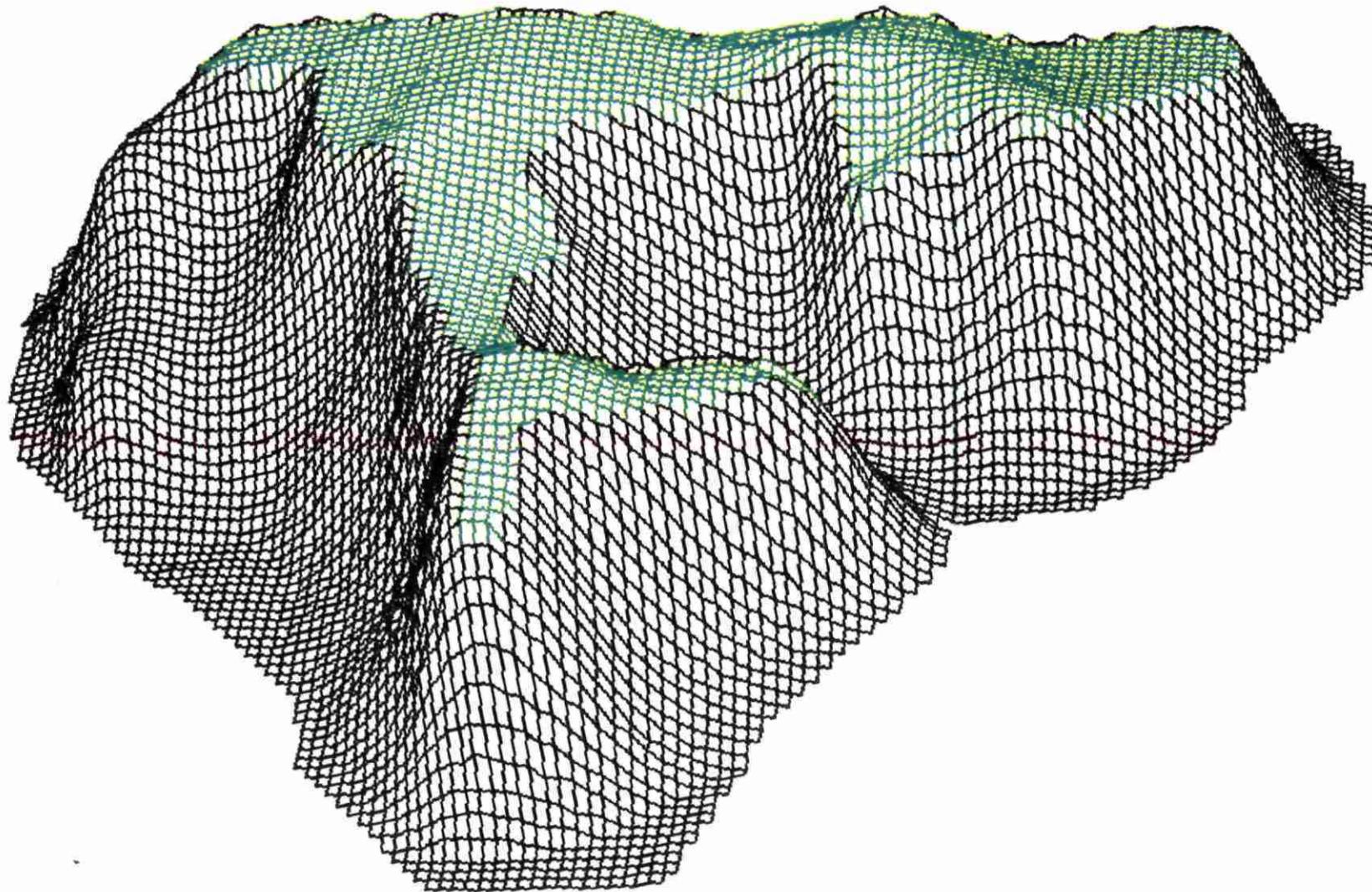
Localisation de la zone d'étude de LAON (d'après carte IGN 1/25000e)

Annexe 3, fig.1bis

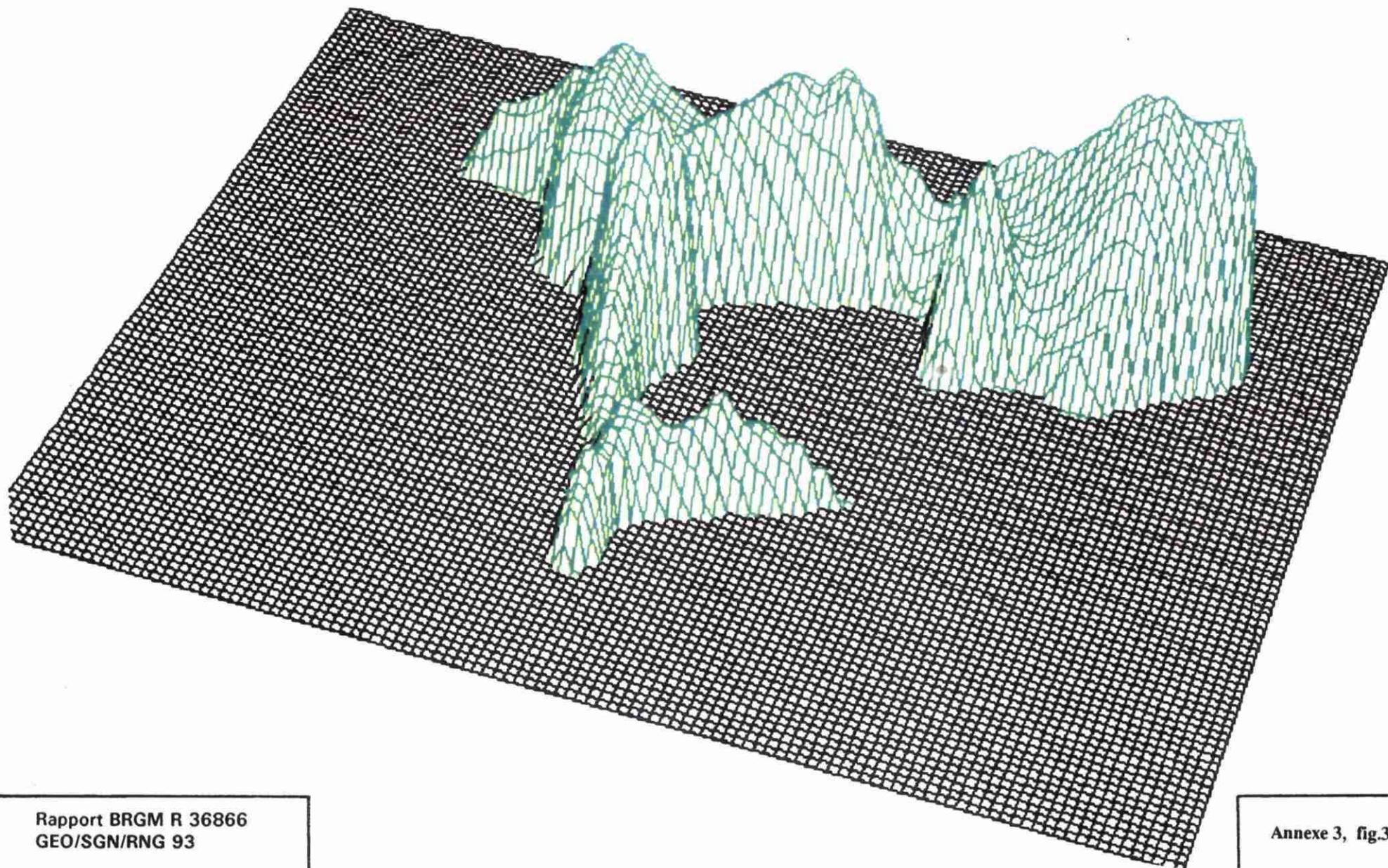
LAON - Représentation 3D de la morphologie.



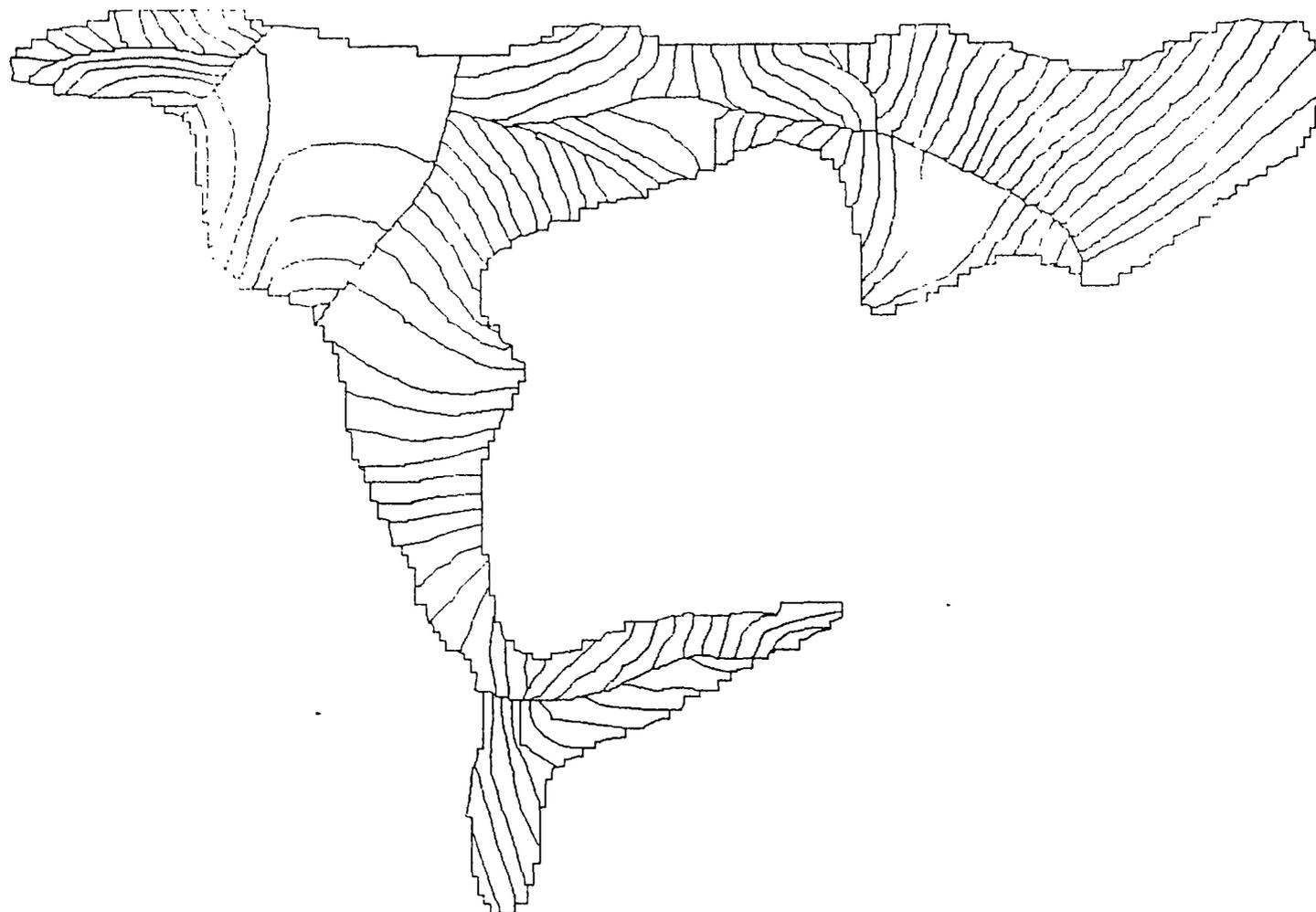
LAON - Représentation 3D de la morphologie après ablation de la couche calcaire.



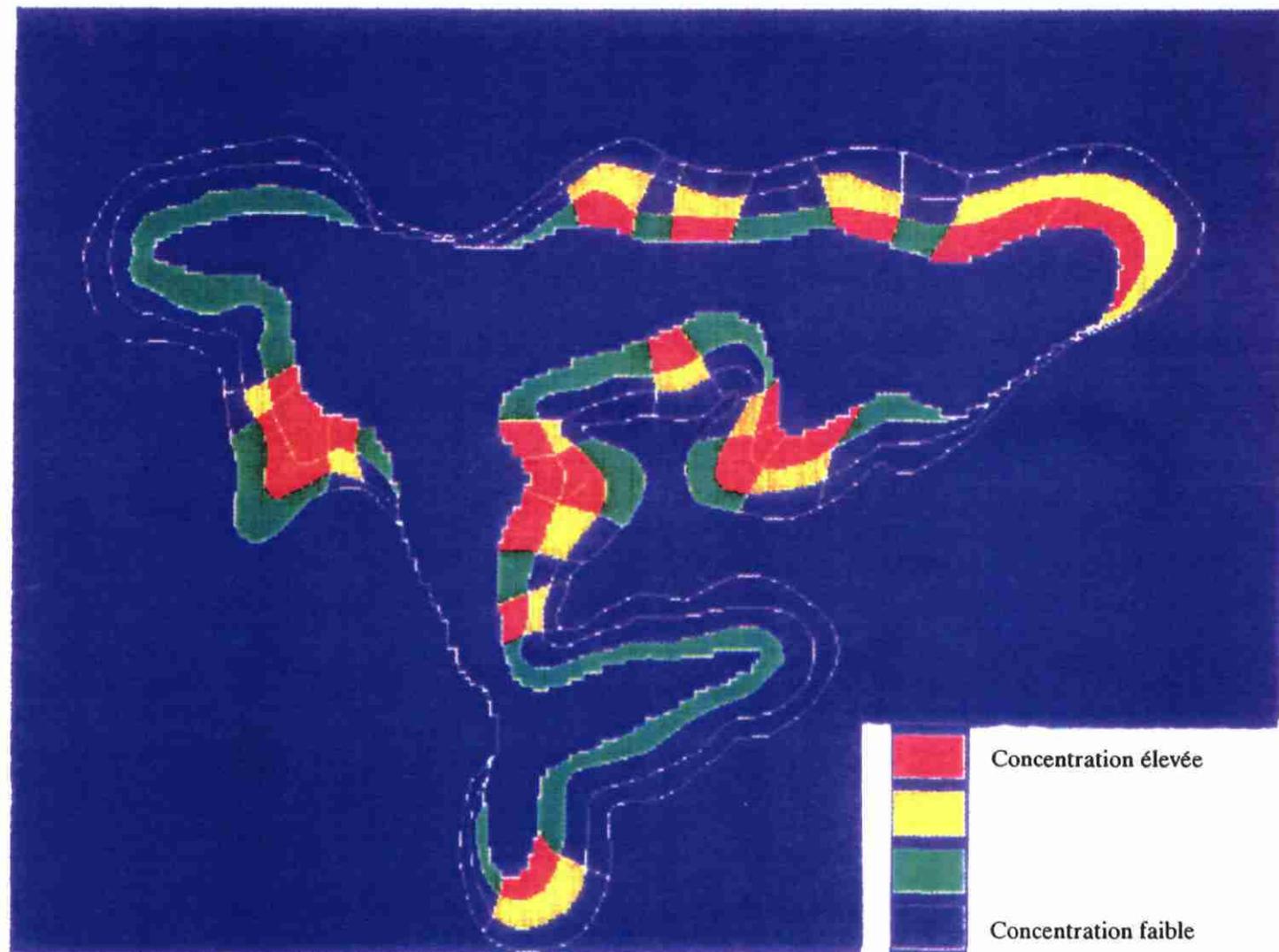
LAON - Représentation 3D de l'épaisseur de la couche calcaire.

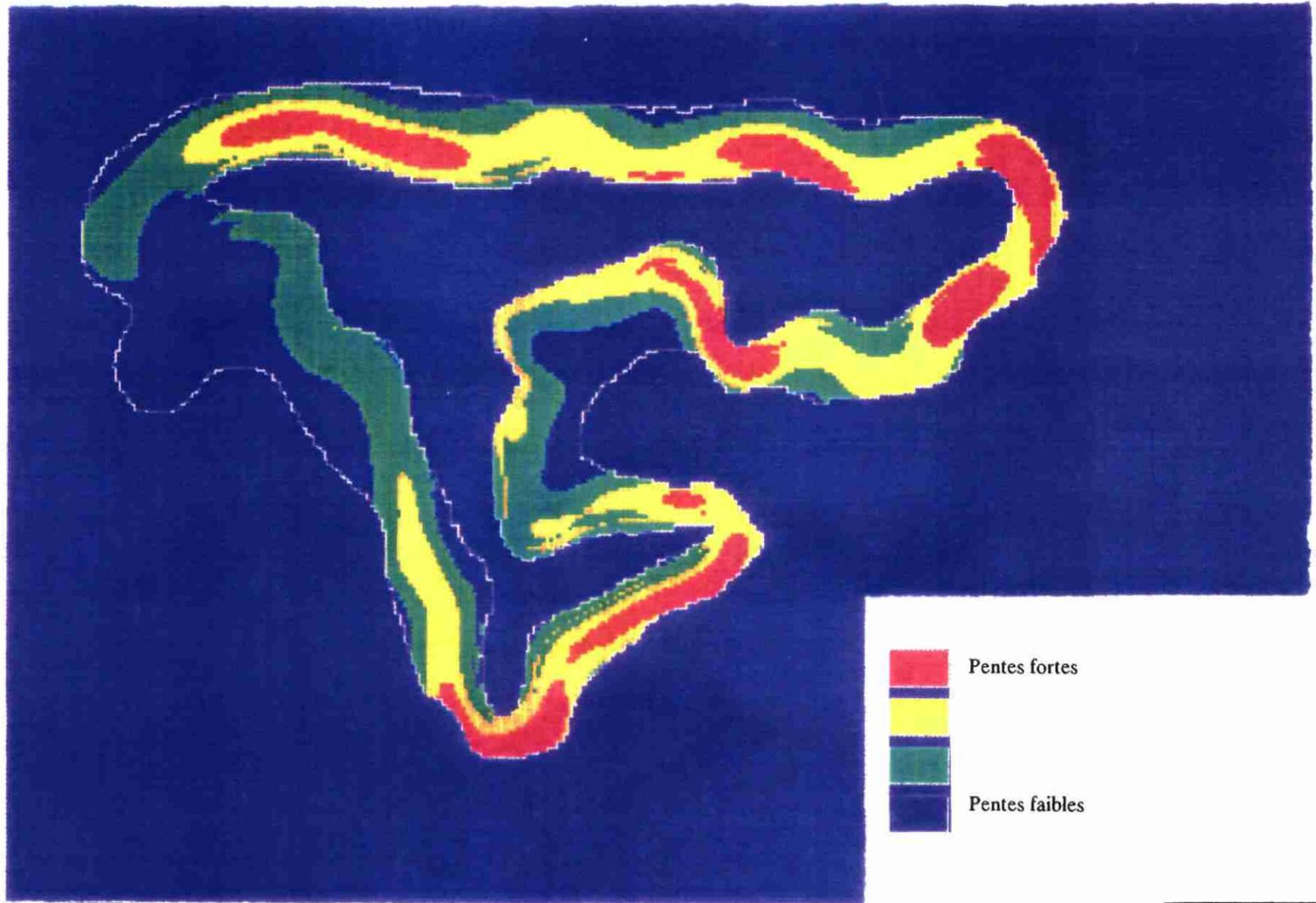


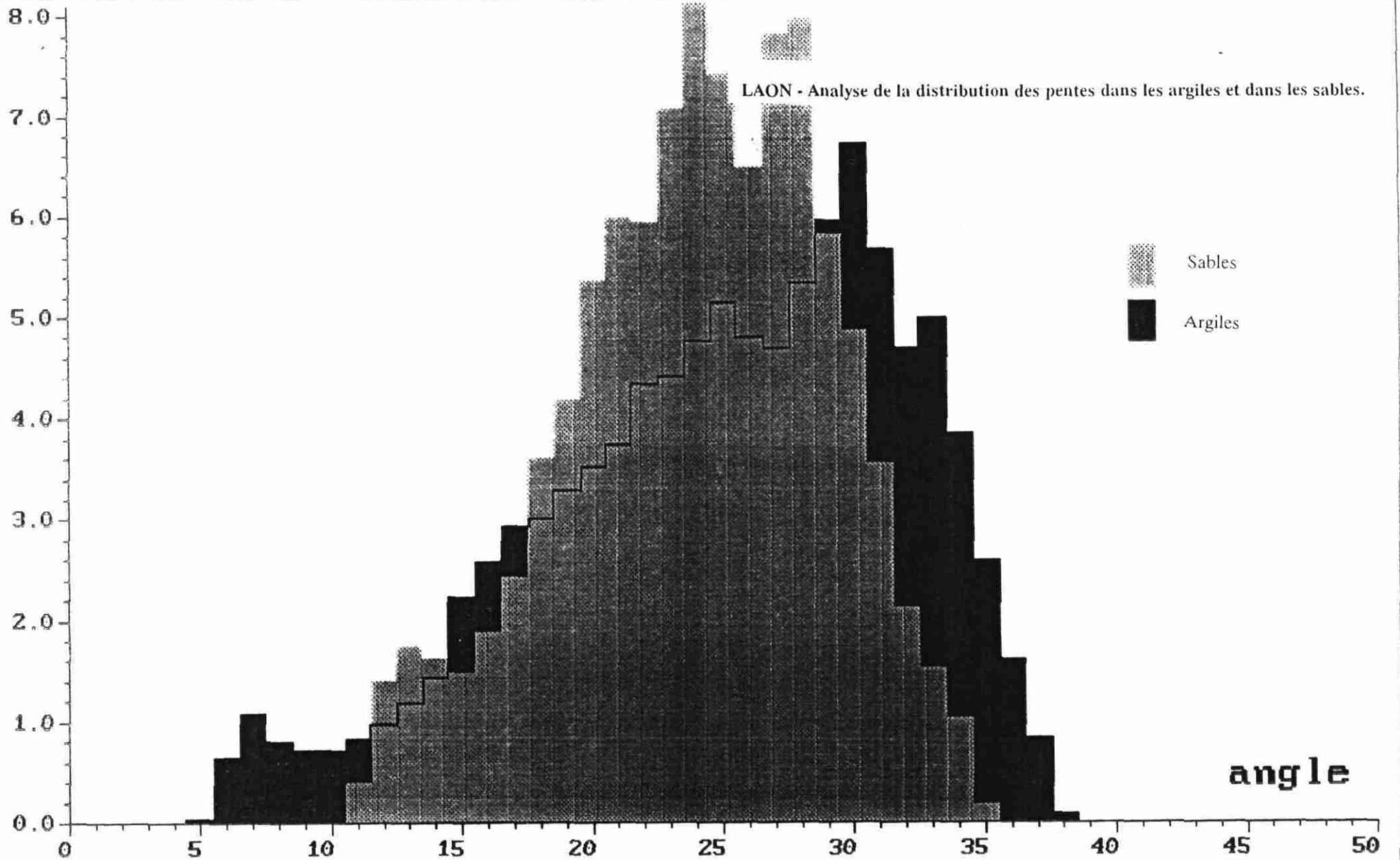
LAON - Topographie du mur des formations calcaires.



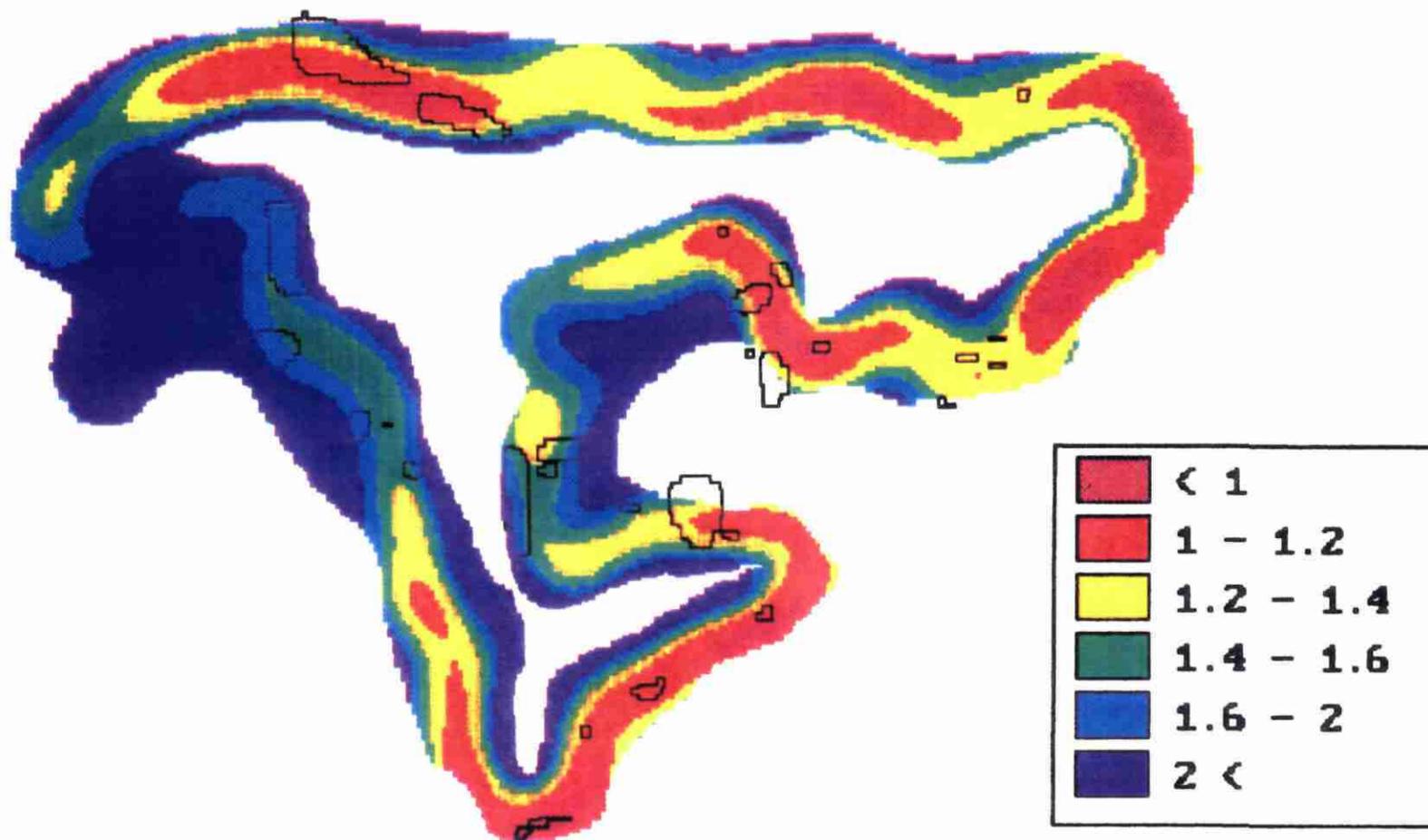
LAON - Concentration des eaux souterraines à la base des calcaires.



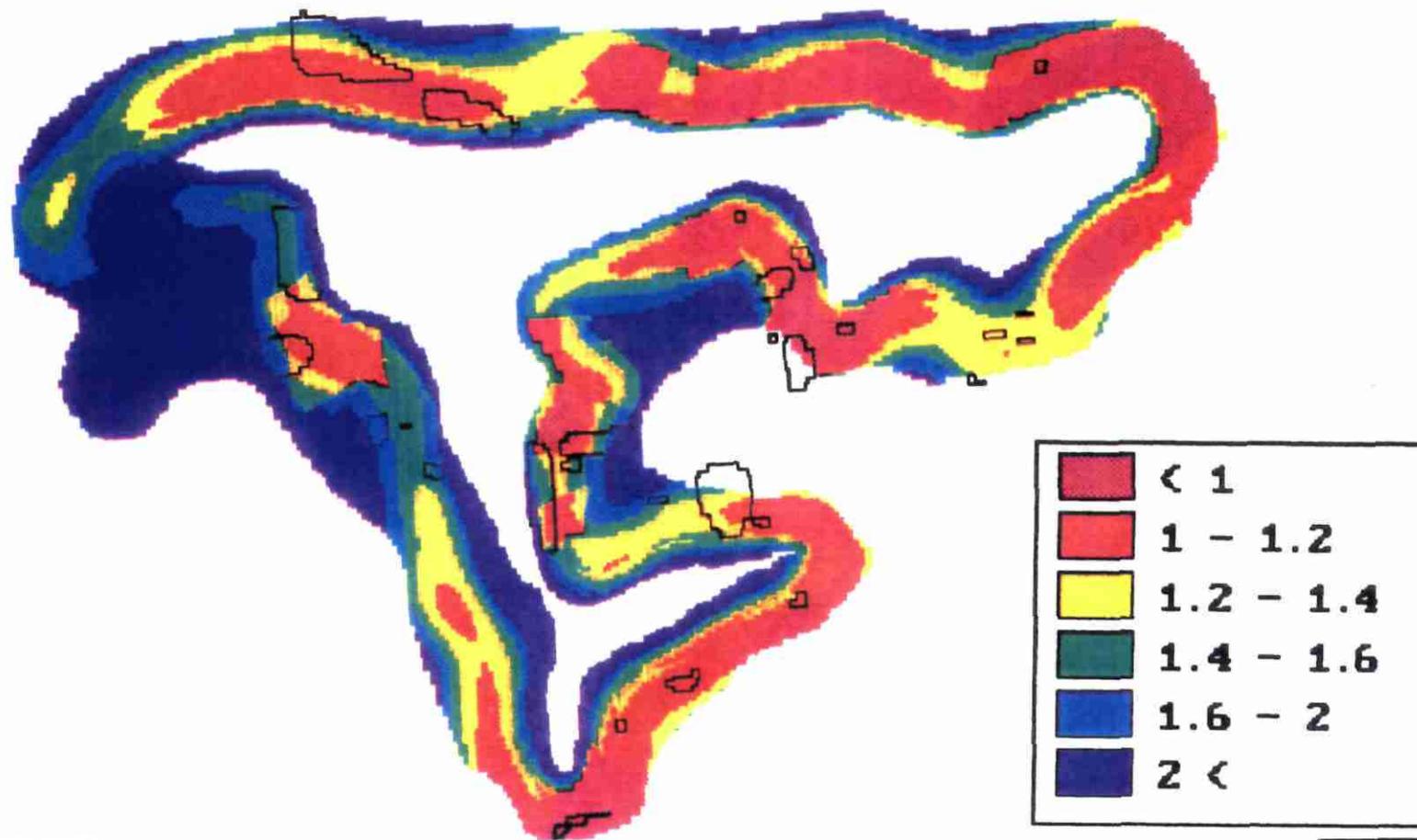




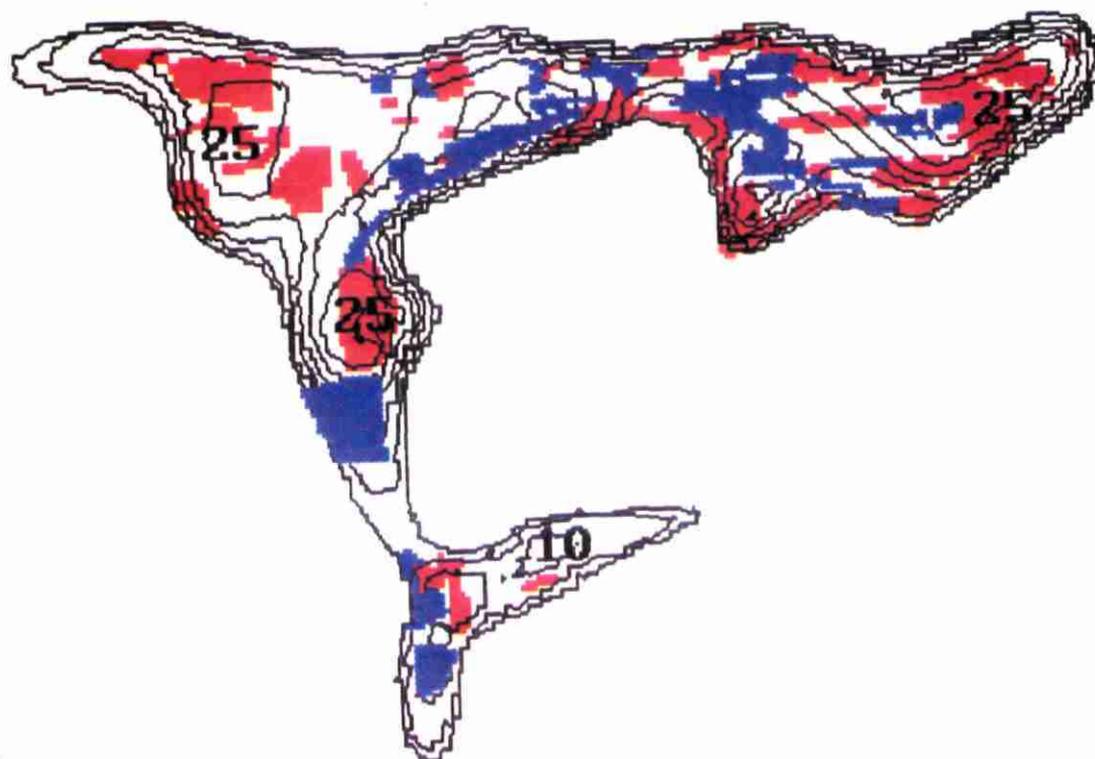
LAON - Facteur de sécurité au glissement sans tenir compte de la concentration en eaux souterraines.



LAON - Facteur de sécurité au glissement en tenant compte de la concentration en eaux souterraines.



LAON - Situation des zones de cavités connues (en rouge) ou probables (en bleu) par rapport aux courbes d'iso-épaisseur de la barre calcaire.



LAON - Situation des deux coupes transversales à travers la barre calcaire.

