



# **Scénarios risque mouvements de terrain (y compris effondrement de cavités) dans les agglomérations urbaines : développement méthodologique**

**Avenant n°1/2006 de la convention n°CV0500195**

**Rapport final**

**BRGM/RP-56243-FR**

**Mars 2008**



# Scénarios risque mouvements de terrain (y compris effondrement de cavités) dans les agglomérations urbaines : développement méthodologique

Avenant n°1/2006 de la convention n°CV0500195

Rapport final

**BRGM/RP-56243-FR**

Mars 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2006 PSP06ARN05

**P. Thierry, F. Rivet et E. Vanoudheusden**

## Vérificateur :

Nom : Winter Thierry

Date :

Signature :

## Approbateur :

Nom : Modaressi Hormoz

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



**Mots clés :** Scénario de risque, mouvements de terrain, méthodologie, risques urbains

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Thierry P., Rivet F. et Vanoudheusden E. (2008) Scénarios risque mouvements de terrain (y compris effondrement de cavités) dans les agglomérations urbaines : développement méthodologique – Rapport final Rapport BRGM RP-56243-FR, 78 pp., 16 Illustrations, 24 tableaux, 1 annexe

## Synthèse

Le présent document vise à présenter une méthode générique d'évaluation des risques liés aux mouvements de terrain sur les agglomérations urbaines. Cette méthode doit permettre de chiffrer les dommages potentiels dans les zones à forts enjeux que représentent les villes et ainsi de pouvoir hiérarchiser leurs niveaux de risque respectifs.

Il s'agit d'évaluer les effets provoqués par les phénomènes suivants :

- glissements, fluages et solifluxions ;
- chutes de pierres, de blocs et éboulements ;
- coulées de boues ;
- effondrement de cavités souterraines (hors mines).

Cinq catégories d'enjeux sont prises en compte dans le cadre de la méthode : la population, les bâtiments, la voirie, les espaces naturels et le mobilier urbain (véhicules). D'autres catégories d'enjeux (réseaux, activité économique, etc.) auraient été susceptibles d'être prises en compte. Toutefois, pour les catégories retenues, les données seront disponibles quelle que soit l'agglomération considérée, autorisant de ce fait l'application de la méthode dans tous les contextes. Dans le même objectif de reproductibilité et pour permettre une synthèse entre les endommagements de ces différents enjeux, l'analyse de l'impact financier est privilégiée. Les secteurs où des vies humaines sont en danger sont, cependant, spécifiquement, étudiés.

La précision cartographique d'une telle étude doit être compatible avec l'échelle du 1 / 25 000. La période de référence retenue pour l'évaluation des dommages cumulés est fixée à 100 ans.

Chacun des phénomènes naturels correspond à la combinaison de sollicitations physiques (impacts, poussées, déplacements,..) qui sont à la source des endommagements et peuvent être exprimées par une (ou plusieurs) valeur physique. Une échelle d'intensité physique en quatre classes (faible, moyenne, forte, très forte) est donc déterminée pour chacune de ces sollicitations, à partir des gammes de valeurs physiques possibles.

Au sein des différentes catégories d'enjeux, on définit quelques types caractéristiques qui vont réagir différemment aux sollicitations physiques. Toutefois, pour une même catégorie, les endommagements potentiels sont décrits au travers d'une échelle d'endommagement unique, applicable aux différents types et permettant la synthèse.

Dans l'application de la méthode, on dispose donc, à ce stade, d'une part d'échelles d'intensité physiques exprimant le pouvoir destructeur des différentes sollicitations associées aux phénomènes naturels, d'autre part d'échelles d'endommagements qui

permettent d'exprimer les effets de manière cohérente, quel que soit le type d'élément exposé pris en compte. La fonction de vulnérabilité de chacun des différents types d'enjeux est évaluée spécifiquement pour chacune des échelles d'intensité physiques.

A partir de ces principes génériques, l'application de la méthode sur une agglomération donnée, implique :

- la cartographie des différents aléas. Pour cela, on détermine quelques événements « moyens », représentatifs des différents phénomènes connus, en définissant leurs caractéristiques (intensité physique par sollicitation, extension). Chacun de ces phénomènes est traité séparément. On cartographie leurs zones de susceptibilité d'occurrence. Le nombre d'événements attendus par zone sur la période de référence est déterminé à partir des inventaires disponibles (archives de la ville) et des observations de terrain, sans localisation précise au sein de la zone. Rapporté à l'extension moyenne du phénomène, ce nombre d'événement permet d'évaluer un pourcentage de surface potentiellement impactée dans chaque zone ;
- la cartographie des enjeux. Il s'agit de recenser les différents types d'enjeux sur les zones d'urbanisme homogène. On réalise donc une carte par catégorie d'enjeux. Les valeurs unitaires locales (financières, humaines, fonctionnelles) des différents types sont également déterminées à ce stade ;
- à partir du croisement topologique entre chaque carte d'aléa (phénomène de référence d'intensité physique donnée) et chaque cartographie d'enjeux, il devient alors possible d'évaluer le cumul des dommages par zone, sur la période de référence, en appliquant les fonctions de vulnérabilité aux valeurs unitaires locales.

Une approche prospective de ce type ne peut être envisagée sans un certain nombre de postulats. Les plus importants concernent :

- la pérennité des enjeux et de leurs coûts unitaires sur la période de référence ;
- la non prise en compte des modifications ou évolutions de l'urbanisme sur la stabilité des terrains ;
- l'extrapolation des conditions climatiques actuelles au siècle prochain.

Le niveau d'incertitude constitue un critère déterminant dans l'analyse des résultats obtenus. Le moyen de l'évaluer fait donc l'objet d'une réflexion spécifique, prenant en compte les paramètres principaux susceptibles d'induire des incertitudes. Ils sont au nombre de 7 : 4 concernent l'aléa – dimensions géométriques moyennes, intensité moyenne, fréquence, incertitude sur les limites cartographiques, 3 concernent les enjeux – taux d'endommagement retenu, coût unitaire, imprécision sur la répartition cartographique. Pour chacun de ces paramètres, on réalise des analyses de sensibilité spécifiques. L'analyse de sensibilité menée au terme de l'application de l'ensemble de la méthode sur un site pilote donne un facteur d'incertitude moyen de l'ordre de 3,5. Ce qui signifie que la valeur finale de dommages pour un type de phénomène peut se révéler 3,5 fois plus grande ou 3,5 fois plus petite. Ce facteur varie en fonction des phénomènes de référence traités. Par ailleurs, on peut noter que l'évaluation de la

fréquence des évènements constitue, dans la majorité des cas, le paramètre identifié comme étant le plus sensible.

A l'issue de cette étude, nous avons estimé les moyens nécessaires pour la mise en œuvre de cette méthode. Pour une ville d'environ 100 000 habitants, l'ordre de grandeur de l'effort à fournir correspond à environ 2 mois d'ingénieur expérimenté, 3,5 mois d'ingénieur d'étude et 6 mois de technicien ou de stagiaire, auxquels il conviendra d'ajouter les frais divers d'édition ou de déplacement. Cette évaluation reste, bien sûr, très dépendante du contexte local, en fonction de la complexité géologique et des données existantes. Il faut souligner également qu'il n'existe pas de relation linéaire entre les dimensions de l'agglomération étudiée et l'effort nécessaire, beaucoup de tâches n'étant pas dépendantes des dimensions. Par ailleurs, il faut souligner que de nombreuses tâches nécessaires à la réalisation d'une telle étude sont également comprises dans la réalisation d'un PPR « Mouvement de terrain ». On peut donc estimer à environ 1 ou 2 mois ingénieur, le travail directement réutilisable en relation avec la réalisation d'un PPR.



## Sommaire

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introduction .....</b>                                                                     | <b>11</b> |
| 1.1. CONTEXTE DU PROJET .....                                                                    | 11        |
| 1.2. OBJECTIFS .....                                                                             | 12        |
| 1.3. RAPPEL DES CONCEPTS DU RISQUE ET VOCABULAIRE .....                                          | 12        |
| 1.4. PROBLEMATIQUE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.....                                               | 14        |
| <b>2. Schéma méthodologique global .....</b>                                                     | <b>17</b> |
| 2.1. PERIODE DE REFERENCE.....                                                                   | 18        |
| 2.2. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA .....                                                                | 18        |
| 2.2.1. Echelle de précision .....                                                                | 18        |
| 2.2.2. Phénomènes et échelles d'intensité .....                                                  | 18        |
| 2.2.3. Cartographies .....                                                                       | 21        |
| 2.3. ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DES ENJEUX .....                                                    | 24        |
| 2.3.1. Catégories d'enjeux et échelles d'endommagement .....                                     | 24        |
| 2.3.2. Typologie des enjeux.....                                                                 | 25        |
| 2.3.3. Fonctions de vulnérabilité .....                                                          | 26        |
| 2.3.4. Cartographie des enjeux et analyse de la valeur .....                                     | 27        |
| 2.4. CARTOGRAPHIE DU RISQUE .....                                                                | 29        |
| 2.5. LIMITES ET INCERTITUDES.....                                                                | 31        |
| 2.5.1. Principes et limites.....                                                                 | 31        |
| 2.5.2. Evaluation de l'incertitude.....                                                          | 32        |
| <b>3. Cartographie de l'aléa .....</b>                                                           | <b>35</b> |
| 3.1. ECHELLES D'INTENSITES PHYSIQUES.....                                                        | 35        |
| 3.1.1. Décomposition en sollicitations élémentaires .....                                        | 35        |
| 3.1.2. Echelles d'intensité .....                                                                | 37        |
| 3.1.3. Echelles d'intensité de l'extension et de la profondeur de la surface de<br>rupture ..... | 39        |
| 3.2. DEFINITION DE PHENOMENES DE REFERENCES .....                                                | 40        |

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3. CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE .....                                | 41        |
| 3.4. DEFINITION DES FREQUENCES.....                                         | 44        |
| 3.5. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA.....                                            | 46        |
| <b>4. Analyse des enjeux .....</b>                                          | <b>49</b> |
| 4.1. DEFINITION DES TYPOLOGIES .....                                        | 49        |
| 4.2. ECHELLES D'ENDOMMAGEMENT .....                                         | 51        |
| 4.3. FONCTIONS DE VULNERABILITE .....                                       | 57        |
| 4.3.1. Enjeu Individus.....                                                 | 58        |
| 4.3.2. Enjeu Bâtiments.....                                                 | 58        |
| 4.3.3. Enjeu Voirie.....                                                    | 58        |
| 4.3.4. Enjeu Mobilier urbain .....                                          | 58        |
| 4.4. ANALYSE DE LA VALEUR .....                                             | 59        |
| 4.4.1. Valeur financière de l'enjeu Individu .....                          | 59        |
| 4.4.2. Valeur financière de l'enjeu Bâtiment.....                           | 60        |
| 4.4.3. Valeur financière de l'enjeu Mobilier urbain .....                   | 60        |
| 4.4.4. Valeur financière de l'enjeu Voirie.....                             | 60        |
| 4.4.5. Valeur financière de l'enjeu Surfaces naturelles .....               | 60        |
| 4.5. CARTOGRAPHIE DES ENJEUX .....                                          | 61        |
| 4.5.1. Zonage de l'enjeu Individu .....                                     | 61        |
| 4.5.2. Zonage de l'enjeu Bâtiments.....                                     | 61        |
| 4.5.3. Zonage de l'enjeu Voirie .....                                       | 62        |
| 4.5.4. Zonage de l'enjeu Surfaces naturelles.....                           | 63        |
| 4.5.5. Zonage de l'enjeu Mobilier urbain .....                              | 63        |
| <b>5. Stabilisation de la méthode.....</b>                                  | <b>65</b> |
| 5.1. CARTOGRAPHIE DES DOMMAGES.....                                         | 65        |
| 5.1.1. Découpage des enjeux par zone d'aléa.....                            | 65        |
| 5.1.2. Cartographie des dommages cumulés par type de valeur considérée .... | 66        |
| 5.2. ANALYSE DES RISQUES POUR LA VIE HUMAINE .....                          | 68        |
| 5.3. EVALUATION DE L'INCERTITUDE.....                                       | 69        |
| 5.4. MOYENS A METTRE EN ŒUVRE .....                                         | 72        |
| 5.4.1. Données en entrée.....                                               | 72        |
| 5.4.2. Moyens humains et temps nécessaires .....                            | 72        |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>6. Conclusions .....</b>  | <b>75</b> |
| <b>7. Bibliographie.....</b> | <b>77</b> |

## Liste des illustrations

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Illustration 1 : Schéma explicatif de la notion de gravité (source MEDDAD).....                                                                                       | 14 |
| Illustration 2 : Shéma du déroulement global de la méthode.....                                                                                                       | 17 |
| Illustration 3 : Schéma pour la détermination d'échelles d'intensité physique dans le cas des chutes de blocs .....                                                   | 20 |
| Illustration 4 : Schéma méthodologique de cartographie des aléas .....                                                                                                | 23 |
| Illustration 5 : Schéma méthodologique d'analyse des enjeux .....                                                                                                     | 28 |
| Illustration 6 : Schéma méthodologique de cartographie des dommages par phénomène de référence et par catégorie d'enjeux .....                                        | 30 |
| Illustration 7 : Paramètres contrôlant l'incertitude .....                                                                                                            | 32 |
| Illustration 8 : Exemple d'une caractérisation de la géométrie d'une chute de blocs .....                                                                             | 41 |
| Illustration 9 : Exemples de cartes de susceptibilité pour deux phénomènes de référence différents a) affaissement de faible ampleur b) fluage.....                   | 42 |
| Illustration 10 : Exemple de cartographie de la fréquence attendue pour le phénomène de référence « affaissement de faible ampleur » .....                            | 45 |
| Illustration 11 : Exemple de cartographie de l'aléa exprimé en pourcentage de secteur impacté pour le phénomène de référence « affaissement de faible ampleur » ..... | 47 |
| Illustration 12 : Zonage homogène par type de bâtiments sur la zone d'étude .....                                                                                     | 62 |
| Illustration 13 : Zonage de l'enjeu Voirie sur la zone d'étude .....                                                                                                  | 62 |
| Illustration 14 : Découpage et quantification de l'enjeu bâti sur les surfaces d'aléa du phénomène de référence fictif « chutes de blocs » .....                      | 65 |
| Illustration 15 : Principe de cartographie de la carte des dommages économiques cumulés sur l'ensemble des enjeux .....                                               | 67 |
| Illustration 16 : Cartographie des zones de danger pour la vie humaine .....                                                                                          | 68 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Echelle de gravité établie par le MEDADD .....                                                                                           | 13 |
| Tableau 2 : Exemple de détermination des niveaux d'intensité pour les sollicitations Accumulation et Impact dans le cas d'écroulements rocheux ..... | 21 |
| Tableau 3 : Echelle d'endommagement pour la voirie .....                                                                                             | 25 |

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 4 : Exemples de types de voirie retenus .....                                                                                                                                        | 26 |
| Tableau 5 : Exemple de fonction de vulnérabilité établie pour deux types de voirie .....                                                                                                     | 27 |
| Tableau 6 : Décomposition en sollicitations physiques élémentaires des phénomènes de mouvement de terrain.....                                                                               | 36 |
| Tableau 7 : Sollicitations et paramètres de description associés.....                                                                                                                        | 37 |
| Tableau 8 : Valeurs numériques des classes d'intensité des sollicitations Accumulation, Poussée, Impact et Ablation.....                                                                     | 38 |
| Tableau 9 : Classes de valeur des paramètres de description des sollicitations Déplacements.....                                                                                             | 38 |
| Tableau 10 : Echelle d'intensité de la sollicitation « Déplacement vertical ou horizontal ».....                                                                                             | 39 |
| Tableau 11 : Echelle d'intensité de l'extension.....                                                                                                                                         | 39 |
| Tableau 12 : Echelle d'intensité de la profondeur de la surface de rupture .....                                                                                                             | 40 |
| Tableau 13 : Typologie des enjeux suivant les cinq grandes catégories prises en compte .....                                                                                                 | 50 |
| Tableau 14 : Echelle d'endommagement pour les individus .....                                                                                                                                | 52 |
| Tableau 15 : Echelle d'endommagement pour le bâti (valeurs fonctionnelles et humaines) .....                                                                                                 | 54 |
| Tableau 16 : Echelle d'endommagement pour le bâti (valeur financière) .....                                                                                                                  | 54 |
| Tableau 17 : Echelle d'endommagement pour la voirie .....                                                                                                                                    | 55 |
| Tableau 18 : Echelle d'endommagement pour les surfaces naturelles.....                                                                                                                       | 56 |
| Tableau 19 : Echelle d'endommagement pour les véhicules .....                                                                                                                                | 57 |
| Tableau 20 : Valeurs de la vie humaine (source : rapport du Commissariat Général du Plan intitulé « Transport : choix des investissements et coût des nuisances. » (Boiteux M., 2001)) ..... | 60 |
| Tableau 21 : Exemple de tableau de quantification des enjeux par zone d'aléa homogène pour un phénomène de référence donné .....                                                             | 66 |
| Tableau 22 : Critères de détermination des facteurs d'incertitude .....                                                                                                                      | 69 |
| Tableau 23 : Exemple de détermination des classes d'incertitude pour un phénomène de chute de blocs.....                                                                                     | 70 |
| Tableau 24 : Répartition des temps nécessaires par profils et par tâches .....                                                                                                               | 73 |

## Liste des annexes

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Annexe 1 : Fonctions de vulnérabilité..... | 79 |
|--------------------------------------------|----|

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE DU PROJET

Le projet de Service Public PSP06ARN05 « Scénario risque mouvements de terrain (y compris effondrement de cavité) dans les agglomérations urbaines » est régi par l'avenant n°1/2006 de la convention n°CV0500195 du 15 décembre 2005, signée entre le Ministère de l'Ecologie, de l'Aménagement et du Développement Durables et le BRGM. Il correspond au cahier des charges n° 1.1. Sa durée est prévue sur 12 mois et la date de remise du rapport final fixée en décembre 2007. Toutefois, un complément de financement étant assuré au travers d'une convention de cofinancement au titre du fond de prévention « fond Barnier », il était prévu que ce programme se termine 6 mois après la date d'acquisition de ce financement.

L'objet de cette étude est d'élaborer une méthode générique d'évaluation des risques mouvements de terrain sur les agglomérations urbaines afin de hiérarchiser et de chiffrer les dommages potentiels dans des zones à forts enjeux. Cette méthode a pour vocation de compléter les cartographies départementales de risques cavités et de risques mouvements de terrains élaborées à l'échelle du 1 / 50 000, principalement sur les aspects suivants :

- échelle d'étude accrue à 1 / 25 000 ;
- évaluation de l'aléa suivant une méthode plus précise que celle mise au point pour les cartographies départementales (zonage avec caractérisation des fréquences et des intensités) ;
- traitement plus détaillé des enjeux (on passe d'une vulnérabilité évaluée de manière binaire –affecté/non affecté – à une vulnérabilité construite).

Comme pour les cartographies départementales, une attention plus particulière doit être portée à l'évaluation des incertitudes.

Les phénomènes pris en compte sont les suivants :

- glissements, fluages et solifluxions ;
- chutes de pierres, de blocs et éboulements ;
- coulées de boues ;
- effondrement de cavités souterraines (hors mines).

On soulignera qu'il ne s'agit pas d'élaborer des scénarios au sens qu'entendent les services de secours opérationnels de la Protection Civile. De même, qu'il ne s'agit pas d'atteindre le niveau de résolution des Plans de Prévention des Risques (PPR).

## 1.2. OBJECTIFS

L'objectif de cette étude est de développer une méthode générique reproductible permettant de comparer plusieurs agglomérations sur une même base ou de comparer, entre eux, différents quartiers au sein d'une même agglomération.

**Il s'agit donc de pouvoir évaluer les dommages en cumulant les phénomènes instables probables sur une période de référence donnée.** Ceci afin d'une part de permettre d'apprécier le risque à partir d'une base quantitative et d'autre part de distinguer l'ampleur des dommages selon la période de référence fixée.

L'évaluation du risque, dans les cas des mouvements de terrain et des cavités, est généralement conduite essentiellement par superposition des enjeux avec des cartes d'aléas sans que les interactions entre aléa et enjeux soient explicitées. Un des principaux objectifs de ce projet est d'élaborer une méthode explicitant ces interactions.

A l'issue du développement méthodologique, les résultats doivent faire l'objet d'une stabilisation du processus de réalisation. Il s'agit, alors, de bien identifier les coûts de réalisation « en production » d'une telle étude (hors coûts de développements méthodologiques) en veillant, plus particulièrement, à bien identifier les éléments nécessaires dont ceux qui pourraient avoir été réunis dans le cas de la réalisation d'un PPR.

## 1.3. RAPPEL DES CONCEPTS DU RISQUE ET VOCABULAIRE

L'existence d'un risque est liée :

- d'une part à la survenance d'un événement (phénomène naturel ou anthropique). Pour évaluer le risque, ce phénomène sera caractérisé en termes d'**aléa** avec une probabilité de survenance définie par la **fréquence** (ou période de retour) pour un pouvoir destructeur donné, exprimé au travers de l'**intensité** du phénomène, sur une **période de référence** donnée ;
- d'autre part à l'existence d'**enjeux**, qui représentent l'ensemble des personnes et des biens (ayant une **valeur**, monétaire ou non monétaire) pouvant être affectés par un phénomène. La **vulnérabilité** constitue une caractéristique intrinsèque d'un élément exposé. Elle exprime la variation de son taux d'endommagement en fonction des différentes intensités possibles d'un phénomène naturel. On l'évalue par le coefficient de vulnérabilité (V) en termes relatifs comme "pas de dommage", "quelques dommages", "dommages majeurs", "perte totale"; ou par une échelle numérique comprise entre 0 (pas de dommage - 0%) et 1 (destruction totale à 100%). La vulnérabilité peut être physique, sociale, environnementale, économique...

Un événement potentiellement dangereux, ou aléa, ne représente un risque que s'il survient dans une zone où des enjeux humains, économiques ou environnementaux sont exposés.

**Le risque réside donc dans la confrontation d'un aléa, défini par son intensité et sa fréquence sur une période de référence, avec des enjeux dont les différentes valeurs (sociale, monétaire, fonctionnelle,...) sont plus ou moins menacées en fonction de leur vulnérabilité.**

Toutefois dans certains cas, la notion d'aléa reste difficilement applicable dans sa stricte définition. Ceci est vrai en particulier concernant les mouvements de terrain pour lesquels la notion de période de retour reste souvent très difficile à évaluer. Pour éviter les confusions, la notion de **susceptibilité** a donc été développée. Elle traduit, pour une zone donnée, la présence de **facteurs permanents** qui rendent possible, sinon probable, la survenance d'un événement (par exemple, pour les instabilités de pente : forte pente, qualités mécaniques médiocres des sols, fracturation). Dans les zones plus défavorables, on note la présence de **facteurs aggravants** (par exemple, concentration des circulations d'eau souterraine, débit en aval, pendage des fractures ou de la schistosité). Dans un contexte de susceptibilité, les **facteurs déclenchant** sont à l'origine de l'**occurrence** (survenance) d'un événement (par exemple, pluviométrie exceptionnelle ou travaux en fouilles mal réalisés).

L'impact d'un événement sera mesuré en termes de **gravité**. Pour fixer les idées, une échelle de gravité des dommages a été produite par le Ministère de l'Écologie de l'Aménagement et du Développement Durables (MEDADD). Cette échelle, présentée dans le Tableau 1 permet de classer les événements naturels en six classes, depuis l'incident jusqu'à la catastrophe majeure.

| Classe |                     | Préjudices humains     | Dommages matériels       |
|--------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| 0      | Incident            | Aucun blessé           | Moins de 0,3 M€          |
| 1      | Accident            | 1 ou plusieurs blessés | Entre 0,3 M€ et 3 M€     |
| 2      | Accident grave      | 1 à 9 morts            | Entre 3 M€ et 30 M€      |
| 3      | Accident très grave | 10 à 99 morts          | Entre 30 M€ et 300 M€    |
| 4      | Catastrophe         | 100 à 999 morts        | Entre 300 M€ et 3 000 M€ |
| 5      | Catastrophe majeure | 1 000 morts ou plus    | 3 000 M€ ou plus         |

*Tableau 1 : Echelle de gravité établie par le MEDADD*

La gravité d'un événement est déterminée par la combinaison de trois des quatre paramètres qui caractérisent le risque :

- l'intensité de l'aléa ;
- la valeur des enjeux ;
- la vulnérabilité des enjeux.

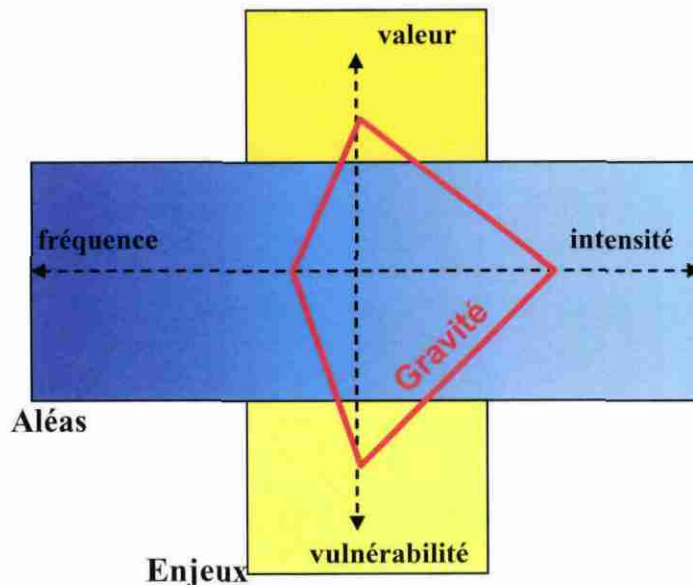


Illustration 1 : Schéma explicatif de la notion de gravité (source MEDDAD)

Les événements d'une extrême gravité seront le plus souvent exceptionnels, d'où une faible fréquence (cf. Illustration 1). Alors que des accidents de faible gravité sont susceptibles de se produire fréquemment sans susciter de réactions fortes des populations.

#### 1.4. PROBLEMATIQUE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

L'approche du risque mouvements de terrain et cavités est, a priori, plus délicate à mettre en œuvre que celle du risque sismique. Pour ce dernier, en effet, les méthodes d'évaluations sont variées, bien que reposant souvent sur le concept de scénario et les exemples d'applications, tant au niveau national qu'à l'étranger, sont nombreux. Ce n'est pas le cas pour les mouvements de terrain. De ce point de vue, l'écart de connaissance entre séismes et mouvements de terrains, ainsi que la très grande pauvreté des études sur la vulnérabilité associée à ces derniers phénomènes, ont été bien analysés par Douglas (2006). Plusieurs raisons contribuent à expliquer ce fait, parmi celles-ci :

- la diversité des phénomènes regroupés sous le terme générique de mouvements de terrain ;
- la discontinuité spatiale des phénomènes et l'importance des conditions locales ;
- le fait que les niveaux d'aléas sont susceptibles de fortement évoluer dans le temps, soit pour des raisons naturelles, soit pour des raisons anthropiques (déforestation, modification de la topographie, ...) ;

- l'absence d'un jeu de paramètres unique de mesure de l'intensité des phénomènes, indépendamment des effets sur les éléments exposés ;
- les méthodes d'évaluation de l'aléa qui conduisent le plus souvent à exprimer les résultats sous forme qualitative. En particulier, les périodes de retour des phénomènes à risques se révèlent extrêmement délicates à déterminer ;
- par ailleurs, contrairement aux séismes, les dommages provoqués par les mouvements de terrain n'affectent pas que le milieu construit mais, potentiellement, la plupart des éléments des systèmes exposés, incluant directement les personnes.

Alors que l'on trouve certaines applications traitant du risque lié à des cas particuliers de mouvements de terrains (par exemple les coulées de boues au Costa-Rica - Mora 1992, les affaissements de terrain aux Pays-Bas - Hulsberg *et al.* 1987, cités par Léone, 1996), la recherche bibliographique concernant l'analyse du risque dû à l'ensemble des phénomènes de mouvements de terrain se révèle relativement pauvre.

En 1996, Léone présente un travail de thèse qui s'inscrit dans une démarche globale d'aide à la perception du risque généré par les phénomènes de mouvements de terrain. A partir d'une analyse en retour sur des événements passés, il bâtit une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité reposant d'une part sur la notion d'intensité des sollicitations apportées par les phénomènes, et d'autre part sur la notion d'éléments exposés. Il définit ainsi des matrices d'endommagement qui explicitent l'interaction entre ces éléments exposés et les phénomènes de mouvements de terrain impliqués.

Ce travail de Léone représente, à notre connaissance, une des seules études traitant à la fois de l'évaluation de l'aléa ainsi que des dommages provoqués. D'autres études ne traitent qu'un seul de ces thèmes.

En 1997, un document officiel suisse fournit les recommandations pour l'élaboration obligatoire de cartes de dangers pour l'aménagement du territoire (OFAT, OFEE et OFEFP, 1997). Les phénomènes naturels considérés sont les glissements de terrains, les chutes de pierre et de blocs, les coulées de terre et les affaissements. Ces recommandations permettent une classification des événements relatifs à chaque phénomène, survenus à des dates ou en des lieux différents, sans tenir compte des enjeux qui y sont confrontés. Pour cela, à l'image du travail proposé par Léone, les événements sont décrits à partir de paramètres cinématiques (vitesse de déplacement lors d'un glissement de terrain) ou géométriques (amplitude du déplacement vertical lors d'un affaissement).

Dans le cadre du projet « Détermination d'une échelle d'intensité en 5 niveaux par types de phénomène naturel », financé par le MEDD, un travail similaire a été réalisé pour la France métropolitaine en 2001. Les résultats de cette étude proposent là aussi une caractérisation des événements à partir de paramètres intrinsèques au phénomène, mais aussi à partir de l'impact de ce phénomène sur des types d'enjeux standards (GSC *et al.* 2002).

Zihri, dans sa thèse intitulée « Risques liés aux ouvrages souterrains : constitution d'une échelle de dommages » (2004), propose une bibliographie importante sur les échelles d'endommagement permettant une évaluation des dommages subis par des enjeux à des phénomènes donnés. Ces échelles sont souvent rattachées aux phénomènes liés au risque sismique, plus rarement aux phénomènes de mouvements de terrain. Ces dernières pourront être utilisées directement dans le cadre de cette étude, tandis que les premières pourront servir de guide à l'établissement de nos propres échelles.

Enfin, le projet européen de recherche « LESSLOSS Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides » s'intéresse à la vulnérabilité par rapport aux risques sismiques et aux glissements de terrain. L'un de ses derniers rapports (Delivrable 93 – Vulnerability assessment for landslides – Phase II) s'intéresse plus particulièrement aux glissements de terrain. L'objectif est de réaliser le travail préliminaire à une modélisation de la vulnérabilité. Ce projet n'entre pas dans le domaine de la cartographie des enjeux, mais représente un axe de recherche important dans le développement des connaissances sur la vulnérabilité des infrastructures.

## 2. Schéma méthodologique global

Il s'agit, ici, de présenter le déroulement de la méthode suivant les grandes étapes présentées dans l'illustration 2. Le détail de la mise en œuvre sera décrit dans les chapitres suivants « Cartographie de l'aléa », « Analyse des enjeux » et « Stabilisation de la méthode ».

Dans cette présentation, nous nous attacherons à bien identifier les éléments « génériques » réutilisables tels quels dans différentes agglomérations, des éléments « spécifiques » qu'il sera nécessaire d'adapter pour correspondre aux spécificités locales.

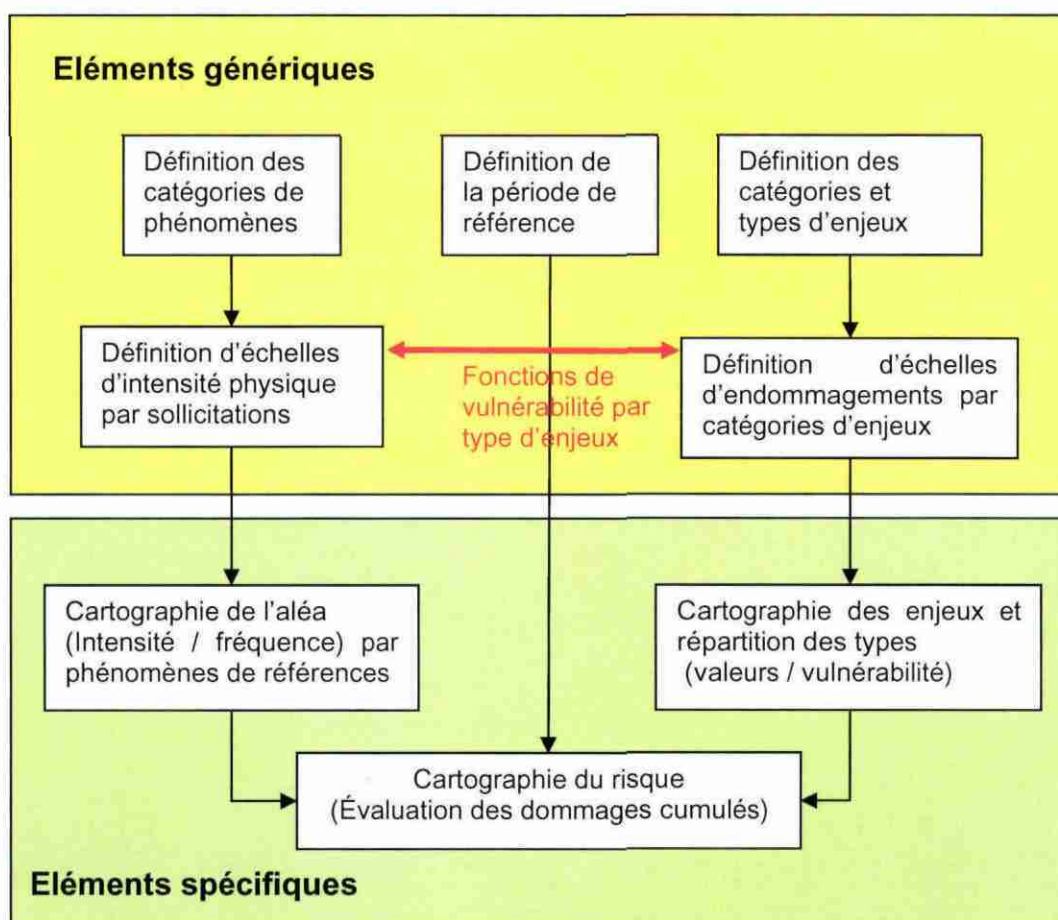


Illustration 2 : Schéma du déroulement global de la méthode

## 2.1. PERIODE DE REFERENCE

Pour réaliser une analyse du risque « mouvement de terrain », il s'agit de définir, en premier lieu, la période de référence à prendre en compte pour le cumul des dommages attendus.

Dans un souci de cohérence, en particulier avec les études de risques sur les inondations, **la période de référence retenue est fixée à 100 ans.**

## 2.2. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

### 2.2.1. Echelle de précision

Comme noté plus haut, il ne s'agit pas, ici, de se situer au niveau de précision d'un PPR. La cartographie de l'aléa sera donc réalisée avec une précision compatible avec **l'échelle du 1 / 25 000.**

### 2.2.2. Phénomènes et échelles d'intensité

Quatre grandes catégories de phénomènes<sup>1</sup> doivent être prises en compte pour ces analyses du risque lié aux mouvements de terrain en milieu urbain :

- les glissements, fluages et solifluxions
- les chutes de blocs et écroulements rocheux
- les affaissements et effondrements
- les coulées boueuses

Dans l'application de la méthode développée, ces quatre catégories devront être systématiquement considérées, même si, localement, leur importance respective peut diminuer jusqu'à devenir non significative. Soulignons que les mouvements liés aux phénomènes de retrait-gonflement des argiles ne sont pas pris en compte ici.

Pour assurer la reproductibilité des cartographies dans différents contextes, il est nécessaire d'établir des échelles d'intensité, associées à chacune de ces quatre catégories de phénomènes.

L'intensité correspond au pouvoir destructeur intrinsèque d'un phénomène, exprimé indépendamment de la nature des éléments exposés ainsi qu'à l'extension surfacique de ce phénomène. Pour analyser ce pouvoir destructeur, il est nécessaire de

---

<sup>1</sup> Nous renvoyons le lecteur à la très abondante littérature existante pour la description de ces différents phénomènes.

décomposer le phénomène entre les différentes sollicitations physiques qu'il est susceptible de provoquer.

Six sollicitations différentes<sup>2</sup> permettent de décrire l'ensemble des phénomènes « mouvements de terrain ». Il s'agit de :

- déplacement horizontal (latéral),
- déplacement vertical,
- impact,
- poussée,
- accumulation,
- ablation/affouillement.

Chacune de ces sollicitations peut être exprimée suivant une, ou plusieurs, grandeurs physiques (notées aussi « effets physiques »).

A partir des classes de grandeurs physiques, il devient possible d'établir, pour chacune de ces sollicitations, une **échelle d'intensité physique**.

L'extension surfacique constitue un autre paramètre du phénomène, qui n'intervient pas dans l'analyse de l'intensité de celui-ci au sens strict mais qui sera parfois important pour l'analyse des endommagements aux enjeux (un fontis de 3 m d'extension, n'aura pas les mêmes effets qu'un fontis de 8 m d'extension). Une échelle d'intensité d'extension est donc également établie. De la même manière, la prise en compte de la profondeur de la surface de rupture ne sera utile pour l'évaluation des dommages que vis-à-vis des fondations de bâtiments.

Cette décomposition d'une catégorie de phénomène en sollicitations puis effets physiques est présentée, à titre d'exemple dans l'illustration 3, pour les chutes de blocs. Ce type de phénomène se traduit par trois types de sollicitations : des impacts, une accumulation de matériaux, un déplacement vertical (à noter que, dans ce cas, le déplacement vertical n'intervient qu'au niveau de la zone de départ). A chaque sollicitation est associée un ou plusieurs effets physiques correspondant à différentes échelles d'intensité. Dans notre exemple, la troisième sollicitation (déplacement vertical) devrait faire intervenir en plus la vitesse, en tant qu'effet physique. Dans le cas des chutes de blocs, toutefois, ce paramètre est toujours considéré comme maximal et pris en compte en tant que tel dans l'établissement de l'échelle d'intensité synthétique.

---

<sup>2</sup> Rappelons que ces sollicitations sont décrites plus en détail dans le chapitre 3 « Cartographie de l'aléa ».

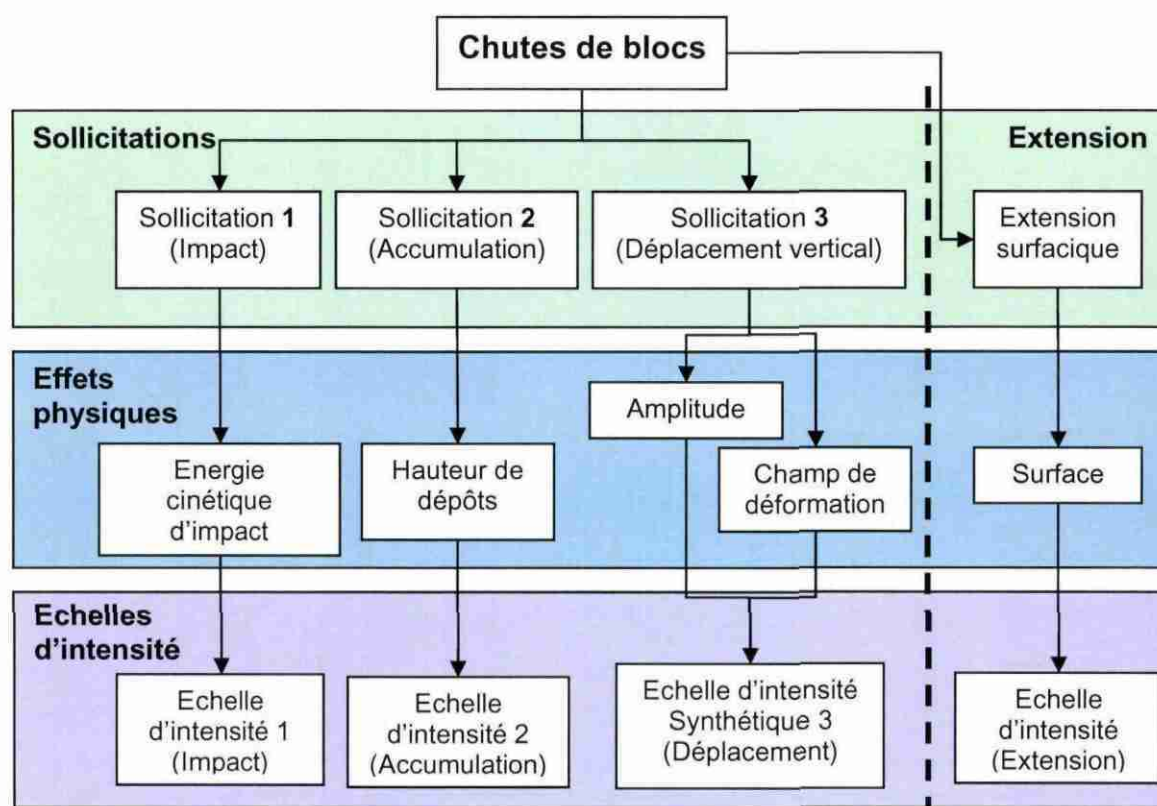


Illustration 3 : Schéma pour la détermination d'échelles d'intensité physique dans le cas des chutes de blocs

Pour les sollicitations décrites au moyen de plusieurs paramètres physiques (déplacements horizontaux et verticaux), les échelles d'intensité doivent être synthétiques, c'est-à-dire qu'elles doivent tenir compte simultanément des paramètres d'amplitude, de champ de déformation et de vitesse.

Pour une sollicitation donnée, l'intensité est exprimée suivant quatre niveaux : faible, moyen, fort, très fort. Chacun de ces niveaux correspond à des classes de valeurs physiques déterminées pour chacun des effets physiques correspondants. Les tableaux de relation entre intensité et grandeur physique sont déterminés essentiellement à partir de l'analyse bibliographique.

A titre d'exemple, pour un écoulement rocheux, on détermine une intensité pour la sollicitation « impact » à partir de valeurs d'énergie cinétique exprimées en Joules, ainsi qu'une intensité pour la sollicitation « accumulation » à partir de hauteurs d'accumulation exprimée en mètres (cf. Tableau 2).

| <u>Intensité</u>  | <u>Sollicitation / Effet physique</u>       |                                       |
|-------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|
|                   | <u>Accumulation /<br/>Hauteur de dépôts</u> | <u>Impact / Energie<br/>cinétique</u> |
| <b>Faible</b>     | 5 cm                                        | 0,1 kJ                                |
| <b>Moyenne</b>    | 50 cm                                       | 1 kJ                                  |
| <b>Forte</b>      | 1 m                                         | 10 kJ                                 |
| <b>Très forte</b> | 3 m                                         | 100 kJ                                |

Tableau 2 : Exemple de détermination des niveaux d'intensité pour les sollicitations Accumulation et Impact dans le cas d'écroulements rocheux

In fine, dans le cadre de ce développement méthodologique, pour les quatre catégories de phénomènes retenus, on retient une combinaison de sept échelles d'intensité de sollicitation. A savoir, les six sollicitations identifiées, le déplacement vertical étant traité suivant deux cas (en différenciant les chutes de blocs des phénomènes de glissements ou affaissements/effondrements). Cette décomposition vise à bien discriminer les effets pour évaluer, ensuite, les endommagements.

### 2.2.3. Cartographies

Il s'agit de déterminer en premier lieu la nature des événements attendus, ainsi que les secteurs où ces événements sont susceptibles de se produire. On peut réaliser, de ce fait, une **cartographie de la susceptibilité des terrains aux phénomènes**. Il s'agit d'un travail relativement « classique » (Thierry et Vinet 2002, Thierry et al. 2007) qui doit être mené, dans notre cas, avec une précision compatible avec l'échelle du 1 / 25 000.

Il manque, cependant, à ce stade, deux composantes essentielles de l'aléa : l'intensité et la période de retour (fréquence).

La fréquence n'a de sens que par rapport à une intensité donnée. Pour approcher cette composante, il est donc nécessaire de déterminer préalablement des intensités moyennes pour lesquelles on cherchera à déterminer des périodes de retour en fonction des différentes situations géologiques ou morphologiques sur le secteur étudié.

Ces intensités moyennes vont correspondre à des **phénomènes de référence**, définis spécifiquement pour chaque étude, à partir de la connaissance du terrain et de l'exploitation des archives.

On pourra retenir de l'ordre d'une dizaine de phénomènes différents, représentatifs des différentes situations, comme par exemple :

- Chute de bloc isolé
- Petit écoulement
- Ecoulement en masse
- Affaissement limité
- Affaissement étendu
- Fontis
- Fluage
- Glissement limité
- Grand glissement (versant)
- Coulée boueuse

On détermine, pour chaque phénomène de référence, des dimensions et des caractéristiques moyennes qui permettent, d'une part de définir une **surface impactée moyenne par événement** et d'autre part de déterminer **l'intensité physique correspondant à chacune des différentes sollicitations**.

Chacun de ces phénomènes de référence fait l'objet d'une carte spécifique qui permet de relier des zones de susceptibilité d'occurrence avec une intensité physique donnée par sollicitation. Dans notre exemple, ce sont dix cartes différentes qui sont donc réalisées.

Il s'agit alors d'estimer, à ce stade, le nombre d'événements attendus par phénomène de référence, sur la période de référence. Pour cela, deux approches peuvent être envisagées :

- une approche déterministe à partir des caractéristiques mécaniques des terrains ;
- une approche statistique par extrapolation à la période de référence du nombre d'événements qui se sont produits antérieurement.

Compte tenu de la difficulté d'une mise en œuvre fiable de la première approche à l'échelle d'une ville (liée essentiellement à l'impossibilité de disposer des informations nécessaires), nous privilégions l'approche statistique, d'autant que les villes sont susceptibles de disposer d'une information « riche » sur les événements passés.

De fait, quelle que soit la situation, on dispose de 3 sources principales d'informations dont l'importance relative pourra varier en fonction des contextes :

- les archives de la ville (par exemple, base de données des incidents ou accidents signalés) ;
- l'observation de terrain (indices de désordres, morphologies significatives, ..) ;
- les enquêtes auprès des riverains ou des agents des services techniques.

A partir de là, on cherche à évaluer le nombre d'événements survenus d'une part pour chacun des phénomènes de référence, d'autre part pour les différents contextes

géologiques (faciès et formations litho-stratigraphiques) et morphologiques (pentes, thalwegs, etc..) identifiés. Il est clair que la précision d'une telle évaluation décroît rapidement d'une part avec l'éloignement dans le temps (les souvenirs sont nettement plus précis sur les 10 ou 20 dernières années), d'autre part avec l'intensité des phénomènes (les événements peu marquants ont tendance à ne pas être enregistrés). Il est clair également qu'une telle approche rend plus délicate l'identification des phénomènes exceptionnels de très faible récurrence (temps de retour supérieurs à 100 ans).

Chaque carte de susceptibilité des terrains aux phénomènes est reprise et détaillée de manière à bien différencier les différents contextes contrôlant les périodes de retour du phénomène correspondant. Il est alors possible de relier le nombre d'événements attendus aux différentes zones ainsi cartographiées.

Il est aussi à noter que le nombre de phénomènes de référence retenus par catégories influe de manière limitée sur l'évaluation des dommages cumulés (but final de la méthode) dans la mesure où la fréquence relative de chacun des phénomènes diminue avec la répartition des événements suivant le nombre de types différents retenus.

L'ensemble de cette démarche est schématisée dans l'illustration 4.

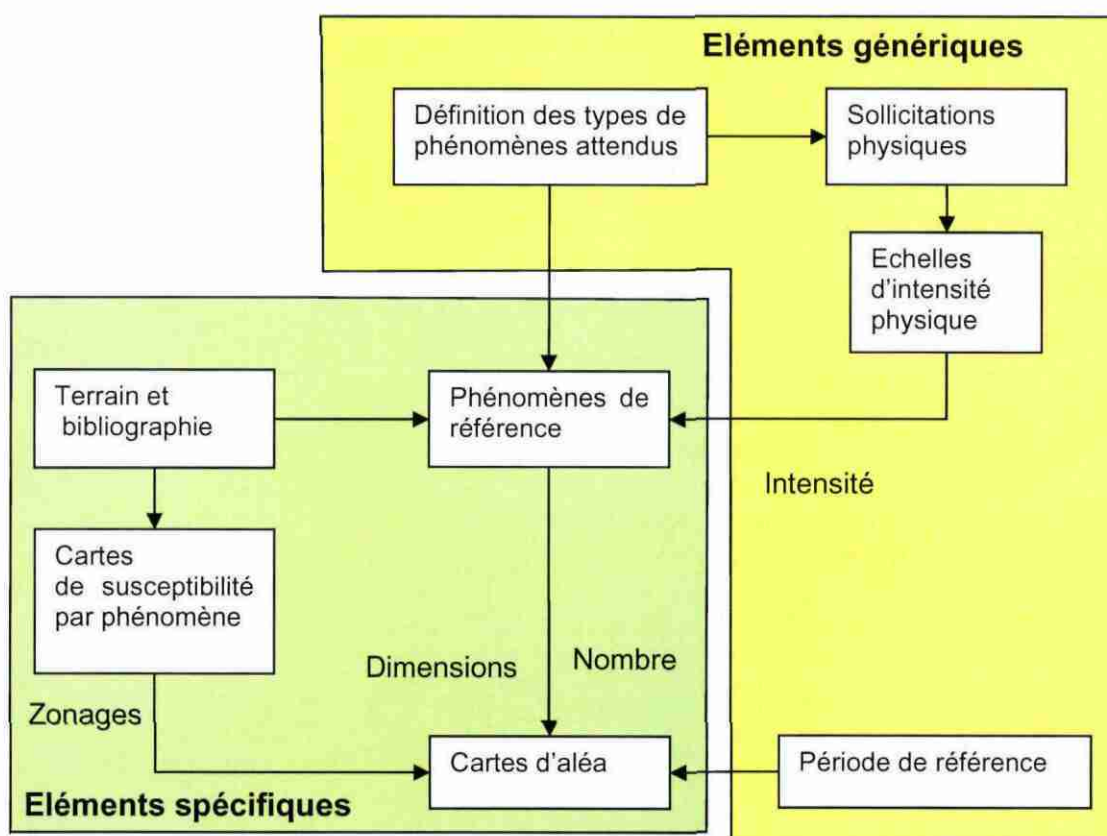


Illustration 4 : Schéma méthodologique de cartographie des aléas

Il faut souligner qu'une telle approche n'est légitime que dans la mesure où le contexte urbain implique une grande richesse dans la connaissance des phénomènes passés. Il faut souligner également qu'elle ne permet pas de prédire la localisation exacte des événements futurs.

Pour estimer l'impact des phénomènes, on privilégie, à nouveau, une approche statistique basée sur l'évaluation de la surface globale potentiellement impactée. Cette valeur est obtenue par le produit de la surface impactée moyenne du phénomène de référence et du nombre d'événements attendus sur chaque zone.

Cartographiquement, l'aléa peut alors être exprimé par le pourcentage de surface potentiellement affectée sur la période de référence.

A l'issue de cette étape, on dispose donc de plusieurs cartes d'aléa : une par phénomène de référence (c'est-à-dire exprimant une intensité unique par sollicitation) pour lesquelles, la fréquence est exprimée sous la forme du pourcentage de zones potentiellement affectées.

## **2.3. ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DES ENJEUX**

### **2.3.1. Catégories d'enjeux et échelles d'endommagement**

En préalable à toute analyse, il est indispensable de définir les catégories d'enjeux qui seront prises en compte.

Pour répondre aux objectifs fixés à ce type d'étude, tout en restant dans des limites budgétaires admissibles, ainsi que pour permettre d'obtenir des résultats reproductibles d'une agglomération sur l'autre, il nous semble important de limiter l'analyse des enjeux aux seuls éléments dont on puisse être assuré qu'une information exhaustive soit disponible dans tous les contextes. C'est le cas pour la population, le patrimoine bâti, la voirie ainsi que les espaces naturels.

Pour ces quatre grandes catégories d'éléments exposés, il est en effet possible de collecter des informations existantes « classiquement » dans toutes les agglomérations (données INSEE pour la population, Systèmes d'Information Géographique (SIG) des services techniques de la ville, photos aériennes, etc.).

A partir de ces informations, il est possible d'évaluer de manière indirecte le mobilier urbain (véhicules) qui présente une grande importance en termes de dommages vis-à-vis de plusieurs phénomènes (chutes de blocs et coulées boueuses par exemple).

Ce sont donc 5 grandes catégories d'éléments exposés qui sont prises en compte.

- la population,
- le patrimoine bâti,
- la voirie,
- les espaces naturels,
- le mobilier urbain (véhicules).

D'autres données, qui seraient éventuellement importantes, peuvent être nettement plus difficiles à obtenir et ne seront pas accessibles dans tous les cas (réseaux enterrés de distribution des fluides, activités économiques, infrastructures de transport privées (voies ferrées), etc.). Nous n'en tenons donc pas compte dans la méthode présentée ici.

Pour permettre d'évaluer les dommages de manière cohérente par rapport aux différentes sollicitations physiques, une échelle d'endommagement en 5 niveaux est définie, pour chacune des grandes catégories. Ces échelles d'endommagement sont traduites en termes d'impacts sur les valeurs humaines, fonctionnelles et économiques. A titre d'exemple, le Tableau 3 présente l'échelle d'endommagement établie pour la voirie. A noter, que dans cet exemple, la valeur humaine n'est pas prise en compte.

| Classe             | Endommagement                                                                                                                                                                                   |                                                             |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                    | Valeur fonctionnelle                                                                                                                                                                            | Valeur économique                                           |
| <b>Très faible</b> | Légères altérations n'impliquant pas d'interventions.                                                                                                                                           | Pas d'impact financier                                      |
| <b>Faible</b>      | Quelques fissures ou dégradations dans les revêtements. Pas d'interruption de trafic, éventuellement fonctionnement en mode dégradé (ralentissement, circulation alternée).                     | Pas d'impact financier ou impact financier peu significatif |
| <b>Moyen</b>       | Revêtement affecté de manière significative. Obstruction de la chaussée de faible volume (dizaine de m <sup>3</sup> ). Coupure momentanée (journée ou semaine), fonctionnement en mode dégradé. | Coût des travaux limités à 30% du coût de la reconstruction |
| <b>Fort</b>        | Rupture avec déplacements significatifs de la structure à plusieurs endroits. Obstruction de volume élevé (centaine de m <sup>3</sup> ). Coupure prolongée (semaines).                          | Coût des travaux limités à 70% du coût de la reconstruction |
| <b>Très fort</b>   | Déformations très importantes en plusieurs endroits, structure détruite totalement. Rupture de la plate-forme. Immersion définitive. Coupure prolongée (mois) voire définitive.                 | Reconstruction de la route nécessaire                       |

Tableau 3 : Echelle d'endommagement pour la voirie

L'emploi de ces échelles d'endommagement, ainsi que la prise en compte des 5 mêmes catégories d'enjeux permet d'assurer la reproductibilité de la méthode sur différents sites, dans des contextes variables.

### 2.3.2. Typologie des enjeux

Comme nous le verrons par la suite, l'analyse des enjeux implique d'une part d'évaluer la vulnérabilité des éléments exposés vis-à-vis des sollicitations physiques attendues et d'autre part de les recenser et de les cartographier en leur affectant une valeur.

Répondre à ces deux contraintes implique de regrouper les éléments exposés, pour chacune des grandes catégories retenues, suivant quelques « types » présentant des caractéristiques moyennes homogènes, en termes de vulnérabilité et de valeurs. Ces caractéristiques, qui doivent correspondre à la réalité locale de chaque contexte, doivent être pertinentes par rapport à notre problématique.

Dans la mesure où il sera nécessaire de procéder à une analyse spécifique par type d'enjeu et pour rester dans des limites budgétaires admissibles, nous proposons de limiter le nombre de types d'enjeux retenus à partir des cinq grandes catégories retenues.

A titre d'exemple, la voirie peut être distinguée suivant deux types, présentés dans le Tableau 4.

|    |                                                                   |
|----|-------------------------------------------------------------------|
| R1 | Routes de viabilité médiocre (1 voie à deux voies étroites)       |
| R2 | Routes de bonne à très bonne viabilité (2 voies larges à 4 voies) |

Tableau 4 : Exemples de types de voirie retenus

C'est pour le bâti, qu'il semble nécessaire d'aller le plus loin dans la discrimination des types.

La typologie présentée ici (cf. chapitre 4 « Analyse des enjeux ») nous semble susceptible de couvrir l'essentiel des situations possibles dans la France métropolitaine et d'assurer ainsi une reproductibilité satisfaisante pour l'application de la méthode dans différents contextes. Il n'en reste pas moins que cette typologie est susceptible d'adaptations pour répondre à des spécificités éventuelles. Dans tous les cas, il paraît cependant plus raisonnable de se limiter à moins d'une vingtaine de types différents.

### 2.3.3. Fonctions de vulnérabilité

Pour chacun des types d'enjeux définis, on précise les caractéristiques physiques permettant de déterminer la vulnérabilité.

La fonction de vulnérabilité est établie pour chacune des sollicitations physiques retenues. Un niveau d'endommagement (établi à partir de l'échelle générique d'endommagement de la catégorie d'enjeu correspondante) est déterminé pour chacune des valeurs d'intensités (établie à partir des échelles d'intensité physiques).

Le Tableau 5 présente à titre d'exemple, la fonction de vulnérabilité établie pour les deux types de voirie présentés ci-dessus et relatives aux sollicitations liées aux chutes de blocs.

| <b>Sollicitation = Accumulation</b> | <b>R1</b> | <b>R2</b> |
|-------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Intensité</b>                    |           |           |
| <b>Faible</b>                       | faible    | faible    |
| <b>Moyenne</b>                      | moyen     | moyen     |
| <b>Forte</b>                        | fort      | fort      |
| <b>Très forte</b>                   | très fort | très fort |

| <b>Sollicitation = Impact</b> | <b>R1</b>   | <b>R2</b>   |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| <b>Intensité</b>              |             |             |
| <b>Faible</b>                 | très faible | très faible |
| <b>Moyenne</b>                | faible      | faible      |
| <b>Forte</b>                  | moyen       | moyen       |
| <b>Très forte</b>             | fort        | fort        |

Tableau 5 : Exemple de fonction de vulnérabilité établie pour deux types de voirie

On constate dans cet exemple, qu'à intensité égale, la vulnérabilité est similaire pour les deux types de voirie (R1 et R2). La différence en termes de niveau d'endommagement sera donc uniquement associée à la différence de valeur de l'endommagement entre les deux types.

#### 2.3.4. Cartographie des enjeux et analyse de la valeur

A partir des données disponibles (Données INSEE, Système d'Information Géographique (SIG) des services techniques, photographies aériennes, contrôles de terrain, ...), il est possible d'effectuer un recensement des enjeux, en évaluant, dans le même temps, la répartition entre les différents types retenus.

**Une carte de recensement des enjeux** est rédigée pour chacune des grandes catégories retenues (le détail des modes de réalisation est présenté dans le chapitre 4 « Analyse des enjeux »). A titre d'exemple, pour le bâti, la cartographie peut être réalisée en croisant d'une part les polygones « bâti » disponibles dans le SIG aux photos aériennes (ou aux orthophotos quand elles sont disponibles) pour délimiter des secteurs d'urbanisation homogènes. Ce travail doit être impérativement validé par des contrôles terrain systématiques.

La finalité de telles études vise la hiérarchisation des villes (ou de quartiers) en termes de risques liés aux mouvements de terrain. Cette hiérarchisation implique de prendre en compte les différentes catégories d'enjeux vues ci-dessus. Or chacun d'eux peut être caractérisé par différentes valeurs : humaine, économique, fonctionnelle, sociale, environnementale, patrimoniale, etc. Pour permettre la comparaison entre des secteurs géographiques différents, il est, cependant, indispensable de ramener, autant que faire se peut, l'ensemble des valeurs à un référent unique.

De ce point de vue, la valeur économique a été privilégiée. L'objectif principal de l'analyse du risque est donc d'exprimer, dans une carte unique, les dommages attendus sur les 100 prochaines années en Euros, par hectare, tous phénomènes et

tous types d'enjeux confondus ; le cumul des montants ainsi cartographiés permettant la hiérarchisation des secteurs.

Cette approche pose, bien évidemment, la question du prix de la valeur humaine. Nous proposons d'adopter, dans ce sens, les chiffres établis par le Commissariat Général du Plan (Boiteux et Baumstark 2001).

L'analyse de la valeur des infrastructures se fait essentiellement par enquête. Il s'agit de déterminer le prix unitaire des différents enjeux (mètre linéaire de voirie, prix au m<sup>2</sup> de la surface bâtie). De la même manière, on prend en compte le prix au m<sup>2</sup> des terrains non construits.

Une approche strictement économique rend cependant difficile la prise en compte des impacts environnementaux sur les milieux naturels. Ceux-ci, dans tous les cas restent difficiles à quantifier ; comment comparer la valeur environnementale de deux zones naturelles ? Nous proposons donc d'évaluer les dommages environnementaux par rapport à la seule surface potentiellement affectée. Cette approche correspond, de fait, à considérer une vulnérabilité binaire pour les milieux naturels vis-à-vis des différentes sollicitations.

L'ensemble de la méthode pour l'analyse des enjeux est schématisé, ci-dessous, dans l'illustration 5.

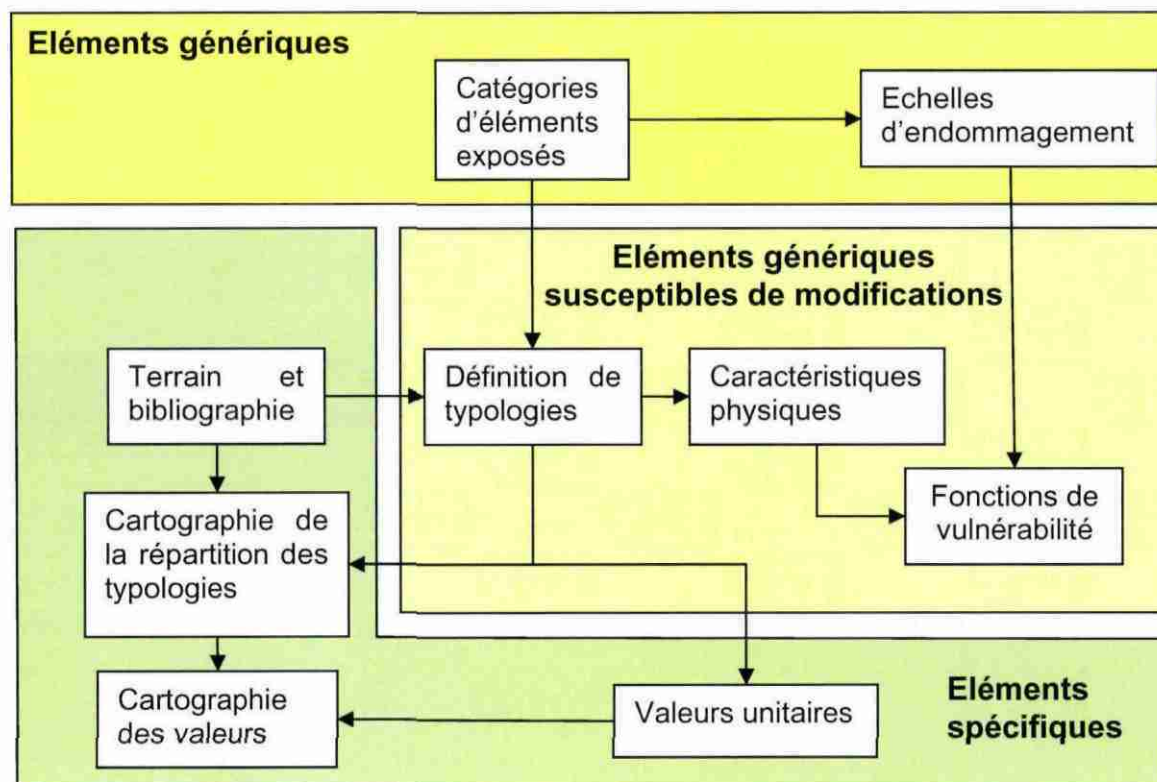


Illustration 5 : Schéma méthodologique d'analyse des enjeux

Il est à noter que, alors que les catégories d'enjeux et les échelles d'endommagements établies sont des éléments génériques de la méthode présentée ici, les typologies des enjeux, leurs caractéristiques physiques ainsi que les fonctions de vulnérabilité sont des éléments génériques, mais susceptibles d'être modifiés « à la marge » selon le contexte local. Les valeurs unitaires des enjeux et les cartographies sont quant-à-eux des éléments spécifiques, propres à chaque étude.

## 2.4. CARTOGRAPHIE DU RISQUE

A l'issue de ces études, on dispose :

- pour chacun des phénomènes de référence :
  - d'une carte de zonage de l'aléa exprimé en pourcentage de surface potentiellement affectée dans chaque zone. Pour chaque carte, les différentes sollicitations du phénomène correspondent, chacune, à une intensité spécifique. Ce sont donc environ 10 cartes d'aléas qui sont disponibles ;
- pour chacune des catégories d'enjeux :
  - d'une carte d'enjeux, exprimée en termes de nombre d'éléments exposés de chaque type défini dans cette catégorie par zone urbanistique homogène. La valeur économique cumulée est obtenue par la multiplication du nombre d'élément de chaque type par les valeurs unitaires correspondantes. Il en résulte 5 cartes d'enjeux ;
  - de fonctions de vulnérabilité, spécifiques à chaque type d'enjeux. Ces fonctions permettent de déterminer le niveau maximal d'endommagement suivant les différentes sollicitations de chacun des phénomènes de référence.

Le croisement systématique de ces différentes données permet ensuite d'évaluer le niveau de dommage, par catégorie d'enjeu et par phénomène de référence.

Cette opération est réalisée cartographiquement en découpant les polygones de la carte de la catégorie d'enjeux considérée, successivement, par les polygones des différentes cartes des aléas. Les valeurs économiques et le nombre d'éléments exposés sont calculés par polygone redécoupé par rapport au polygone initial. A noter que pour l'aléa, le problème de répartition ne se pose pas puisque celui-ci est exprimé en pourcentage de surface au sein d'un polygone.

Ce traitement systématique conduit à réaliser, de fait, de l'ordre d'une cinquantaine de cartes de risque (5 cartes adressant chacune une catégorie d'enjeux croisée successivement avec les 10 cartes d'aléa réalisées, correspondantes à chacun des phénomènes de référence retenus).

On évalue ensuite pour chacune de ces cartes, le niveau de dommages en reprenant, pour chacun des types de la catégorie d'enjeux, le niveau maximal d'endommagement déterminé entre les différentes fonctions de vulnérabilité associées à chacune des sollicitations du phénomène de référence pris en compte.

Le principe suivi est présenté dans l'illustration 6.

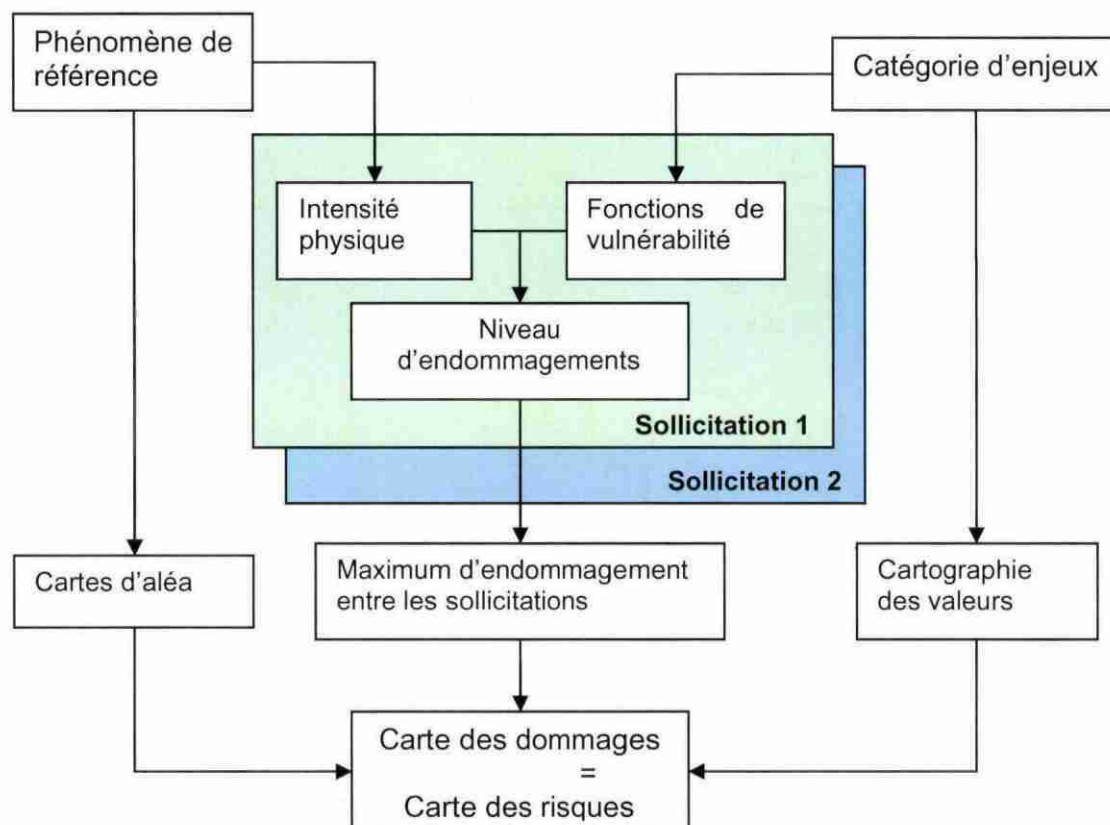


Illustration 6 : Schéma méthodologique de cartographie des dommages par phénomène de référence et par catégorie d'enjeux

Il s'agit, ensuite, de compiler l'ensemble des cartes de dommages sur un support cartographique unique. Comme la réglementation française fait obligation aux villes d'une certaine importance d'élaborer un Plan Local d'Urbanisme (PLU), notre méthode propose de conserver ce zonage urbanistique pour servir de base à la représentation cartographique des dommages.

Une telle approche conduit à appréhender simultanément les dommages à la population et aux infrastructures. Elle ne permet pas, cependant, de bien identifier les risques pour la vie humaine. Il est donc proposé de rédiger 3 cartes complémentaires :

- Carte des dommages cumulés toutes catégories d'enjeux confondues, comme présentée ci-dessus ;
- Carte des dommages cumulés aux seules infrastructures ;
- Carte de danger pour la vie humaine (secteurs où l'intensité physique attendue des phénomènes de référence est susceptible d'être à l'origine de mortalité).

## **2.5. LIMITES ET INCERTITUDES**

### **2.5.1. Principes et limites**

La méthode présentée vise à évaluer le cumul des dommages attendus sur le prochain siècle dans une zone urbanisée. Un objectif aussi prospectif amène à fixer un certain nombre de principes :

- Les modalités du changement climatique ne sont pas prises en compte. Ce point est important, dans la mesure où la pluviosité constitue un facteur déclenchant pour la plupart des phénomènes considérés. Une variation significative de cette pluviosité dans les prochaines décennies pourra amener à modifier les périodes de retour envisagées et, donc, avoir un impact direct sur le niveau de dommage réel. L'outil méthodologique développé peut cependant servir de base à l'élaboration de scénarios pour rendre compte des impacts du changement climatique ;
- Compte tenu de la contradiction entre le rythme d'évolution des activités économiques et l'approche prospective de la méthode (période de référence de 100 ans), il ne semble pas réaliste d'intégrer cet aspect dans la méthodologie et dans les études futures ;
- De la même manière, devant le caractère évolutif de l'environnement urbain, il a été décidé d'envisager l'aléa en fonction de la nature des terrains et non selon leur occupation actuelle. On considère, de ce fait, que des secteurs actuellement « protégés » par une urbanisation dense pourront être à nouveau exposés par une modification de l'occupation des sols dans le futur.
- Les coûts unitaires ainsi que le recensement des enjeux sont considérés comme « figés » dans leur état actuel.

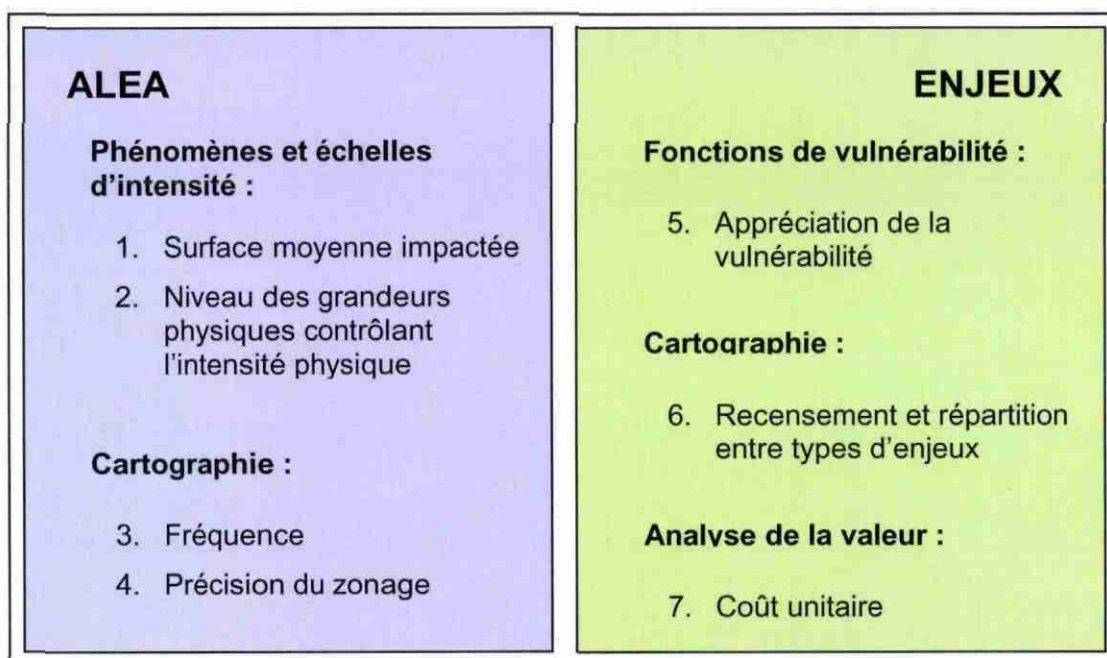
Par ailleurs, différentes limites ont été fixées pour permettre de rester dans une enveloppe budgétaire acceptable :

- Limitation des catégories d'enjeux et prise en compte des seules valeurs économiques et, dans une moindre mesure, environnementales ;
- La présence d'établissements remarquables (écoles, hôpitaux, etc.) n'est prise en compte qu'en termes statistiques, en compléments pour appuyer la hiérarchisation des enjeux ;
- Pour les enjeux retenus, certaines données ne sont pas disponibles (par exemple, ratio entre personnes à l'air libre et personnes dans les bâtiments). L'option prise consiste à déterminer des valeurs arbitraires plausibles, en explicitant clairement les choix réalisés.

## 2.5.2. Evaluation de l'incertitude

Comme indiqué dans les paragraphes précédents, l'ensemble de la méthodologie demande de fixer des définitions, des valeurs, des échelles et fonctions... entachées d'une incertitude qu'il est nécessaire, maintenant, d'évaluer.

Pour l'évaluation de cette incertitude, il convient avant tout de passer en revue les différentes composantes de l'analyse afin d'identifier leur sensibilité par rapport aux résultats. On retient ainsi 7 paramètres principaux contrôlant la méthode (cf. Illustration 7).



*Illustration 7 : Paramètres contrôlant l'incertitude*

L'incertitude est exprimée au travers de 5 classes, chacune associée à un facteur multiplicatif pouvant prendre l'une des valeurs suivantes : 1 / 1,5 / 2 / 5 / 10. Un facteur de 1 est affecté à un paramètre que l'on estime fiable ; le facteur 10 correspond à une incertitude extrême : la valeur réelle pourrait se révéler 10 fois plus grande ou 10 fois plus petite que celle retenue.

Pour chaque phénomène de référence, on affecte une classe d'incertitude à chacun des 7 paramètres identifiés.

A partir de là, l'analyse de l'incertitude a été conduite suivant deux approches :

- une approche globale, où, pour chacun des paramètres, on considère *simultanément* la classe maximale (ou minimale) retenue par phénomène. On détermine ainsi un facteur multiplicatif global de l'incertitude, donnant les bornes extrêmes des dommages provoqués. Cette approche maximise

cependant l'incertitude et il est nécessaire de relativiser une telle analyse. En effet, pour estimer les différents paramètres du risque, la méthode fait appel à des valeurs moyennes constituées à partir d'une population d'événements ou d'enjeux. Il ne paraît pas raisonnable d'envisager que de telles populations moyennes soient systématiquement constituées à partir des valeurs extrêmes ;

- une approche par analyse de sensibilité, où l'on ne fait varier qu'un paramètre à la fois. Par phénomène de référence, on prend, tour à tour, pour chacun des 7 paramètres la valeur maximale puis minimale. Et on recalcule dans chaque cas le niveau de dommages général correspondant à la valeur fixée. On obtient ainsi 7 valeurs de dommages « maximales » et 7 valeurs « minimales ». On identifie ainsi les paramètres les plus sensibles sur lesquels il conviendra de raffiner, si nécessaire, l'analyse.



## 3. Cartographie de l'aléa

### 3.1. ECHELLES D'INTENSITES PHYSIQUES

Sous la dénomination de « mouvements de terrain », on observe des phénomènes aux mécanismes et aux dimensions variés. La caractérisation de ces phénomènes passe par la définition de la nature de la (ou des) sollicitation(s) que ces mouvements exercent sur les éléments qui y sont exposés. On réalise alors une décomposition, ou « discrétisation », du phénomène en sollicitations élémentaires.

Suite à cette caractérisation, et afin de pouvoir classer, les uns par rapport aux autres, des événements de même type, survenus à des dates et/ou en lieux différents, sans tenir compte des enjeux qui y sont confrontés, des échelles d'intensités physiques doivent être mises en place.

#### 3.1.1. Décomposition en sollicitations élémentaires

D'un point de vue bibliographique, le travail le plus important réalisé dans cette optique est le travail de thèse de Léone (1996). Nous avons repris en grande partie ce travail, avec quelques modifications pour l'adapter au contexte urbain et aux connaissances actuelles.

Par analogie aux séismes, et afin de simplifier l'analyse de l'interaction entre les éléments exposés et les phénomènes naturels considérés, on cherche à réduire ces derniers à la seule expression de la nature de la (ou des) sollicitation(s) qu'ils exercent. On distingue 6 classes de sollicitations :

- déplacement horizontal,
- déplacement vertical,
- poussée,
- impact,
- accumulation,
- ablation (ou affouillement), résultat d'une érosion.

A partir de ces 6 classes de sollicitations, l'ensemble des phénomènes de mouvements de terrain peuvent être entièrement explicités ; cette décomposition est résumée dans le Tableau 6.

Cette discrétisation établit les zones dans lesquelles les effets sont sollicités (zone de départ, de réception...). On pourrait donc ainsi s'intéresser à l'extension du phénomène de manière plus précise.

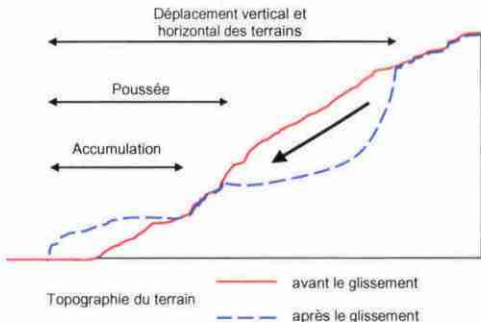
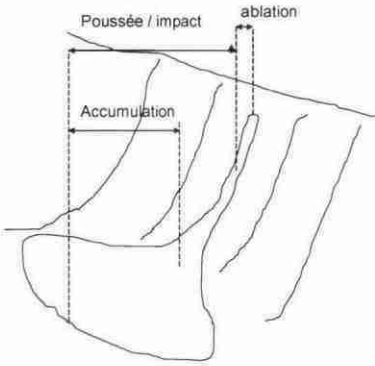
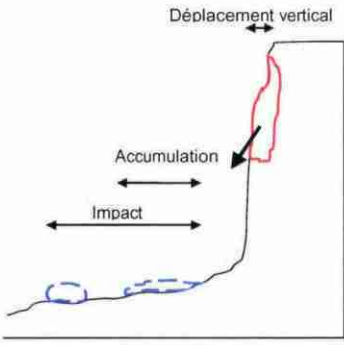
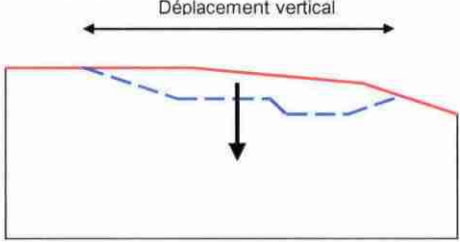
| Phénomène                                                                                                                             | Sollicitations associées                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Glissement de terrain</b></p>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Déplacement horizontal</li> <li>- Déplacement vertical</li> <li>- Poussée latérale et frontale</li> <li>- Accumulation, enfouissement</li> </ul>       |
| <p><b>Coulées de boue</b></p>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ablation (uniquement dans la zone de départ de la coulée)</li> <li>- Accumulation</li> <li>- Impact</li> <li>- Poussée latérale et frontale</li> </ul> |
| <p><b>Chute de blocs / Ecoulement rocheux</b></p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Déplacement vertical (uniquement dans la zone de départ)</li> <li>- Impact</li> <li>- Accumulation</li> </ul>                                          |
| <p><b>Affaissement / Effondrement</b></p>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Déplacement vertical</li> </ul>                                                                                                                        |

Tableau 6 : Décomposition en sollicitations physiques élémentaires des phénomènes de mouvement de terrain

### 3.1.2. Echelles d'intensité

Une fois les phénomènes décomposés en sollicitations élémentaires, il est nécessaire de quantifier celles-ci pour obtenir une mesure de l'intensité physique du phénomène, indépendante des dommages produits. En effet, dans les quelques études qui ont traité ce sujet, on trouve régulièrement une mesure de l'intensité des phénomènes basée, parfois exclusivement, sur l'observation des dommages sur des types d'enjeu standards. Dans la mesure où nous nous intéressons aux dommages provoqués sur différentes catégories d'enjeux, une telle approche ne peut être appliquée.

De manière, également, à pouvoir généraliser cette étude à toutes les zones urbaines françaises, il est impératif de se détacher de la notion de dommages aux enjeux, et d'exprimer les sollicitations physiques élémentaires uniquement au travers de paramètres cinématiques et géométriques (les effets physiques).

Les paramètres décrivant chacune des sollicitations sont présentés dans le Tableau 7.

Ainsi, la sollicitation *Déplacement horizontal* sera décrite au moyen des 3 paramètres : vitesse du mouvement, amplitude du mouvement et importance du champ de déformation.

| <b>Sollicitation</b>          | <b>Paramètres cinématiques et géométriques (effets physiques)</b>                                              |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Déplacement vertical          | Vitesse du mouvement<br>Amplitude du mouvement (distance de déplacement)<br>Importance du champ de déformation |
| Déplacement horizontal        | Vitesse du mouvement<br>Amplitude du mouvement (distance de déplacement)<br>Importance du champ de déformation |
| Poussées latérale et frontale | Hauteur des matériaux en poussée                                                                               |
| Impact                        | Energie cinétique                                                                                              |
| Accumulation                  | Hauteur des matériaux accumulés                                                                                |
| Ablation                      | Profondeur de l'ablation                                                                                       |

Tableau 7 : Sollicitations et paramètres de description associés

L'importance du champ de déformation est un critère qualitatif décomposé en 4 classes d'intensité croissante : nul à faible, moyen, fort, très fort. Il exprime le niveau de conservation de la surface d'origine suite au phénomène naturel. Ce niveau peut varier entre une surface et un état des matériaux bien conservés (champ de déformation faible à nul) jusqu'à une désorganisation totale (champ de déformation très fort) correspondant, par exemple, à l'état d'une coulée boueuse. La valeur du champ de déformation dépend notamment de la vitesse des déplacements, de la géométrie et profondeur de la surface de rupture ainsi que de la nature des terrains en mouvement.

On peut souligner que, pour la majorité des sollicitations, un paramètre physique unique suffit pour décrire le pouvoir destructeur associé.

Une échelle d'intensité comprenant quatre niveaux (faible, moyen, fort, très fort) est établie pour chaque effet physique. A chacun des niveaux correspond une grandeur physique. Cette valeur numérique est établie à partir des données disponibles dans la littérature (cf. § 1.4) et d'après notre expérience. Le Tableau 8 présente les échelles d'intensité des sollicitations « accumulation », « poussée », « impact » et « ablation », sollicitations décrites au moyen d'un seul paramètre physique.

| <b>Sollicitation<br/>/ Effet<br/>physique</b> | <b>Accumulation<br/>/ Hauteur<br/>accumulée</b> | <b>Poussée /<br/>Hauteur de<br/>la masse</b> | <b>Impact /<br/>Energie<br/>cinétique</b> | <b>Ablation /<br/>Profondeur<br/>d'ablation</b> |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Intensité</b>                              |                                                 |                                              |                                           |                                                 |
| <b>Faible</b>                                 | 5 cm                                            | 5 cm                                         | 0,1 kJ                                    | 0,5 m                                           |
| <b>Moyenne</b>                                | 50 cm                                           | 50 cm                                        | 1 kJ                                      | 2 m                                             |
| <b>Forte</b>                                  | 1 m                                             | 1 m                                          | 10 kJ                                     | 10 m                                            |
| <b>Très forte</b>                             | 3 m                                             | 3 m                                          | 100 kJ                                    | 50 m                                            |

Tableau 8 : Valeurs numériques des classes d'intensité des sollicitations Accumulation, Poussée, Impact et Ablation

Pour les deux sollicitations décrites au moyen de plusieurs paramètres (déplacement horizontal et vertical), les échelles d'intensité doivent être synthétiques, c'est-à-dire qu'elles doivent tenir compte simultanément de l'ensemble de ces paramètres.

Pour établir ces échelles synthétiques, on définit tout d'abord les classes de valeur des effets seuls (Tableau 9).

| <b>Sollicitation<br/>Effet<br/>physique</b> | <b>Déplacement vertical ou horizontal</b> |                |              |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|--------------|
| <b>Classe</b>                               | <b>Amplitude</b>                          | <b>Vitesse</b> | <b>Champ</b> |
| <b>1</b>                                    | 1 cm                                      | 1 cm/an        | Nul à faible |
| <b>2</b>                                    | 5 cm                                      | 2 cm/an        | Moyen        |
| <b>3</b>                                    | 50 cm                                     | 0,5 mm/j       | Fort         |
| <b>4</b>                                    | 5 m                                       | 1 mm/s         | Très fort    |

Tableau 9 : Classes de valeur des paramètres de description des sollicitations Déplacements

Le principe retenu pour relier ces classes de valeurs à l'intensité se base sur l'analyse successive des différents effets, par ordre d'importance décroissante. Pour les déplacements verticaux et horizontaux, le mode d'établissement de l'échelle synthétique est présenté dans le Tableau 10. Pour ces deux types de déplacement, l'amplitude (distance de déplacement) représente le paramètre prédominant. Une faible amplitude (classe 1) ne peut donc induire qu'une faible intensité. La vitesse constitue le deuxième paramètre déterminant. Pour une amplitude de classe 2, une

vitesse faible (classe 1 ou 2) laisse une intensité faible quelque soit la valeur du champ de déformation. Une vitesse plus importante (classe 3) conduit à déterminer une intensité moyenne. La valeur du champ de déformation n'est discriminante que pour les fortes intensités.

| Sollicitation : Déplacement vertical |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   | Intensité |         |       |            |
|--------------------------------------|---|---|---|---------|---|---|---|-------|---|---|---|-----------|---------|-------|------------|
| Amplitude                            |   |   |   | Vitesse |   |   |   | Champ |   |   |   | Faible    | Moyenne | Forte | Très forte |
| Classe 1                             | 2 | 3 | 4 | 1       | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 |           |         |       |            |
| X                                    |   |   |   | X       | X | X | X | X     | X | X | X | X         |         |       |            |
|                                      | X |   |   | X       | X |   |   | X     | X | X | X | X         |         |       |            |
|                                      | X |   |   |         |   | X |   | X     | X | X | X |           | X       |       |            |
|                                      | X |   |   |         |   |   | X | X     | X | X | X |           |         | X     |            |
|                                      |   | X |   | X       | X |   |   | X     | X |   |   |           | X       |       |            |
|                                      |   | X |   | X       | X |   |   |       |   | X | X |           |         | X     |            |
|                                      |   | X |   |         |   | X | X | X     | X | X | X |           |         | X     |            |
|                                      |   |   | X | X       | X |   |   | X     | X |   |   |           |         | X     |            |
|                                      |   |   | X | X       | X |   |   |       |   | X | X |           |         |       | X          |
|                                      |   |   | X |         |   | X | X | X     | X | X | X |           |         |       | X          |

Tableau 10 : Echelle d'intensité de la sollicitation « Déplacement vertical ou horizontal »

Deux autres paramètres doivent être pris en compte pour évaluer le niveau de dommages : l'extension des phénomènes et la profondeur de la surface de rupture.

### 3.1.3. Echelles d'intensité de l'extension et de la profondeur de la surface de rupture

L'extension surfacique d'un phénomène n'est pas en tant que tel une sollicitation nécessaire à la détermination de l'intensité de ce phénomène. Néanmoins, confrontée à l'intensité de certaines sollicitations, c'est un paramètre déterminant pour l'évaluation de l'endommagement.

Une échelle d'intensité de l'extension a donc été établie ; elle est présentée dans le Tableau 11 ci-dessous.

|           | Extension latérale |
|-----------|--------------------|
| Faible    | 1 m                |
| Moyen     | 3 m                |
| Fort      | 10 m               |
| Très fort | 50 m               |

Tableau 11 : Echelle d'intensité de l'extension

La profondeur de la surface de rupture n'entre pas en jeu dans la détermination de l'intensité du phénomène, mais dans la confrontation aux enjeux ; en effet vis-à-vis des fondations des bâtiments, l'effet d'une surface de rupture à 10 m de profondeur sera différent pour une maison individuelle aux fondations superficielles et pour un immeuble aux fondations profondes.

L'échelle d'intensité de la profondeur de la surface de rupture est présentée ci-dessous.

|                  | <b>Profondeur de la surface de rupture</b> |
|------------------|--------------------------------------------|
| <b>Faible</b>    | 0,5 m                                      |
| <b>Moyen</b>     | 2 m                                        |
| <b>Fort</b>      | 10 m                                       |
| <b>Très fort</b> | 50 m                                       |

Tableau 12 : Echelle d'intensité de la profondeur de la surface de rupture

### 3.2. DEFINITION DE PHENOMENES DE REFERENCES

A partir d'une analyse bibliographique approfondie et d'enquêtes notamment auprès des collectivités et services techniques de la ville concernée, complétées par des observations sur le terrain, un recensement, non exhaustif mais aussi complet que possible, des phénomènes mouvements de terrain se produisant sur la zone d'étude est réalisé. A partir de ce recensement, il devient possible de définir quelques principaux types de phénomènes représentatifs de l'ensemble des différents événements susceptibles de se produire sur la zone d'étude. On parle alors de « phénomènes de référence. »

La typologie des phénomènes de référence est à adapter au contexte géologique ou morphologique local.

Chaque phénomène de référence doit être défini par des caractéristiques moyennes (géométrie, vitesse, volume, ..) qui vont, d'une part, conditionner l'extension de la surface impactée par l'évènement et d'autre part permettre de définir l'intensité des sollicitations produites. Cette intensité est évaluée par confrontation des caractéristiques moyennes spécifiques retenues pour le phénomène de référence, et de la décomposition en sollicitations puis en effets physiques élémentaires et des échelles d'intensité définies de manière générique (cf. § 3.1).

La détermination de ces dimensions moyennes peut se faire à partir de l'expertise réalisée sur le terrain, mais elle pourra efficacement s'inspirer des paramètres prévus dans la base de données nationale sur les mouvements de terrain BDMVT [www.bdmvt.net](http://www.bdmvt.net) (Mirgon et al. 2001)

Par exemple, sur une zone d'étude donnée, on peut être amené à définir un phénomène de référence du type « chute de pierre » ; ce phénomène se révélant être

récurrent sur la zone d'étude. Dans cet exemple, les caractéristiques retenues peuvent être le volume des éléments mobilisés (inférieur au  $\text{dm}^3$ ), la hauteur de la chute, l'étendue longitudinale et latérale maximum attendue pour un tel événement (Illustration 8).

La surface impactée par ces événements peut être directement déduite de ces dimensions moyennes du phénomène.

L'énergie cinétique caractérisant la puissance de l'impact, tout comme l'effet d'accumulation, sera également fonction de la masse mise en mouvement. Les intensités correspondantes pourront être définies à partir de ces valeurs.

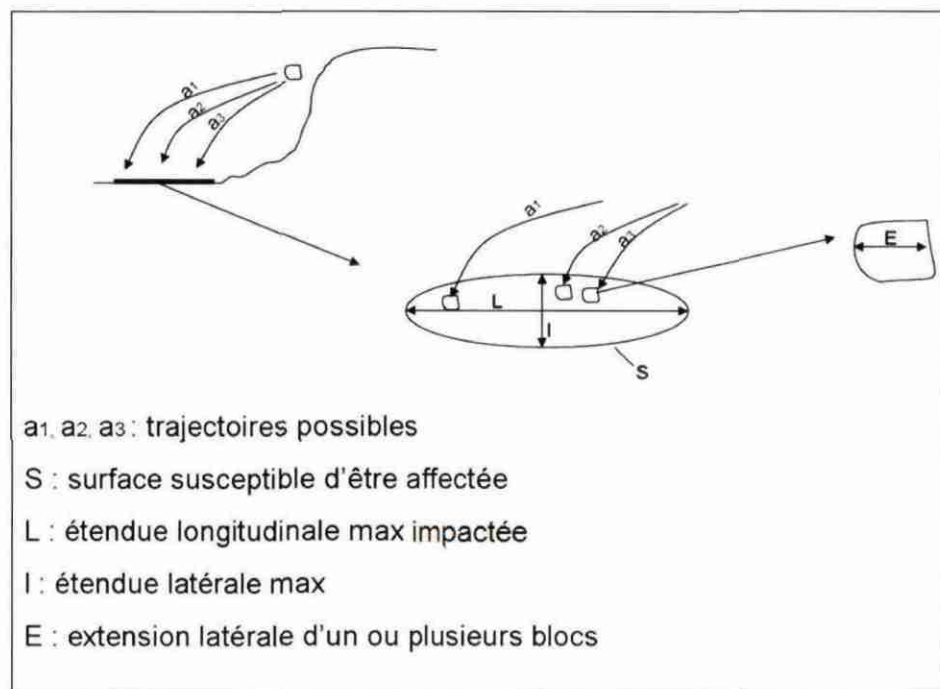
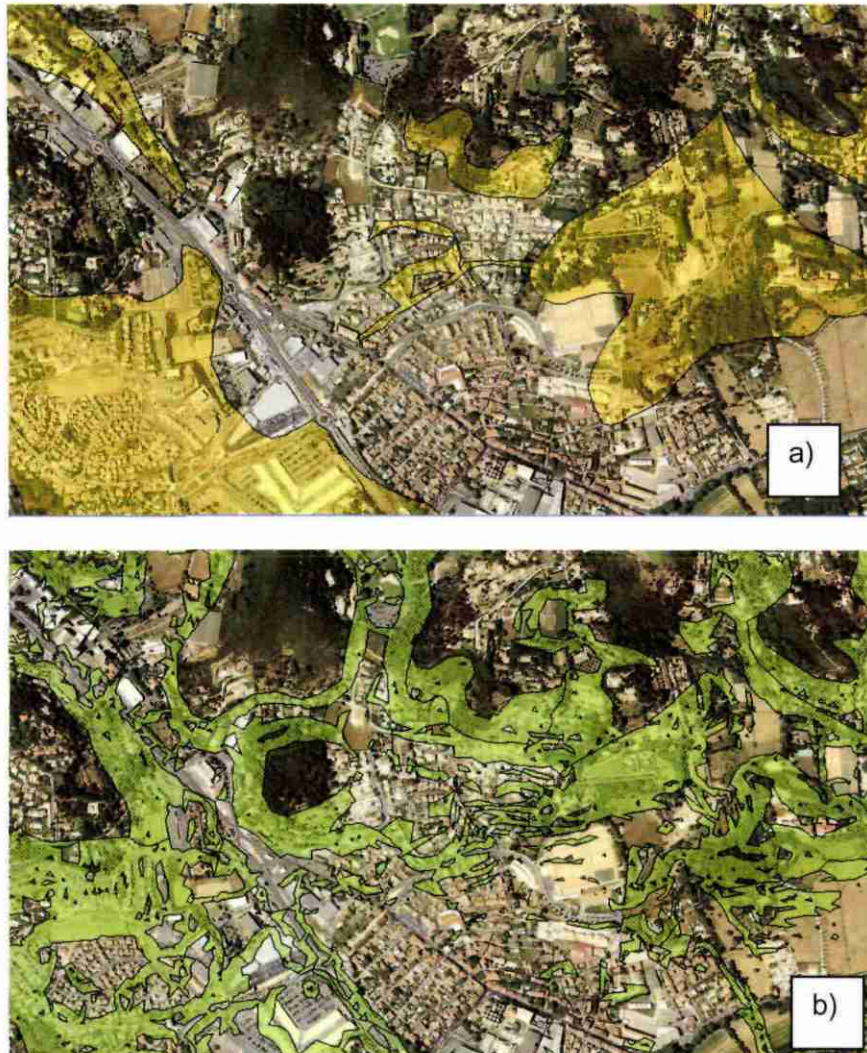


Illustration 8 : Exemple d'une caractérisation de la géométrie d'une chute de blocs

Le nombre de phénomène de référence défini sur la zone d'étude doit être relativement restreint (une dizaine environ) et caractériser au mieux l'ensemble des événements observables sur le terrain.

### 3.3. CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE

Dans une première étape cartographique, il s'agit de déterminer les secteurs où les différents phénomènes de référence, définis ci-dessus, sont susceptibles de se produire, indépendamment de toute notion de fréquence. On réalise donc une carte de susceptibilité par phénomène de référence (cf. Illustration 9).



*Illustration 9 : Exemples de cartes de susceptibilité pour deux phénomènes de référence différents a) affaissement de faible ampleur b) fluage*

L'occurrence (survenance) d'un mouvement de terrain est déterminée par un certain nombre de facteurs, classés en :

- facteurs permanents (nature géologique des terrains, relief et pente, état d'altération du sol, ...) ;
- dans les zones les plus défavorables, on note la présence de facteurs aggravants (concentration d'eau souterraine, débit en aval pendage des fractures ou de la schistosité...) ;
- facteurs déclenchant (pluviométrie exceptionnelle, vibrations, travaux en fouilles mal réalisés, ...) à l'origine de l'occurrence de l'évènement.

Les facteurs permanents ou aggravants conditionnent la répartition spatiale des mouvements de terrain et donc la cartographie de susceptibilité. La caractérisation de ces facteurs est basée sur des observations de terrain et sur la combinaison des cartes de répartition des différents paramètres.

Ces différents paramètres sont fournis par :

- la carte géologique interprétée

L'analyse de la carte géologique disponible sur la zone d'étude (soit à l'échelle du 1 / 50 000 (carte éditée par le BRGM), soit à une échelle plus précise), permet d'identifier les formations géologiques sensibles à l'apparition des phénomènes de référence. L'identification de ces formations géologiques sensibles est réalisée à partir d'une part du nombre d'évènements de ce type qui se sont produits au sein de cette formation et, d'autre part, de la description géologique des faciès permettant d'apprécier la « tenue » des formations (lithologie meuble ou rocheuse, stratigraphie, consistance, granulométrie, densité de discontinuités propres à la formation...).

- la carte des pentes

La carte des pentes est prépondérante pour la détermination des zones de départ potentiel. Elle est réalisée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT). Il est primordial de disposer d'un MNT adapté à l'échelle de l'étude, ici le 1 / 25 000. Le MNT de base utilisé peut être le MNT de l'Institut Géographique National fourni au pas de 50 m à recalculer en utilisant des points topographiques supplémentaires (courbes de niveau digitalisées, point de nivellement de voirie, ..). Un seuil de pente naturelle au-delà duquel les mouvements de terrains sont susceptibles de se produire est estimé pour chaque formation litho-stratigraphique. Cette estimation est réalisée à partir de l'expertise terrain et de la connaissance du contexte géomorphologique.

- le modèle de drainage

Les eaux de ruissellement sont responsables, notamment lors d'épisodes pluvieux violents, du mode de propagation (glissement ou coulée de boue) en arrachant des matériaux dans les talwegs. Les matériaux déstructurés susceptibles d'être mobilisés par des écoulements de surface ou par une saturation importante du sol se situent principalement dans les talwegs (même peu marqués). La localisation de ces talwegs est approchée par le calcul du système de drainage réalisé à partir du MNT. Ce calcul utilise des fonctions hydrologiques qui permettent de reconstituer le cheminement de l'eau de surface, aboutissant à la construction d'un ensemble d'arborescences. Au final, seuls les talwegs susceptibles de générer des mouvements de terrain type « coulées boueuses » sont sélectionnés (critères de sélection géométrique et morphologique).

- la carte topographique

Les cartes au 1 / 25 000 de l'IGN fournissent de nombreuses informations. Ces cartes permettent notamment de localiser les barres rocheuses, les zones d'éboulis, les talwegs peu prononcés et donnent des renseignements sommaires sur l'occupation du sol.

- la carte des cavités souterraines connues

Cette carte est à établir à partir de données existantes collectées auprès des services concernés (mairie, Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement,...). Il s'agit de réaliser la cartographie des cavités souterraines soit d'origine anthropique (anciennes carrières, galerie...) soit d'origine naturelle (gour, karst...). Les emprises de ces cavités souterraines étant des zones où il est certain que des effondrements peuvent se produire.

A partir de ces données, les cartes de susceptibilité vont être réalisées pour chaque phénomène de référence. Les modalités vont varier en fonction du type de mouvements de terrain :

- pour les mouvements gravitaires type glissements de terrain et chutes de blocs : la carte de susceptibilité à l'apparition d'un phénomène donné est réalisée en combinant la carte des formations géologiques sensibles au phénomène considéré avec la carte des pentes.

- pour les phénomènes de types « coulées » (ravinements, coulées boueuses, charriage torrentiel) : la carte de susceptibilité au phénomène est obtenue à partir du modèle de drainage.

- pour les mouvements gravitaires à composante essentiellement verticale (type affaissement et effondrement liés à des cavités souterraines), la carte de susceptibilité est élaborée à partir de la carte des formations géologiques sensibles au phénomène à laquelle est ajoutée la localisation des cavités souterraines connues (origine anthropique ou non).

Les cartes de susceptibilités ainsi obtenues sont à la base du zonage de l'aléa.

### **3.4. DEFINITION DES FREQUENCES**

Après avoir réalisé les cartes de susceptibilité des terrains à l'apparition des phénomènes de référence, l'étape suivante de la cartographie de l'aléa consiste à définir la fréquence des phénomènes de référence considérés.

L'estimation de la période de retour constitue un point crucial dans la mise en œuvre de la méthode. Pour chaque phénomène de référence, on définit une période de retour suivant les zones de susceptibilité, en fonction des conditions géomorphologiques ou géologiques. Ainsi, la fréquence des événements sera variable d'un secteur de susceptibilité à l'autre.

Pour cela, deux méthodes peuvent être envisagées :

- une approche déterministe à partir des caractéristiques mécaniques des terrains ;
- une approche statistique par extrapolation à la période de référence du nombre d'événements qui se sont produits antérieurement.

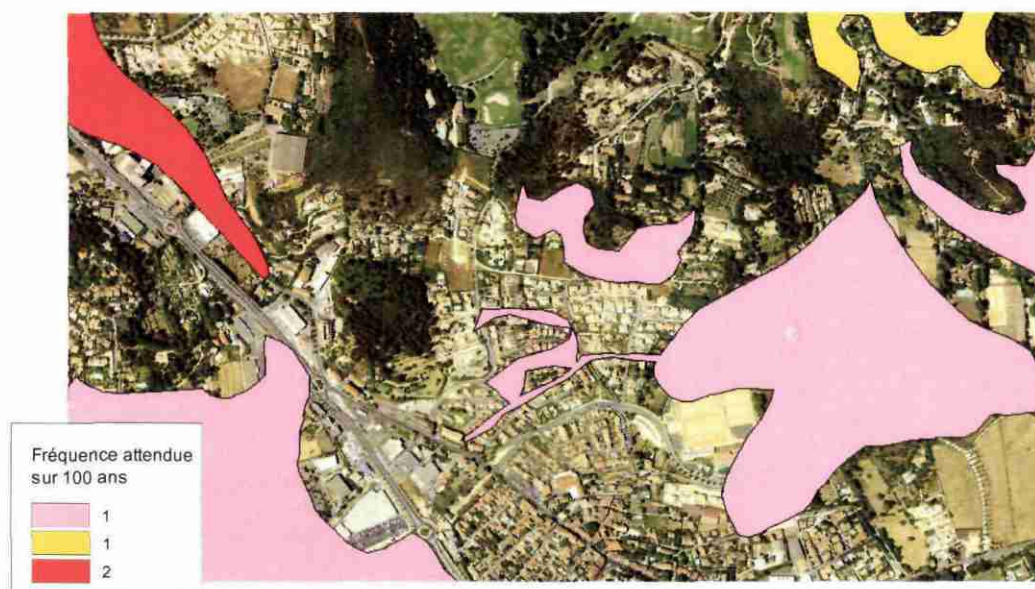
Compte tenu de la difficulté d'une mise en œuvre fiable de la première approche à l'échelle d'une ville (liée essentiellement à l'impossibilité de disposer des informations nécessaires), nous privilégions l'approche statistique, d'autant que les villes sont susceptibles de disposer d'une information « riche » sur les événements passés.

De fait, quelle que soit la situation, on dispose de 3 sources principales d'informations dont l'importance relative pourra varier en fonction des contextes :

- les archives de la ville (par exemple, base de données des incidents ou accidents signalés) ;
- l'observation de terrain (indices de désordres, morphologies significatives, ...) ;
- les enquêtes auprès des riverains ou des agents des services techniques.

A partir de là, on cherche à évaluer le nombre d'événements survenus d'une part pour chacun des phénomènes de référence, d'autre part pour les différents contextes géologiques (faciès et formations litho-stratigraphiques) et morphologiques (pentes, thalwegs, etc..) identifiés. Les valeurs sont ensuite extrapolées sur la période de référence.

A titre d'exemple, considérons l'exemple du phénomène « affaissement de faible ampleur » présenté précédemment (Illustration 9a). Les zones de susceptibilité y correspondent à 3 contextes différents (Illustration 10). On observe que sur les deux contextes symbolisés par l'ensemble des polygones roses ou par le polygone orange, on attendra, à chaque fois, un seul événement sur les 100 prochaines années (sans le localiser entre les différents polygones). Par contre, sur le seul polygone rouge, on attendra 2 événements. A noter que, dans d'autres contextes sur la même ville, on pourra attendre 5 événements, voire plus, par polygone.



*Illustration 10 : Exemple de cartographie de la fréquence attendue pour le phénomène de référence « affaissement de faible ampleur »*

Pour mieux expliciter la démarche de détermination des fréquences, prenons un phénomène de référence de type « écoulement rocheux » ; soit un événement impliquant des volumes de l'ordre de la dizaine de mètres cubes et dont l'étendue, la surface affectée par l'évènement, sera de plusieurs dizaines de mètres carrés. De tels événements se produisent à partir de faciès géologiques indurés, qui forment des ressauts topographiques remarquables dans le paysage. Les secteurs correspondant seront donc cartographiés (carte de susceptibilité) en identifiant les différentes lithologies (calcaires, tufs, etc.). Dans une première étape, on recherche dans les archives de la ville, la description et la localisation des événements de ce type, en cherchant à les répartir suivant les différents faciès. Cette première recherche est complétée par des observations de terrain et des enquêtes auprès des riverains. Par ailleurs, la fréquence de survenance d'un tel événement augmente lorsque la roche est fragilisée, par exemple par une fracturation importante. Ainsi, une falaise anciennement exploitée par une carrière et fragilisée par le travail d'exploitation, constitue un secteur défavorable où un écoulement a plus de chance de se produire que sur une falaise naturelle saine.

A partir de ces données, on estime alors le nombre d'évènements qui se sont produits dans le passé à différentes époques et suivant les différents contextes (falaises naturelles des différents faciès géologiques et anciennes carrières).

Il est clair que la précision d'une telle évaluation décroît rapidement d'une part avec l'éloignement dans le temps (les souvenirs sont nettement plus précis sur les 10 ou 20 dernières années), d'autre part avec l'intensité des phénomènes (les événements peu marquants ont tendance à ne pas être enregistrés). Il est clair également qu'une telle approche rend plus délicate l'identification des phénomènes exceptionnels de très faible récurrence (temps de retour supérieurs à 100 ans).

La période de retour du phénomène considéré est déduite par extrapolation, sur les cent prochaines années, des valeurs estimées pour les périodes passées. On définit ainsi un nombre d'évènements attendus par zone.

### **3.5. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA**

A ce stade, on dispose donc :

- d'une liste de phénomènes de références dont les caractéristiques moyennes sont définies (extension de la surface impactée, intensités physiques des différentes sollicitations) ;
- pour chacun des phénomènes de référence, d'une carte des zones de susceptibilité d'occurrence dont les polygones sont renseignés en termes de nombre d'évènements potentiels attendus.

Envisager une prévision de la localisation exacte de ces événements futurs n'est pas réaliste. Pour estimer l'impact des phénomènes, on privilégie donc, à nouveau, une approche statistique basée sur l'évaluation de la surface globale potentiellement

impactée. Cette valeur est obtenue par le produit de la surface impactée moyenne du phénomène de référence et du nombre d'événements attendus sur chaque zone.

L'aléa correspondant est représenté par le pourcentage de surface affectée sur la période de référence retenue ; il est défini par la formule suivante :

$$\text{Aléa} = \frac{\text{Surface impactée sur la période de référence retenue} = \text{nombre d'événements attendus sur la période de référence retenue} * \text{surface impactée par un événement}}{\text{Surface susceptible d'être affectée par le phénomène considéré d'après la cartographie de susceptibilité}}$$

Dans le cadre de l'exemple précédent, « affaissement de faible ampleur », les polygones étaient susceptibles d'être respectivement affectés par un ou deux événements de ce type. La surface impactée par chacun de ces événements correspond à une dimension moyenne unique (par exemple 600 m<sup>2</sup>). On peut donc facilement rapporter cette dimension à la surface totale du (ou des) polygones concernés. Le résultat est présenté dans l'illustration 11.

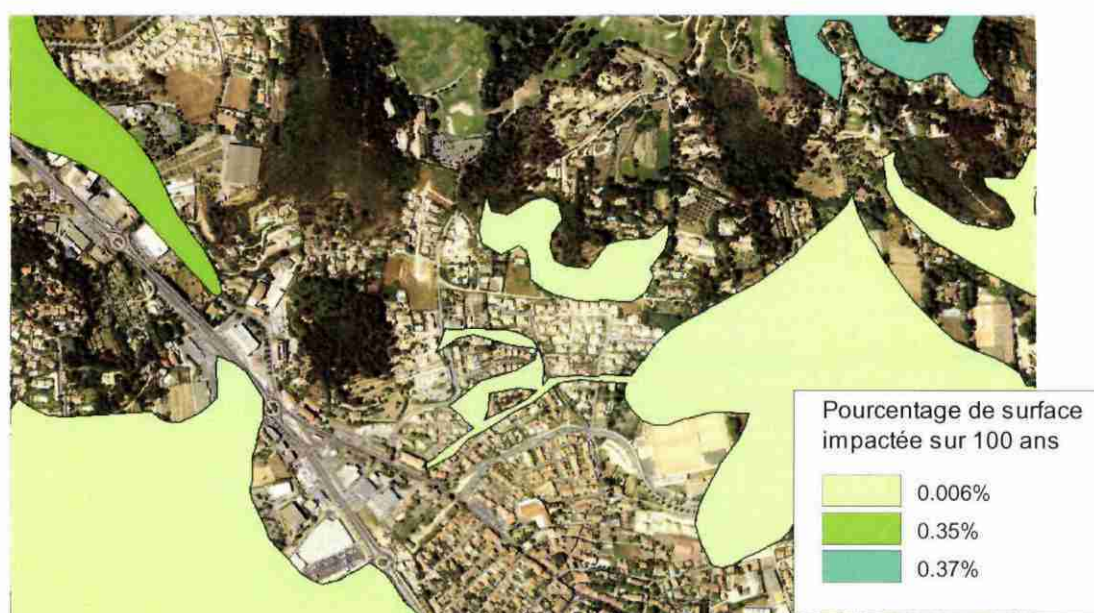


Illustration 11 : Exemple de cartographie de l'aléa exprimé en pourcentage de secteur impacté pour le phénomène de référence « affaissement de faible ampleur »

On observe, sur cette illustration, que les caractérisations des polygones sont différentes, en fonction de la surface totale de la zone concernée. Plus particulièrement, le polygone situé au nord, bien que n'étant potentiellement affecté que par un événement voit son aléa équivalent à celui du secteur situé au nord-ouest, alors que celui-ci serait affecté par deux événements (mais sa surface totale est également deux fois supérieure).

A l'issue de cette étape, on dispose donc de plusieurs cartes d'aléa : une par phénomène de référence (c'est-à-dire exprimant une intensité unique par sollicitation) pour lesquelles, la fréquence est exprimée sous la forme du pourcentage de zones potentiellement affectées.

Le nombre de cartes d'aléa est égal au nombre de phénomènes de référence définis sur la zone d'étude.

## 4. Analyse des enjeux

### 4.1. DEFINITION DES TYPOLOGIES

Cinq catégories d'enjeux sont prises en compte dans la mise en œuvre de la méthode :

- les individus,
- les bâtiments,
- la voirie,
- les surfaces naturelles,
- le mobilier urbain - véhicules.

Rappelons que d'autres catégories d'éléments exposés auraient pu être prises en compte, comme les réseaux enterrés ou les activités économiques. Toutefois, la disponibilité des informations les concernant restant sujette à caution dans de nombreux cas, il nous semble préférable de ne pas en tenir compte, malgré leur importance, pour permettre des comparaisons cohérentes suivant les différentes situations.

Ces différentes catégories présentent une variabilité interne qui correspond à de grandes variations des valeurs, en particulier financières, et à des vulnérabilités. Il est donc indispensable de les discriminer suivant différents types.

La recherche bibliographique concernant les typologies d'enjeux en site urbain français vis-à-vis des mouvements de terrain s'est avérée infructueuse. Nous avons donc développé notre propre typologie, à partir de celle proposée par Léone (1996), avec une adaptation au contexte urbain, et des résultats du projet européen RISK-UE (Milutinovic 2003), projet s'intéressant à la vulnérabilité du bâti vis-à-vis du risque sismique, en tenant compte en plus, pour notre étude, de l'élément « fondation des bâtiments ».

La typologie retenue pour les cinq catégories d'enjeux est détaillée dans le Tableau 13.

L'enjeu « Individus » est divisé en deux types : les personnes sont considérées à l'air libre ou à l'intérieur des bâtiments. Dans ce deuxième cas, la vulnérabilité de l'individu est fonction de la vulnérabilité du bâtiment.

Six types ont été retenus pour caractériser les bâtiments.

Deux catégories de voies de communication ont été retenues.

Les espaces naturels sont répartis en fonction de leur mode d'occupation ou d'exploitation.

En ce qui concerne le mobilier urbain, seuls les véhicules en stationnement, dont le nombre est évalué de manière indirecte à partir du nombre d'habitant, sont pris en compte.

|                            |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Individus</b>           | P1 | Personnes à l'air libre                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                            | P2 | Personnes dans un bâtiment                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Bâtiments</b>           | B1 | Constructions vétustes ou de qualité médiocre, sans fondations et sans liaisons structurelles, le plus souvent construites hors normes traditionnelles (granges, appentis, certaines résidences secondaires). Cette catégorie peut être étendue aux constructions du type suivant (B2) lorsque celles-ci font l'objet de dégradations structurelles non consolidées. |
|                            | B2 | Constructions traditionnelles, en maçonnerie, ou préfabriquées individuelles légères, sans ossature armée. Généralement des habitations ou immeubles collectifs anciens.                                                                                                                                                                                             |
|                            | B3 | Constructions présentant en rez-de-chaussée de larges ouvertures de type vitrines (ex : commerces, écoles, bureaux...)                                                                                                                                                                                                                                               |
|                            | B4 | Constructions de type habitat individuel de bonne qualité, réalisées en matériaux traditionnels, en béton ou en composants préfabriqués et pourvues d'une ossature armée. Fondations superficielles.                                                                                                                                                                 |
|                            | B5 | Constructions de type habitat collectif d'au moins trois niveaux, de bonne qualité, réalisées en matériaux traditionnels, en béton ou en composants préfabriqués et pourvues d'une ossature armée. Fondations profondes.                                                                                                                                             |
|                            | B6 | Bâtiment à structure métallique (vocation industrielle ou commerciale). Fondations superficielles.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Voirie</b>              | R1 | Routes de viabilité médiocre (1 voie à deux voies étroites)                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                            | R2 | Routes de bonne à très bonne viabilité (2 voies larges à 4 voies)                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Surfaces naturelles</b> | T1 | Terrains naturels ou jardins (valeur environnementale)                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                            | T2 | Terrains agricoles (culture ou élevage) à valeur économique                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                            | T3 | Terrains constructibles (foncier) à valeur financière                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                            | EL | Eau libre (cours d'eau naturels ou canaux aériens, plans d'eau naturels ou artificiels) (valeur environnementale et fonctionnelle)                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Mobilier urbain</b>     | V  | Véhicules                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

Tableau 13 : Typologie des enjeux suivant les cinq grandes catégories prises en compte

Ce sont donc 15 types différents d'enjeux qui ont été définis. La typologie présentée ici nous semble susceptible de couvrir l'essentiel des situations possibles dans la France

métropolitaine et d'assurer ainsi une reproductibilité satisfaisante pour l'application de la méthode dans différents contextes. Il n'en reste pas moins que cette typologie est susceptible d'adaptations pour répondre à des spécificités éventuelles. Dans tous les cas, il paraît, cependant, plus raisonnable de se limiter à moins d'une vingtaine de types différents.

## 4.2. ECHELLES D'ENDOMMAGEMENT

De même que les échelles d'intensité des phénomènes doivent permettre de quantifier et de classer des phénomènes les uns par rapport aux autres, les échelles d'endommagement ont pour but un classement des dommages portés aux différents enjeux.

Les éléments bibliographiques recueillis dans le cadre de cette étude (cf. § 1.4) montrent que le cas des dommages aux bâtiments est largement plus étudié que celui des autres enjeux considérés dans cette étude.

Les échelles d'endommagement décrivent, pour chaque degré, les effets spécifiques de dommages subis par chacun des enjeux. L'endommagement peut être évalué sous différents aspects, en termes de :

- valeur fonctionnelle,
- valeur économique,
- valeur foncière,
- valeur environnementale,
- valeur humaine.

Nous avons retenu 5 classes (niveaux) d'endommagement pour chacune des échelles : très faible, faible, moyen, fort, très fort.

Pour chacune de ces classes, le taux d'endommagement représente la perte de valeur économique de l'enjeu. Cinq échelles d'endommagement ont donc été établies (cf. Tableau 14, 15, 16, 17, 18 et 19<sup>3</sup>).

---

<sup>3</sup> L'échelle d'endommagement du bâti est répartie sur 2 tableaux (d'une part valeurs fonctionnelle et humaine, d'autre part, valeur économique et taux d'endommagement)

**Enjeu Individus**

| <b>Classe</b>      | <b>Endommagement</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                        | <b>Taux d'endommagement</b>     |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
|                    | Valeur fonctionnelle                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Valeur économique                                                      |                                 |
| <b>Très faible</b> | Ressenti avec gêne passagère, insatisfaction sociale                                                                                                                                                                                                                                                          | Sans impact financier                                                  | 0                               |
| <b>Faible</b>      | Quelques blessures superficielles légères, nécessitant une aide médicale basique, sans hospitalisation. Peur et inquiétude, sans conséquence psychologique majeure.                                                                                                                                           | Impact financier minime.                                               | 15 % du coût d'un blessé léger  |
| <b>Moyen</b>       | Blessures superficielles nombreuses sans qu'elles constituent une menace. Un organe vital est atteint, mais de façon momentanée. Peur intense provoquant anxiété et angoisse. Etat dépressif circonscrit et limité dans le temps.                                                                             | Impact financier sensible.                                             | 100 % du coût d'un blessé léger |
| <b>Fort</b>        | Blessures qui menacent la vie si elles ne sont pas traitées convenablement. Plusieurs organes vitaux sont touchés, mais peuvent être remis en fonction. Peur intense et sentiment d'effroi (impliquant peur pour sa vie). Dépression et symptômes post-traumatiques, conduites additives et risque de suicide | Séquelles définitives sans invalidités. Impact financier significatif. | 30 % du coût d'un blessé grave  |
| <b>Très fort</b>   | Plusieurs organes vitaux touchés, sans pouvoir être remis en fonction. Blessures mortelles ou mort instantanée. Peur intense, sentiment d'effroi, stress aigu et attaques panique.                                                                                                                            | Séquelles définitives avec invalidités.                                | Valeur de la vie humaine        |

Tableau 14 : Echelle d'endommagement pour les individus

## Enjeu Bâtiments

Pour des raisons de mise en page, l'échelle d'endommagement du bâti est répartie sur 2 tableaux (d'une part valeurs fonctionnelle et humaine - Tableau 15, d'autre part, valeur économique et taux d'endommagement - Tableau 16)

| Classe      | Endommagement                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                            |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|             | Valeur fonctionnelle                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Valeur humaine                             |
| Très faible | Impact pouvant éventuellement impliquer une intervention manuelle (nettoyage, petite réparation) ne nécessitant pas obligatoirement l'intervention de professionnels.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Impact très faible.                        |
| Faible      | <p>Quelques fissures sont visibles à l'intérieur de la construction, dans les recouvrements des éléments structuraux (poutres) les plus sollicités, dans un ou plusieurs murs de soubassement et éventuellement dans la dalle du sol. Certaines reprises peuvent être nécessaires pour assurer l'étanchéité. Les fissures typiques (bâti en maçonnerie) atteignent 5 mm.</p> <p>Les portes et fenêtres peuvent se coincer. Des réparations aux murs et plafonds peuvent être nécessaires. Déformation des murs inférieure à 0,05%</p> <p>L'ELS (Etat Limite de Sécurité) est atteint sur de courtes périodes avec des sollicitations dynamiques restreintes.</p> <p>L'endommagement n'est pas suffisant pour compromettre la stabilité générale.</p>                       |                                            |
| Moyen       | <p>Changement de longueur de la construction comprise entre 0,2 et 0,3%.</p> <p>Fissures dans un ou plusieurs murs de soubassement et éventuellement dans la dalle du sol, les éléments non structuraux peuvent être assez significativement fissurés (remplissages, cloisons...). Fissures légères visibles de l'extérieur. Les fissures typiques (bâti en maçonnerie) sont comprises entre 5 et 15 mm ou plusieurs d'environ 3 mm.</p> <p>Les portes et fenêtres sont coincées. Les canalisations sont rompues. Murs penchés et fissurés (10 à 20 mm). Certains murs et fondations nécessitent d'être remplacés et certaines reprises doivent être faites localement. Déplacements aux points de supports des poutres.</p> <p>L'ELS est dépassé. Stabilité affectée.</p> | Evacuations nécessaires avant réparations. |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                          |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fort</b>      | <p>Changement de longueur de la construction comprise entre 0,3 et 0,4%.</p> <p>Plusieurs éléments structuraux sont fissurés fortement (piliers, poutres...), certains sont détruits. Les éléments non structuraux peuvent être totalement détruits (planchers, murs, dalles...). Les fissures typiques sont comprises entre 15 et 25 mm, mais dépendent également de l'espacement entre fissures.</p> <p>Les canalisations sont rompues. Fractures ouvertes dans les murs. Les portes et fenêtres sont tordues, voire rompues. Sols en pente. Murs hors d'aplomb ou bombés. Quelques déchaussements des poutres, perte de portance de certaines poutres.</p> <p>L'ELU (Etat Limite Ultime) est dépassé pour de nombreuses parties du bâtiment.</p> <p>Des travaux importants sont nécessaires pour reconstruire des murs et des fondations et pour remplacer la dalle.</p> <p>La réhabilitation semble compromise. D'importants travaux de réparations des murs sont nécessaires, nécessitant parfois une démolition partielle, en particulier autour des portes et fenêtres.</p> | L'évacuation s'impose.                                                                                   |
| <b>Très fort</b> | <p>Changement de longueur de la construction supérieur à 0,5%.</p> <p>De nombreux éléments structuraux sont détruits, ceci entraîne la destruction de tout ou partie du bâtiment.</p> <p>Effondrement partiel à total.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Evacuation du site et réhabilitation compromise. Eventuellement pertes humaines en cas de ruine brutale. |

Tableau 15 : Echelle d'endommagement pour le bâti (valeurs fonctionnelles et humaines)

| <b>Classe</b>      | <b>Valeur économique</b>                                                                                                                                                                   | <b>Taux d'endommagement</b> |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Très faible</b> | Moins de 1% de la valeur vénale d'une maison individuelle moyenne.                                                                                                                         | 0.01                        |
| <b>Faible</b>      | Moins de 10% de la valeur vénale d'une maison individuelle moyenne.                                                                                                                        | 0.1                         |
| <b>Moyen</b>       | Parade financièrement supportable par un groupe restreint de propriétaire (immeuble collectif, petit lotissement). Entre 10% et 30% de la valeur vénale d'une maison individuelle moyenne. | 0.2                         |
| <b>Fort</b>        | L'intérêt économique d'une réhabilitation peut être discutable (supérieur à 30% de la valeur vénale du bâtiment).                                                                          | 0.4                         |
| <b>Très fort</b>   | Pas de parade sûre qui soit techniquement et économiquement envisageable.                                                                                                                  | 1                           |

Tableau 16 : Echelle d'endommagement pour le bâti (valeur financière)

**Enjeu Voirie**

| <b>Classe</b>      | <b>Endommagement</b>                                                                                                                                                                            |                                       | <b>Taux d'endommagement</b> |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
|                    | Valeur fonctionnelle                                                                                                                                                                            | Valeur économique                     |                             |
| <b>Très faible</b> | Légères altérations n'impliquant pas d'interventions.                                                                                                                                           | Pas d'impact financier                | 0                           |
| <b>Faible</b>      | Quelques fissures ou dégradations dans les revêtements. Pas d'interruption de trafic, éventuellement fonctionnement en mode dégradé (ralentissement, circulation alternée).                     | Pas d'impact financier                | 0                           |
| <b>Moyen</b>       | Revêtement affecté de manière significative. Obstruction de la chaussée de faible volume (dizaine de m <sup>3</sup> ). Coupure momentanée (journée ou semaine), fonctionnement en mode dégradé. | Coût des travaux limité               | 0,3                         |
| <b>Fort</b>        | Rupture avec déplacements significatifs de la structure à plusieurs endroits. Obstruction de volume élevé (centaine de m <sup>3</sup> ).. Coupure prolongée (semaines).                         | Coût des travaux fort                 | 0,7                         |
| <b>Très fort</b>   | Déformations très importantes en plusieurs endroits, structure détruite totalement. Rupture de la plateforme, du ballast. Immersion définitive. Coupure prolongée (mois) voire définitive.      | Reconstruction de la route nécessaire | 1                           |

*Tableau 17 : Echelle d'endommagement pour la voirie*

**Enjeu Surfaces naturelles**

| <b>Classe</b>      | <b>Endommagement</b>                                                      |                                                                                            |                                                             |                                                                                              | <b>Taux d'endomm.</b> |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|                    | Valeur fonctionnelle                                                      | Valeur économique                                                                          | Valeur foncière                                             | Valeur environnementale                                                                      |                       |
| <b>Très faible</b> | Impact observable sur une durée limitée ne nécessitant pas d'intervention | Impact nul                                                                                 | Pas d'impact sur la valeur du terrain                       | Impact très léger.                                                                           | 0                     |
| <b>Faible</b>      | Modifications observables du terrain sans influence sur la végétation.    | Impact nul                                                                                 | Impact modéré sur une période de temps limitée (1 à 2 ans)  | Impact léger.                                                                                | 0                     |
| <b>Moyen</b>       | Modifications observables du terrain.                                     | Eventuellement, perte d'exploitation partielle. Perte de 30% de la valeur foncière.        | Impact modéré sur une période de temps plus longue (10 ans) | Influence sur la végétation nécessitant une intervention. Cours d'eau partiellement obstrué. | 0.3                   |
| <b>Fort</b>        | Terrain fortement modifié.                                                | Perte d'exploitation totale (une ou plusieurs années). Perte de 50% de la valeur foncière. | Impact important et définitif                               | Végétation atteinte profondément.                                                            | 0.5                   |
| <b>Très fort</b>   | Remaniements topographiques majeurs.                                      | Perte d'exploitation définitive. Perte de 80% de la valeur foncière.                       | Perte de l'essentiel de la valeur foncière.                 | Terrain détruit. Cours d'eau totalement obstrué.                                             | 0.8                   |

Tableau 18 : Echelle d'endommagement pour les surfaces naturelles

**Enjeu Mobilier urbain (véhicules)**

| <b>Classe</b>      | <b>Endommagement</b>                                                                                      |                                                                              | <b>Taux d'endommagement</b> |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
|                    | Valeur fonctionnelle                                                                                      | Valeur économique                                                            |                             |
| <b>Très faible</b> | Pas de dégâts notables - pas d'intervention nécessaire.                                                   | Impact nul                                                                   | 0                           |
| <b>Faible</b>      | Quelques dégâts visibles, mais qui ne remettent pas en cause l'utilisation en toute sécurité du véhicule. | Couts des réparations inférieures à 10% du montant du véhicule neuf.         | 0,1                         |
| <b>Moyen</b>       | Véhicule non utilisable en l'état.                                                                        | Réparation de l'ordre de 10 à 30% de la valeur du véhicule neuf.             | 0,3                         |
| <b>Fort</b>        | Véhicule largement accidenté.                                                                             | Réparations obligatoires pour envisager à nouveau l'utilisation de celui-ci. | 0,7                         |
| <b>Très fort</b>   | Véhicule entièrement inutilisable.                                                                        | Prix du véhicule                                                             | 1                           |

*Tableau 19 : Echelle d'endommagement pour les véhicules***4.3. FONCTIONS DE VULNERABILITE**

La vulnérabilité traduit la sensibilité ou la fragilité d'un enjeu vis-à-vis d'un phénomène. Elle s'exprime par une fonction donnant la variation du taux de dommages en fonction de l'intensité de la sollicitation.

Cette fonction exprime donc les corrélations entre échelles d'intensité et échelles d'endommagement au travers de tableaux à double entrée.

A partir des échelles présentées ci-dessus, un niveau d'endommagement est donc déterminé systématiquement pour chacun des 15 types d'enjeux par confrontation avec les 4 classes d'intensité de chacune des 6 sollicitations physiques différentes ; lorsque nécessaire, cette classe est établie en tenant compte, en plus, de l'extension du phénomène et/ou de la profondeur de la surface de rupture.

L'ensemble des fonctions de vulnérabilité est présenté en Annexe 1.

Quelques explications sur les choix faits lors de l'établissement de ces fonctions sont apportées ci-dessous en fonction des enjeux.

#### **4.3.1. Enjeu Individus**

Les fonctions de vulnérabilités sont définies pour les individus à l'air libre. La vulnérabilité des individus à l'intérieur des bâtiments est fonction de la vulnérabilité du bâtiment lui-même.

Pour une sollicitation de Déplacement vertical, la vulnérabilité est fonction de l'intensité synthétique  $I_s$  du Déplacement (combinaison des classes de l'Amplitude, de la Vitesse et du Champ, voir paragraphe 3.1.2) et de l'extension de cette sollicitation.

De même, la vulnérabilité vis-à-vis de la sollicitation de Déplacement horizontal est fonction de l'intensité synthétique  $I_s$  et de l'extension ; sur cet enjeu, la profondeur de la surface de rupture n'intervient pas (c'est-à-dire que l'influence du déplacement est la même quelque soit cette profondeur)

#### **4.3.2. Enjeu Bâtiments**

Pour cet enjeu, 6 types ont été distingués.

Dans le cas de la sollicitation Déplacement horizontal, l'endommagement est fonction de l'intensité synthétique  $I_s$ , de l'extension et de la profondeur de la surface de rupture (qui peut entraîner un cisaillement des fondations du bâtiment).

#### **4.3.3. Enjeu Voirie**

Selon l'importance de la route, la décision de coupure de celle-ci pour réparation ne sera pas prise pour un même état d'endommagement (pour R1 l'endommagement supporté sera supérieur à celui de R2). Notre choix s'est porté sur une vulnérabilité principalement déterminée par le dommage plutôt que fonction de l'intervention qui en découle.

#### **4.3.4. Enjeu Mobilier urbain**

Les véhicules sont considérés à l'arrêt.

#### 4.4. ANALYSE DE LA VALEUR

La notion de valeur d'un enjeu peut s'exprimer en termes de valeur structurelle, fonctionnelle, économique, foncière, environnementale ou encore humaine. L'endommagement est défini comme la diminution ou la perte de l'une de ces valeurs sur l'enjeu.

Le but de cette étude étant une comparaison de secteurs géographiques différents, il est préférable de ramener l'ensemble des valeurs à un référent unique. Notre choix s'est porté sur la valeur financière. Il convient donc de définir cette valeur financière pour chaque enjeu identifié.

##### 4.4.1. Valeur financière de l'enjeu Individu

Cette question est très délicate à traiter. Elle a cependant été abordée et développée dans le rapport du Commissariat Général du Plan intitulé « Transport : choix des investissements et coût des nuisances. » (Boiteux M., 2001).

Dans ce rapport, la valeur de la vie humaine est évaluée vis-à-vis des décisions d'investissement dans le secteur des transports. Trois méthodes possibles d'évaluation du coût de la vie humaine sont proposées :

- soit par le **manque à produire net** : mesure de la perte de biens et services futurs que subira la société du fait de la disparition d'une personne ;
- soit par le **manque à produire brut** : mesure de la perte de ce que la victime aurait personnellement consommé durant le reste de sa vie ;
- soit par la **méthode du coût humain compensé** : estimation de la valeur de la vie humaine « marginale » : coût à consentir pour éviter une mort supplémentaire.

C'est finalement la valeur de la vie humaine « marginale » qui est retenue par les pouvoirs publics pour optimiser leur programmation en termes d'investissement public. Elle est exprimée en millions d'euros.

En ce qui concerne la valeur à retenir pour les blessés graves et légers, il est proposé de conserver un poids relatif de ces catégories par rapport à la valeur de la vie humaine :

- pour un blessé grave, la valeur retenue est de 15 % de la valeur de la vie humaine,
- pour un blessé léger la valeur retenue est de 2,2 % de la valeur de la vie humaine.

Les valeurs de la vie humaine et des blessés (légers ou graves) définies dans le rapport de M. Boiteux sont résumées dans le Tableau 20 ci-dessous, ainsi que les valeurs retenues dans le cadre de notre étude.

|              | Valeurs en 2000         |                      | Valeur retenue<br>(moyenne des<br>valeurs pour les<br>transports routiers<br>pour les transports<br>collectifs) |
|--------------|-------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Transport<br>collectif  | Transport<br>routier |                                                                                                                 |
| Vie humaine  | 1,5 millions<br>d'euros | 1 million<br>d'euros | 1,25 million<br>d'euros                                                                                         |
| Blessé grave | 225 000 euros           | 150 000 euros        | 187 500 euros                                                                                                   |
| Blessé léger | 33 000 euros            | 22 000 euros         | 27 500 euros                                                                                                    |

Tableau 20 : Valeurs de la vie humaine (source : rapport du Commissariat Général du Plan intitulé « Transport : choix des investissements et coût des nuisances. » (Boiteux M., 2001))

#### 4.4.2. Valeur financière de l'enjeu Bâtiment

La valeur économique de l'enjeu Bâtiment est évaluée à partir du prix au mètre carré à la vente du type de bâti considéré. Il faut, pour estimer ce coût, réaliser une recherche bibliographique sur la valeur de l'immobilier sur le secteur d'étude, le prix du mètre carré pouvant varier très fortement d'un secteur à l'autre au sein d'une même commune.

#### 4.4.3. Valeur financière de l'enjeu Mobilier urbain

La valeur économique du mobilier urbain est définie par le coût moyen à la vente d'un véhicule neuf.

#### 4.4.4. Valeur financière de l'enjeu Voirie

La valeur économique est estimée à partir du coût de construction du réseau routier. Elle est exprimée en euro par mètre linéaire de réseau.

#### 4.4.5. Valeur financière de l'enjeu Surfaces naturelles

De même que pour l'enjeu bâtiment, la valeur financière de l'enjeu surfaces naturelles est exprimée en euros par mètre carré. Elle correspond au prix de vente du terrain ou de la parcelle.

## 4.5. CARTOGRAPHIE DES ENJEUX

La cartographie des enjeux correspond au recensement des éléments exposés par zones, en définissant la répartition entre les différents types suivant des zones délimitées. La qualité du zonage est liée aux données disponibles au départ de l'étude. Les méthodes à mettre en œuvre pour la cartographie pour chacun des types précédemment définis (cf. 4.1) sont présentées dans les paragraphes ci-dessous.

### 4.5.1. Zonage de l'enjeu Individu

La population peut être évaluée par ilots à partir des données de l'INSEE. Il est cependant nécessaire pour nous d'exprimer ces valeurs par rapport aux bâtiments pour permettre des cartographies homogènes.

Le nombre d'individus à l'intérieur d'un bâtiment est lié au type de bâtiment. Pour les constructions de type B5, par exemple, qui sont des constructions de type habitat collectif d'au moins trois niveaux, le nombre d'habitants sera plus grand que le nombre d'habitants à l'intérieur d'un bâtiment type B4 (constructions de type habitat individuel, cf. Tableau 13, paragraphe 4.1). On calcule le nombre de bâtiments pour chaque ilot INSEE et on estime un nombre moyen d'habitants pour chaque type de bâtiment. A titre de validation, il est impératif de comparer les valeurs de nombre d'habitants ainsi obtenues avec les valeurs de référence fournies par l'INSEE sur la commune.

En ce qui concerne l'estimation du nombre d'habitants à l'air libre, il est évalué différemment en fonction du phénomène mouvement de terrain considéré. Le nombre de piétons ne sera pas le même selon que l'on considère une coulée boueuse qui se produit par temps de forte pluie, ou que l'on considère une chute de blocs qui peut très bien se produire par temps sec. On définit le nombre de personnes à l'air libre comme le pourcentage de personnes à l'intérieur du bâtiment. C'est ce pourcentage qui varie selon le phénomène considéré. Pour une coulée boueuse par exemple le nombre de personnes à l'air libre sera évalué à 5 % du nombre d'habitant, et à 50 % pour un évènement type chute de blocs.

### 4.5.2. Zonage de l'enjeu Bâtiments

Il s'agit ici d'affecter à chaque bâtiment la typologie qui lui est définie dans le cadre de l'étude (cf. Tableau 13 : Typologie des enjeux, § 4.1). Pour ce faire, l'orthophoto de la zone d'étude constitue une base indispensable. A partir de ce document, deux manières de procéder sont possibles :

- soit, il n'existe pas de base de données géo-référencées des bâtiments de la zone d'étude, et dans ce cas-là une enquête terrain poussée s'impose. Il s'agit d'estimer le nombre et le type de bâtiments basés sur des probabilités estimées à partir des observations terrain. Ce travail est d'autant plus long que la zone d'étude est grande et la répartition des bâtiments très hétérogène. Ce cas devrait être exceptionnel, d'autant que les bases de données haute précision de l'IGN couvrent à présent la majeure partie du territoire national ;

- soit, le géoréférencement des bâtiments existe sur la zone d'étude. Dans ce cas, des zones homogènes de type de bâtiments sont définies à partir de l'orthophoto, et à chaque bâtiment se trouvant dans une zone est attribué un type. Un exemple de zonage homogène de typologie de bâtiments sur une zone d'étude fictive est représenté sur l'illustration 12.

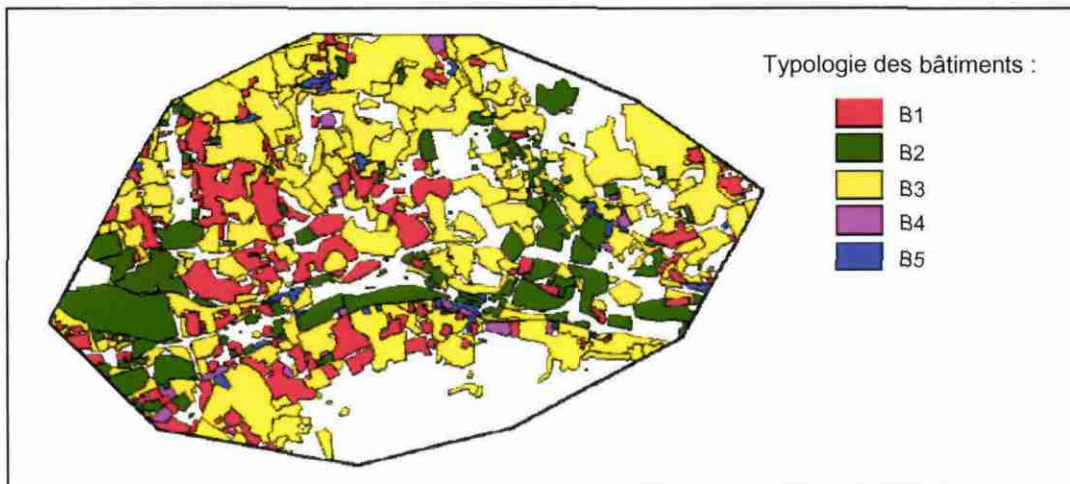


Illustration 12 : Zonage homogène par type de bâtiments sur la zone d'étude

#### 4.5.3. Zonage de l'enjeu Voirie

Dans le cas du zonage des infrastructures et fonction de transport, soit le réseau routier n'est pas géo-référencé et la digitalisation se fait directement sous SIG à partir de l'orthophoto de la zone d'étude, soit le réseau routier est géo-référencé et, dans ce cas-là, la typologie du réseau peut être directement affectée au linéaire routier en complétant la table attributaire associée à l'objet géographique. Un exemple de zonage de l'enjeu Voirie sur une zone d'étude fictive est représenté sur l'illustration 13.

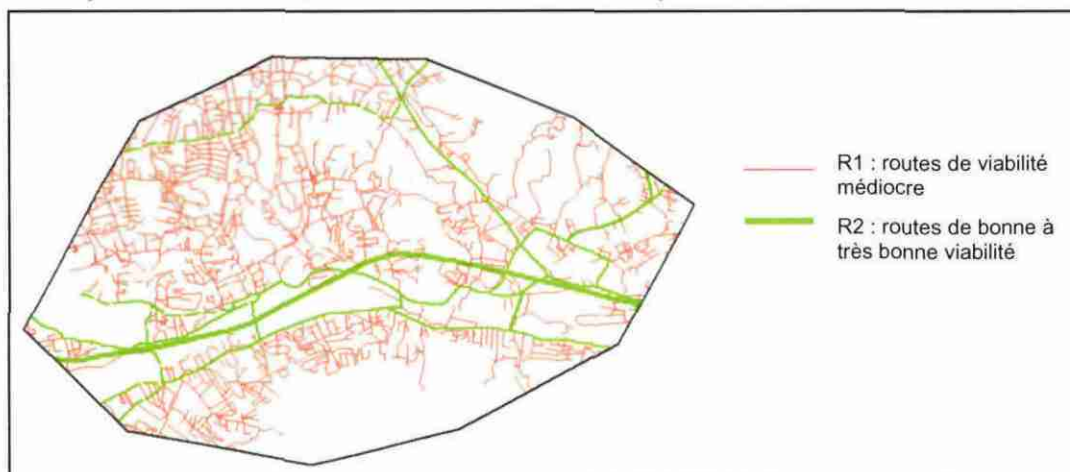


Illustration 13 : Zonage de l'enjeu Voirie sur la zone d'étude

#### **4.5.4. Zonage de l'enjeu Surfaces naturelles**

Ce zonage peut déjà exister et être utilisé au sein des services techniques de la commune concernée par l'étude. Un tel zonage peut avoir été réalisé dans le cadre de la mise en place du plan d'occupation des sols (POS) ou dans le cadre du plan local d'urbanisme (PLU) de la commune par exemple. Si ce zonage n'existe pas, il faut utiliser l'orthophoto de la zone d'étude et géo-référencer les zones de typologie homogène à partir de cette orthophoto et de la connaissance du territoire d'étude.

#### **4.5.5. Zonage de l'enjeu Mobilier urbain**

Le nombre de voiture est estimé à partir du nombre d'habitants. L'évaluation du nombre de voiture par habitant est à caler avec les données INSEE disponibles ou d'éventuelles données complémentaires disponibles aux services techniques de la commune concernée par l'étude.



## 5. Stabilisation de la méthode

### 5.1. CARTOGRAPHIE DES DOMMAGES

#### 5.1.1. Découpage des enjeux par zone d'aléa

A ce stade de l'étude, on dispose de « n » cartes d'aléa correspondant aux « n » phénomènes de référence identifiés et définis sur la zone d'étude. On dispose également d'une carte de recensement et de répartition des éléments exposés, par catégorie d'enjeux.

On traite séparément et systématiquement tous les binômes possibles « catégorie d'enjeux / phénomène de référence ». Pour chaque catégorie d'enjeux, les zones d'enjeux sont redécoupées à partir des polygones issus du zonage de l'aléa. Les valeurs des enjeux associées aux polygones résultants sont calculées sur les secteurs d'aléa non nul.

Le principe est illustré sur l'illustration 14 représentant le découpage de l'enjeu bâti par les surfaces d'aléa d'un phénomène de référence fictif « chutes de blocs ».

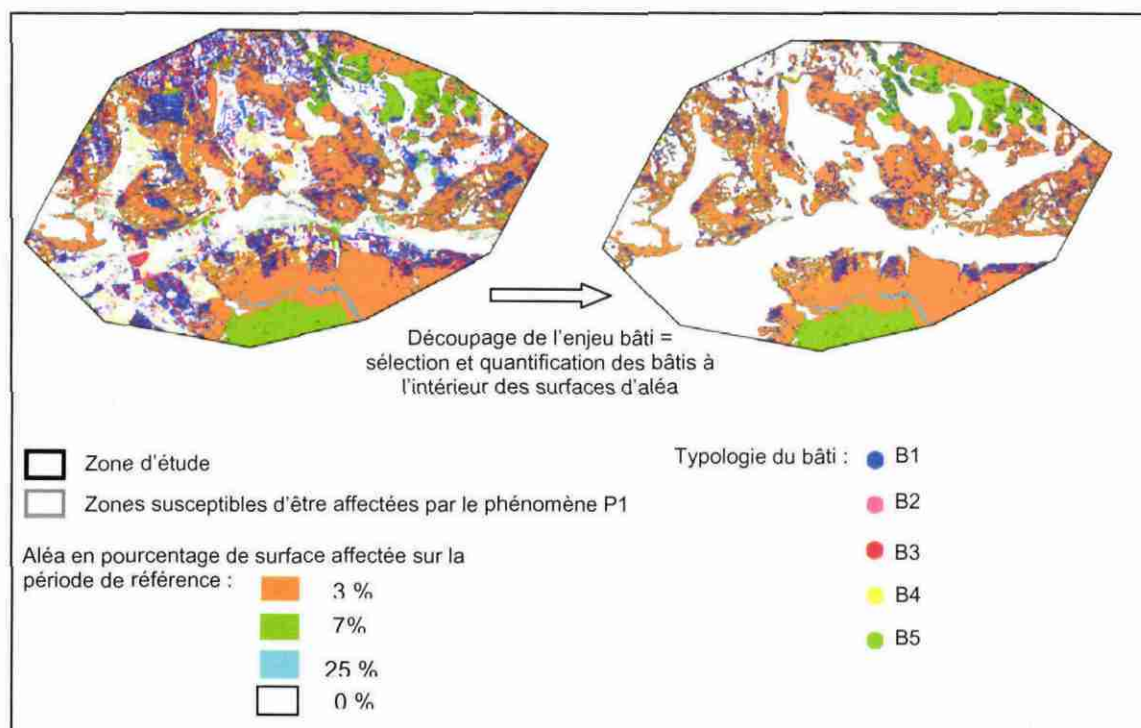


Illustration 14 : Découpage et quantification de l'enjeu bâti sur les surfaces d'aléa du phénomène de référence fictif « chutes de blocs »

Le découpage de la carte des enjeux du bâti permet de déterminer des répartitions de population par zone d'aléa. Les linaires de voirie sont alors découpés par les polygones résultant de la première opération. On découpe les terrains naturels, alors, de la même manière que les polygones du bâti. Suite à ces différents découpages, on quantifie les valeurs pour chacun des enjeux par zone d'aléa homogène. On obtient ainsi un tableau de synthèse par phénomène (cf. Tableau 21).

| Identifiant du polygone | Aléa (% de surface affectée sur la période de référence) | Nb de bâti B4 | ... | Nb de bâti B6 | Nb d'ind. | Nb de voitures | Longueur de réseau R1 (m) | Longueur de réseau R2 (m) | Surface de T1 (m²) | ... |
|-------------------------|----------------------------------------------------------|---------------|-----|---------------|-----------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|-----|
| 1                       | 3                                                        | 103           | ... | 3             | 400       | 10.8           | 23.5                      | 200                       | 100                | ... |
| 2                       | 12                                                       | 25            | ... | 0             | 102       | 22             | 63.9                      | 53                        | 0                  | ... |
| 3                       | 3                                                        | 0             |     | 59            | ...       | ...            | ...                       | ...                       | 300                | ... |

Tableau 21 : Exemple de tableau de quantification des enjeux par zone d'aléa homogène pour un phénomène de référence donné

### 5.1.2. Cartographie des dommages cumulés par type de valeur considérée

Pour chaque carte d'aléa, on dispose à ce stade :

- d'un niveau d'intensité par sollicitation
- par zone d'aléa homogène, d'une valeur calculée par type d'enjeux et d'un taux d'endommagement correspondant au niveau maximal d'endommagement obtenu d'après les différentes sollicitations.

Les dommages cumulés sur chaque type d'enjeux considéré peuvent être alors calculés suivant la formule ci-dessous :

$$\text{Dommage cumulé} = (\sum \text{valeur de l'enjeu } i * Vi) * \% \text{ zone affectée}$$

Où  $V_i$  correspond au taux d'endommagement sur l'enjeu  $i$  et le pourcentage de zone affectée traduisant l'aléa sur la zone. On obtient alors « n » cartes de dommages cumulés correspondant aux « n » cartes d'aléa réalisées pour chacun des phénomènes de référence.

Le principe de cette cartographie est expliqué sur l'illustration 15. Les dommages exprimés en euros sont, dans cette illustration, totalement fictifs.

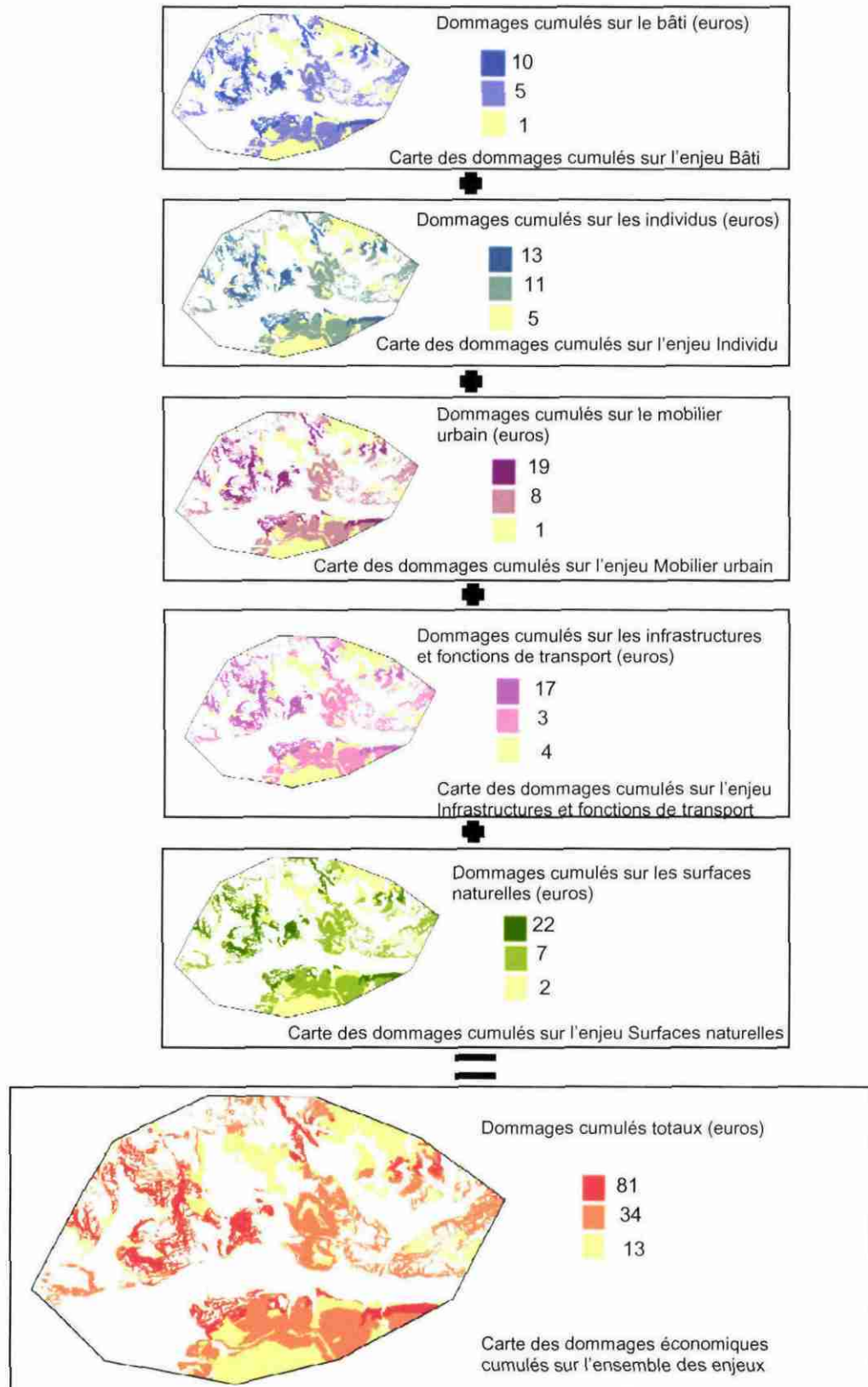


Illustration 15 : Principe de cartographie de la carte des dommages économiques cumulés sur l'ensemble des enjeux

Il s'agit, ensuite, de compiler l'ensemble des cartes de dommages sur un support cartographique unique. Comme la réglementation française fait obligation aux villes d'une certaine importance d'élaborer un Plan Local d'Urbanisme (PLU), notre méthode propose de conserver ce zonage urbanistique pour servir de base à la représentation cartographique des dommages.

## 5.2. ANALYSE DES RISQUES POUR LA VIE HUMAINE

La méthode décrite jusqu'ici présente l'avantage d'aboutir à un critère unique de hiérarchisation du risque. Le résultat, cependant, ne permet pas de caractériser le risque, certainement le plus important, mettant en cause la vie humaine.

L'individualisation de ce risque passe par la rédaction d'une carte mettant en évidence les zones de danger pour l'homme.

Il est donc proposé d'identifier les phénomènes de référence dont l'intensité physique est susceptible de déboucher sur des pertes de vie humaine. Pour chacun des phénomènes retenus, nous disposons d'une carte d'aléa précisant d'une part les secteurs susceptibles de voir la survenance de ces phénomènes, d'autre part la fréquence attendue au travers du pourcentage de surface potentiellement affectée sur la période de référence.

La superposition de ces différentes cartes permet d'atteindre l'objectif fixé (Illustration 16) en classant les secteurs en fonction des fréquences attendues.

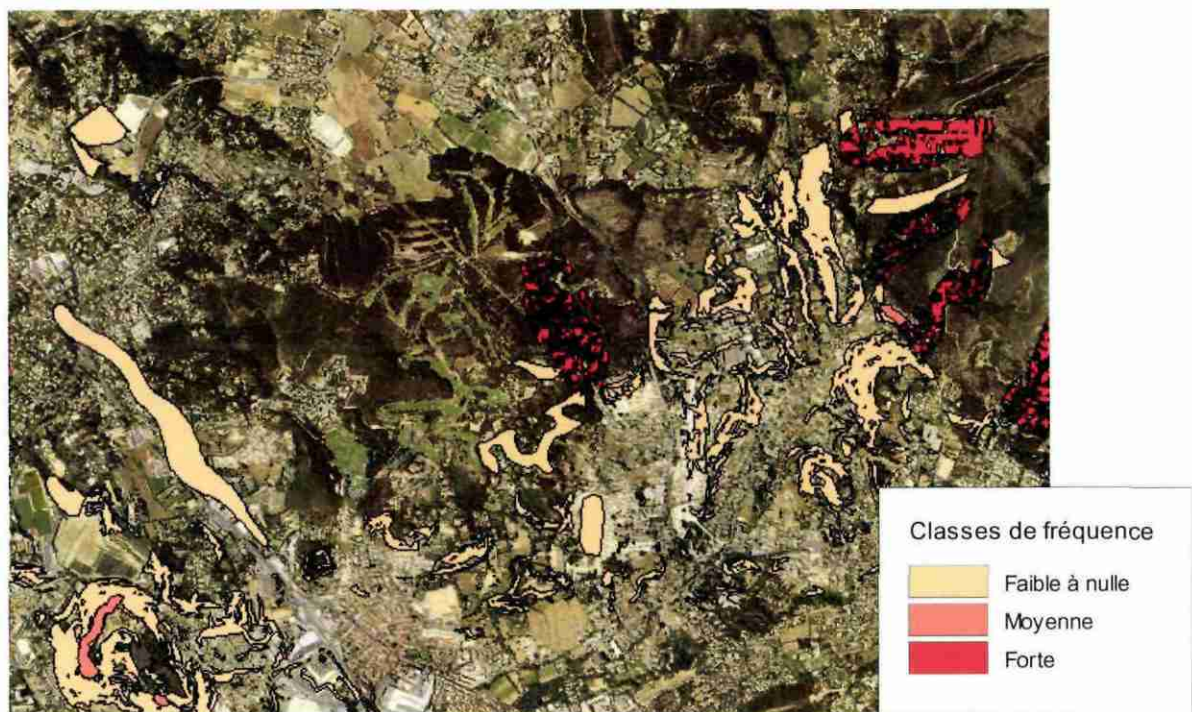


Illustration 16 : Cartographie des zones de danger pour la vie humaine

Par ailleurs, pour évaluer le poids de l'enjeu humain dans la cartographie de synthèse, il peut être utile de réaliser les calculs d'endommagement cumulés sans inclure les coûts liés à cet enjeu.

### 5.3. EVALUATION DE L'INCERTITUDE

Il est clair qu'une analyse prospective de ce type implique une forte incertitude qu'il est indispensable de dimensionner.

Pour cette évaluation de l'incertitude, nous avons retenu une démarche impliquant les étapes suivantes :

- identification des principaux paramètres contrôlant l'incertitude. Sept paramètres principaux ont été retenus :
  - quatre pour la détermination de l'aléa : la surface moyenne impactée, le niveau d'intensité physique, la fréquence, la précision du zonage ;
  - trois pour les enjeux : la détermination du coût unitaire, la précision dans le recensement et la répartition entre types, la précision dans l'appréciation de la vulnérabilité.
- détermination de 5 classes d'incertitudes associées à un facteur multiplicatif  $f_m$  qui peut prendre l'une des valeurs suivantes : 1 / 1,5 / 2 / 5 / 10. Cela signifie que l'on estime que la valeur réelle pourrait se révéler  $f_m$  fois plus grande ou  $f_m$  fois plus petite que la valeur retenue. Un facteur de 1 est affecté à un paramètre que l'on estime suffisamment fiable, le facteur 10 correspond à une incertitude extrême. Les principaux critères pour l'attribution du facteur multiplicatif sont présentés dans le Tableau 22.

| Facteur | Critères                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Le facteur est connu avec une très bonne précision. Les données à l'origine sont fiables et exhaustives.                                                                                                                                                  |
| 1,5     | Le facteur est connu avec une relativement bonne précision. Les données à l'origine sont exhaustives mais il existe des possibilités d'imprécisions qui ne sont pas susceptibles d'influer sur l'ordre de grandeur du paramètre.                          |
| 2       | Le facteur est appréhendé dans son ordre de grandeur. Les données à l'origine peuvent ne pas être totalement exhaustives. Des variations importantes du paramètre sont susceptibles de modifier largement la valeur moyenne retenue comme représentative. |
| 5       | L'ordre de grandeur du facteur est approché. Les données à l'origine sont fragmentaires.                                                                                                                                                                  |
| 10      | Les données à l'origine sont manquantes ou extrêmement fragmentaires. La valeur du facteur est estimée soit à partir de données bibliographiques soit à partir de l'expertise des intervenants.                                                           |

Tableau 22 : Critères de détermination des facteurs d'incertitude

- pour chaque phénomène de référence, on analyse le niveau de fiabilité des 7 paramètres et on affecte à chacun une classe d'incertitude. Pour les enjeux, cette classe est établie par la moyenne entre les différentes catégories d'enjeux. L'exemple d'une telle analyse, réalisée pour un phénomène d'écroulement limité, est donné dans le Tableau 23.

|                                    | Classe d'incertitude |  |  |  |  | Facteur multiplicatif $f_m$ | Commentaires            |
|------------------------------------|----------------------|--|--|--|--|-----------------------------|-------------------------|
| CB50 :<br>Petit écroulement 100 kg |                      |  |  |  |  |                             |                         |
| Surface                            |                      |  |  |  |  | 2                           |                         |
| Intensité physique                 |                      |  |  |  |  | 1.5                         |                         |
| Fréquence                          |                      |  |  |  |  | 5                           |                         |
| Zonage de susceptibilité           |                      |  |  |  |  | 1.5                         |                         |
| Endommagement                      |                      |  |  |  |  | 1.5                         | = Vulnérabilité moyenne |
| Vulnérabilité population           |                      |  |  |  |  | 2                           |                         |
| Vulnérabilité bâti                 |                      |  |  |  |  | 1.5                         |                         |
| Vulnérabilité voirie               |                      |  |  |  |  | 1.5                         |                         |
| Vulnérabilité environnement        |                      |  |  |  |  | 1                           |                         |
| Vulnérabilité véhicules            |                      |  |  |  |  | 1.5                         |                         |
| Coûts unitaires                    |                      |  |  |  |  | 1.4                         | = moyenne               |
| Population                         |                      |  |  |  |  | 1                           |                         |
| Bâti                               |                      |  |  |  |  | 1.5                         |                         |
| Voirie                             |                      |  |  |  |  | 2                           |                         |
| Environnement                      |                      |  |  |  |  | 1                           |                         |
| Véhicules                          |                      |  |  |  |  | 1.5                         |                         |
| Répartition entre types d'enjeux   |                      |  |  |  |  | 1.5                         | = moyenne               |
| Population                         |                      |  |  |  |  | 2                           |                         |
| Bâti                               |                      |  |  |  |  | 1.5                         |                         |
| Voirie                             |                      |  |  |  |  | 1                           |                         |
| Environnement                      |                      |  |  |  |  | 1                           |                         |
| Véhicules                          |                      |  |  |  |  | 2                           |                         |
| Incertitude globale                |                      |  |  |  |  | 14.4                        |                         |

Tableau 23 : Exemple de détermination des classes d'incertitude pour un phénomène de chute de blocs

- à partir de là, deux approches sont poursuivies parallèlement :
  - o l'incertitude est évaluée par une **approche globale** : on maximise ou minimise l'ensemble des paramètres simultanément, et on calcule le facteur multiplicatif global  $F_m$  comme une combinaison des différents facteurs affectés à chaque paramètre (somme ou moyenne selon les paramètres).

- l'incertitude est aussi évaluée par une **approche individualisée**, par analyse de sensibilité : on ne fait varier qu'un paramètre à la fois (valeur maximale ou minimale) pour recalculer le niveau de dommages général correspondant à la nouvelle valeur. On retient ensuite les valeurs extrêmes du dommage ainsi atteintes, ainsi que le ou les paramètres ayant conduit à ces valeurs.

L'approche globale permet de fixer les bornes extrêmes des dommages provoqués. Néanmoins, elle maximise l'incertitude, en ce sens qu'il ne paraît pas raisonnable d'envisager que sur les populations prises en compte, enjeux ou événements, ce soit systématiquement la valeur extrême envisagée qui se produise.

L'approche individualisée implique de faire varier les 15 (3 fois 5) paramètres concernant les enjeux ainsi que les quatre paramètres spécifiques au phénomène pour chacun des phénomènes de référence. Une telle approche n'est possible que parce que les outils SIG utilisés dans ce type d'étude permettent l'insertion des valeurs au sein de tableurs qui automatisent ensuite les traitements. Elle permet d'évaluer plus en détail l'influence de chacun des paramètres en termes de coûts de dommages. Elle apporte donc des informations sur les efforts à fournir aux différents stades de la méthode vis-à-vis d'un niveau d'incertitude recherché : en effet, si la fréquence apparaît comme un paramètre influençant largement le coût des dommages, il pourra être bon de fournir un travail plus important sur celui-ci afin de diminuer l'incertitude finale.

L'analyse de sensibilité menée au terme de l'application de l'ensemble de la méthode sur le site pilote donne un facteur d'incertitude moyen de l'ordre de 3,5. Ce qui signifie que la valeur finale de dommages peut se révéler 3,5 fois plus grande ou 3,5 fois plus petite, en moyenne. Ce facteur varie de 2 à 5 pour 9 des 10 phénomènes de référence traités, et atteint 10 pour le dernier.

Le paramètre identifié comme étant le plus sensible se révèle être la fréquence du phénomène, lors de la cartographie de l'aléa, dans 7 cas sur 10. Les autres paramètres sensibles ressortant de l'analyse sont l'évaluation du niveau d'intensité physique du phénomène, le recensement et la répartition des bâtis ou de la population, l'appréciation de la vulnérabilité des bâtis et la précision du zonage (les paramètres sensibles peuvent différer pour les valeurs minimales et les valeurs maximales, ce qui explique leur nombre supérieur au nombre de phénomènes).

## **5.4. MOYENS A METTRE EN ŒUVRE**

Une fois la méthode développée, sa mise en œuvre sur une agglomération nouvelle implique un certain nombre de moyens.

### **5.4.1. Données en entrée**

Les données en entrée sont de deux types principaux :

- les données de type « archives » ; le principal fournisseur étant les services techniques de la ville. D'autres fournisseurs peuvent également être impliqués (INSEE, bases de données nationales des mouvements de terrain et des cavités, etc.). Comme dans toute étude, il sera également indispensable de réaliser une étude bibliographique exhaustive ;
- les informations associées au terrain : observation des désordres sur le bâti et les infrastructures, des caractéristiques morphologiques des terrains, enquêtes auprès des riverains. Le travail de terrain constituera un poste important de toute étude de ce type.

En début d'étude, il sera indispensable de collecter (ou de produire) les données suivantes :

- SIG de la ville : bâti, voirie, espaces naturels, urbanisme réglementaire ;
- Orthophoto (ou, à défaut, photos aériennes stéréographiques) ;
- Données démographiques (éventuellement disponibles auprès de l'INSEE) ;
- Modèle Numérique de Terrain (MNT) suffisamment précis (maille à 10 ou 20 m) ;
- Carte géologique (éventuellement plus précise que l'échelle du 1 / 50 000, si disponible).

### **5.4.2. Moyens humains et temps nécessaires**

Les travaux à réaliser demandent trois niveaux de compétence :

- un ingénieur expérimenté pour apporter l'expertise indispensable en termes de mouvements de terrain, d'analyse de la vulnérabilité d'une part pour la définition des typologies, phénomènes de références, etc., d'autre part pour réaliser l'analyse critique des résultats produits ;
- un ingénieur d'étude (et/ou un technicien expérimenté) pour la réalisation des cartographies (observations de terrain, traitement des données SIG, etc.) ;

- un stagiaire (ou technicien) pour les travaux systématiques (observations de terrain, comptages de bâtiments, etc.).

Il est possible de proposer une répartition des temps nécessaires, pour chacun de ces profils, en fonction des tâches (cf. Tableau 24). Les temps annoncés correspondent au travail évalué pour une ville de taille moyenne, supérieure à 100 000 habitants.

|                                                                        | Ing.<br>1<br>jours | Ing.<br>2.<br>jours | Stag.<br>mois | Commentaire                 |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| <b>Définition du cadre méthodologique</b>                              |                    |                     |               |                             |
| Définition de la période de référence et de l'échelle de précision     |                    |                     |               | p.m.                        |
| Définition des classes de phénomènes                                   |                    |                     |               | p.m.                        |
| Définition des catégories d'enjeux                                     |                    |                     |               | p.m.                        |
| Etablissement des échelles d'intensité physique                        |                    |                     |               | p.m.                        |
| Etablissement des échelles d'endommagement                             |                    |                     |               | p.m.                        |
| <b>Lancement de l'étude</b>                                            |                    |                     |               |                             |
| Concertation avec les responsables locaux                              | 5                  |                     |               |                             |
| Analyse du contexte local (bibliographie)                              | 2                  | 5                   |               |                             |
| Collecte et mise en forme des données existantes                       |                    | 10                  |               |                             |
| <b>Cartographie de l'aléa</b>                                          |                    |                     |               |                             |
| Définition des phénomènes de référence et évaluation de leur intensité | 2                  |                     |               |                             |
| Cartographie de la susceptibilité aux phénomènes                       | 2                  | 2                   | 3             |                             |
| Evaluation des périodes de retour                                      | 2                  |                     |               |                             |
| Cartographie de l'aléa                                                 | 2                  | 10                  |               |                             |
| <b>Cartographie des enjeux</b>                                         |                    |                     |               |                             |
| Définition de la typologie des enjeux                                  | p.m.               |                     |               | Susceptibles de compléments |
| Etablissement des fonctions de vulnérabilité                           | p.m.               |                     |               |                             |
| Cartographie des enjeux                                                | 5                  | 10                  | 3             |                             |
| Détermination des valeurs unitaires                                    | 2                  | 2                   |               |                             |
| <b>Cartographie du risque</b>                                          |                    |                     |               |                             |
| Croisements topologiques aléas / enjeux                                | 2                  | 10                  |               |                             |
| Etablissement de l'applicatif "tableur" et renseignement des items     |                    | 10                  |               |                             |
| Evaluation de l'incertitude                                            | 2                  | 2                   |               |                             |
| <b>Restitution des résultats</b>                                       |                    |                     |               |                             |
| Rédaction du rapport et des cartographies finales                      | 5                  | 10                  |               |                             |
| <b>Gestion de projet</b>                                               |                    |                     |               |                             |
| Coordination et gestion financière                                     | 5                  |                     |               | 15% du temps ing. 1         |
| <b>TOTAL</b>                                                           | <b>36</b>          | <b>71</b>           | <b>6</b>      |                             |

Tableau 24 : Répartition des temps nécessaires par profils et par tâches

Il est clair que la répartition de la charge de travail des différents profils entre les tâches est susceptible de varier en fonction des niveaux de qualification des différents intervenants. Il n'en reste pas moins que l'ordre de grandeur de l'effort à fournir correspond à 2 mois d'ingénieur expérimenté, 3,5 mois d'ingénieur d'étude et 6 mois de stagiaire, auxquels il conviendra d'ajouter les frais divers d'édition ou de déplacement. Ces valeurs restent, cependant, extrêmement dépendantes des conditions locales (disponibilité des données, complexité géologique, etc.). On peut noter, également, que la relation entre effort à fournir et dimension de la ville n'est pas linéaire, dans la mesure où de nombreuses tâches sont indépendantes des dimensions (collecte des données, mise au point des traitements automatisés, etc.).

Dans l'optique de réalisation d'un PPR, il est intéressant de souligner qu'un certain nombre de réalisations serait commun aux deux études. Ceci concerne, en particulier, l'étude bibliographique et la cartographie de l'aléa, transposables en grande partie d'une étude à l'autre. On peut considérer, dans ce cas, que le travail directement réutilisable peut être estimé à environ 1 ou 2 mois ingénieur.

## 6. Conclusions

Le développement méthodologique réalisé ici a permis de mettre en évidence la faisabilité d'une réelle analyse des risques liés aux mouvements de terrain sur une agglomération.

Un premier résultat concerne la possibilité de donner une dimension aux problèmes en proposant une évaluation du coût global des différents phénomènes. Cette évaluation reste, cependant, approximative, d'une part en termes d'incertitudes dans l'application de la méthode et, d'autre part parce qu'elle ne prend pas en compte, entre autres, les impacts sur l'activité économique ou les dommages évalués en termes de coûts sociaux.

Il n'en reste pas moins que les chiffres potentiellement annoncés ont un intérêt essentiel pour permettre, aux responsables, d'évaluer l'importance du coût pour la collectivité des différents phénomènes qui se cumulent au fil des années. Cette information peut les aider à identifier les priorités entre les différents phénomènes et à déterminer le niveau d'effort correspondant pour diminuer le risque qui leur est associé.

L'application de cette méthode au sein d'une agglomération peut permettre également la hiérarchisation de quartiers entre eux en termes d'importances des problèmes liés aux mouvements de terrain. Parallèlement, par sa reproductibilité, l'application de cette méthode peut permettre la comparaison, au niveau national, entre différentes agglomérations.

Dans une deuxième étape, de telles études pourraient être à la base de scénarios permettant d'anticiper les impacts possibles dus au changement climatique.

En ce qui concerne les moyens à mettre en œuvre, le niveau d'incertitude atteint montre qu'une approche plus rapide (et à moindre coûts) que celle proposée ne permettrait probablement pas d'obtenir un résultat suffisamment fiable pour être réellement utile en termes d'aide à la décision pour les politiques publiques.

D'un point de vue prospectif, on peut souligner que le coût de mise en œuvre de cette méthode pourrait être très fortement réduit si des mesures de cartographies automatiques des éléments exposés (images satellitaires ou autres) pouvaient être mises en œuvre. Toutefois, de tels outils ne sont actuellement pas disponibles et leur développement ne pourrait se concevoir que dans le cadre de programmes de recherche.



## 7. Bibliographie

Boiteux M., Baumstark L. (2001). Transport : choix des investissements et coût des nuisances. Rapport. Commissariat Général du Plan.

Bussenaud M. (2007). Application du scénario risque mouvements de terrain dans les agglomérations urbaines à la ville pilote : Marseille. Rapport de stage. Université Montpellier 2.

Comité LESSLOSS (1997) –: Vulnerability assessment for landslides – Phase II. Rapport, Délivrable 93, 166 p.

Douglas J. (2006) Comparison between the consideration of an element's vulnerability within risk assessments for various natural hazards Natural Hazards and Earth System Sciences, 0000, 0001–6, 2006

GSC, Météo France, Cemagref (2002). Détermination d'une échelle d'intensité en 5 niveaux par type de phénomènes naturels. Phase 6. Validation des échelles + Annexes. MEDD/DPPR/SDPRM. Paris.

Hulsbergern J.G., Carree G.J. (1987). A method for estimating damage to buildings in subsiding areas. European conference on soil mechanics and foundation engineering, Dublin, Vol.2, pp. 699-702.

Léone F. (1996). Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Rapport de thèse. Université Joseph Fourier Grenoble 1.

Milutinovic Z.V., Trendafiloski G.S. (2003) WP4 : Vulnerability of current buildings. Risk-UE Project : An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications <http://www.risk-ue.net>

Mirgon C., Herniot P., Letat B., Leroi E. (2001) - Base de données nationale BDMVT : gestion, développement de la base France et des bases DOM, mise sous Internet et acquisition des archives. BRGM/RP-51242-FR.

Mora S. (1992). Analisis preliminar de la vulnerabilidad economica de la ciudad de Cartago. A causa de los efectos de una avalancha que transite por el rio Reventado. Costa Rica. Colloque Bogota, pp. 571-592.

Office fédéral de l'aménagement du territoire OFAT, Office fédéral de l'économie des eaux OFEE, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (1997). Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations, série Dangers naturels.

Thierry P., Prunier-Leparmentier A.M., Lembezat C., Nowak C., David O., Schönberg M., Plat E., Vanoudheusden E., Vernoux J.F., Vincent M. avec la collaboration de Bourguine B., Herrou E., Laville P. et Robelin Ch. (2007) Cartographie de la susceptibilité à l'apparition de désordres liés à différents phénomènes géologiques sur la Ville de Paris – Rapport final Rapport BRGM RP-55895-FR, 157 pp., 98 Illustrations, 9 tableaux, 3 annexes, 10 planches HT

Thierry P., Vinet L. (2002) Mapping an urban area prone to slope instability: Greater Lyons Bull Eng Geol Environ [DOI 10.1007/s10064-002-0177-y]

UNIGE - Draft document (2003) I Level methodology for the vulnerability assessment of current buildings and guidelines for the implementation-RISK-UE WP4. Vulnerability assessment of current buildings. 28 p.

Zihri G. (2004). Risques liés aux ouvrages souterrains : constitution d'une échelle de dommages. Rapport de thèse. Institut national Polytechnique de Lorraine - Ecole des mines de Nancy.

Zornette N., Nédellec J.-L. Et Vincent M. (2002) avec la collaboration de P. Le Strat – Projet PACTES. Module : Cartographie de l'aléa « mouvements de terrain » dans le bassin versant de l'Hérault. BRGM/RP-51923-FR, 107 p., 47 fig., 7 ann.

## **Annexe 1**

### **Fonctions de vulnérabilité**



## Enjeu Individus

Les fonctions de vulnérabilité vis-à-vis de cet enjeu sont mises en place uniquement pour les individus à l'air libre, la vulnérabilité des individus à l'intérieur des bâtiments étant fonction de la vulnérabilité du bâtiment lui-même.

### Sollicitation = Déplacement vertical

La vulnérabilité est fonction de l'intensité synthétique de la sollicitation (cf. Tableau 10 dans le texte) et de l'extension du phénomène.

|              | Extension faible | Extension moyenne | Extension forte | Extension très forte |
|--------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| Is faible    | très faible      | très faible       | très faible     | très faible          |
| Is moyen     | très faible      | très faible       | très faible     | faible               |
| Is fort      | faible           | faible            | moyen           | moyen                |
| Is très fort | moyen            | fort              | très fort       | très fort            |

### Sollicitation = Déplacement horizontal

La vulnérabilité est fonction de l'intensité synthétique de la sollicitation et de l'extension du phénomène. La profondeur de la surface de rupture n'a pas d'influence.

|              | Extension faible | Extension moyenne | Extension forte | Extension très forte |
|--------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| Is faible    | très faible      | très faible       | très faible     | très faible          |
| Is moyen     | très faible      | très faible       | faible          | faible               |
| Is fort      | faible           | faible            | moyen           | fort                 |
| Is très fort | moyen            | fort              | très fort       | très fort            |

### Sollicitation = Accumulation

| Intensité | Extension faible | Extension moyenne | Extension forte | Extension très forte |
|-----------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| faible    | très faible      | très faible       | très faible     | très faible          |
| moyen     | faible           | faible            | moyen           | moyen                |
| fort      | moyen            | fort              | fort            | fort                 |
| très fort | fort             | très fort         | très fort       | très fort            |

**Sollicitation = Poussée**

| Intensité        | Extension faible | Extension moyenne | Extension forte | Extension très forte |
|------------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| <b>faible</b>    | très faible      | très faible       | très faible     | très faible          |
| <b>moyen</b>     | faible           | faible            | moyen           | fort                 |
| <b>fort</b>      | fort             | très fort         | très fort       | très fort            |
| <b>très fort</b> | très fort        | très fort         | très fort       | très fort            |

**Sollicitation = Impact**

| Intensité        | Extension faible | Extension moyenne | Extension forte | Extension très forte |
|------------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| <b>faible</b>    | faible           | faible            | faible          | moyen                |
| <b>moyen</b>     | moyen            | fort              | fort            | fort                 |
| <b>fort</b>      | fort             | très fort         | très fort       | très fort            |
| <b>très fort</b> | très fort        | très fort         | très fort       | très fort            |

**Sollicitation = Ablation**

| Intensité        | Extension faible | Extension moyenne | Extension forte | Extension très forte |
|------------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| <b>faible</b>    | moyen            | moyen             | fort            | fort                 |
| <b>moyen</b>     | fort             | fort              | très fort       | très fort            |
| <b>fort</b>      | très fort        | très fort         | très fort       | très fort            |
| <b>très fort</b> | très fort        | très fort         | très fort       | très fort            |

## Enjeu Bâtiments

**Sollicitation = Déplacement vertical**

|                     | Extension         | B1          | B2          | B3          | B4          | B5          | B6          |
|---------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Is faible</b>    | <b>Faible</b>     | très faible | très faible | très faible | -           | -           | -           |
|                     | <b>Moyenne</b>    | moyen       | moyen       | faible      | -           | -           | -           |
|                     | <b>Forte</b>      | moyen       | moyen       | moyen       | faible      | -           | -           |
|                     | <b>Très forte</b> | moyen       | moyen       | moyen       | faible      | très faible | très faible |
| <b>Is moyen</b>     | <b>Faible</b>     | moyen       | faible      | faible      | très faible | très faible | très faible |
|                     | <b>Moyenne</b>    | fort        | moyen       | moyen       | faible      | très faible | faible      |
|                     | <b>Forte</b>      | très fort   | fort        | fort        | moyen       | faible      | moyen       |
|                     | <b>Très forte</b> | très fort   | très fort   | très fort   | moyen       | moyen       | moyen       |
| <b>Is fort</b>      | <b>Faible</b>     | fort        | moyen       | moyen       | faible      | faible      | faible      |
|                     | <b>Moyenne</b>    | fort        | fort        | fort        | moyen       | moyen       | moyen       |
|                     | <b>Forte</b>      | très fort   | très fort   | très fort   | fort        | fort        | fort        |
|                     | <b>Très forte</b> | très fort   | très fort   | très fort   | fort        | fort        | fort        |
| <b>Is très fort</b> | <b>Faible</b>     | fort        | fort        | fort        | moyen       | moyen       | moyen       |
|                     | <b>Moyenne</b>    | très fort   | très fort   | très fort   | fort        | fort        | fort        |
|                     | <b>Forte</b>      | très fort   | très fort   | très fort   | fort        | fort        | très fort   |
|                     | <b>Très forte</b> | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   |

**Sollicitation = Déplacement horizontal**

La vulnérabilité est fonction de l'intensité synthétique de la sollicitation, de l'extension du phénomène et de la profondeur de la surface de rupture.

Pour les bâtiments de type B1 et B2, la profondeur de rupture est considérée comme sans influence puisque ces bâtiments n'ont pas de fondations ; pour le type B3, c'est la présence de vitres qui joue le plus, pas le type de fondations.

L'extension joue un rôle important dans l'évaluation de la vulnérabilité. En effet, celle-ci est plus forte pour une extension inférieure à la largeur du bâtiment ; c'est pourquoi pour une intensité donnée, la vulnérabilité sera plus forte pour une extension moyenne (3 m) que pour une extension forte (10 m) ou très forte (50 m) pour les bâtiments type maison ; mais pour les bâtiments plus long, de type immeuble (B5), la vulnérabilité sera plus forte pour une extension forte (10 m) que pour une extension très forte (50 m) qui concernera l'ensemble de la construction - le déplacement sera homogène sur tout l'immeuble (mouvement d'ensemble) - ou pour une extension plus faible (3 m).

|           | Extension | Profondeur de la surface de rupture | B1          | B2          | B3          | B4 | B5 | B6 |
|-----------|-----------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|----|----|----|
| Is faible | faible    | faible                              | très faible | très faible | très faible | -  | -  | -  |
|           |           | moyen                               |             |             |             | -  | -  | -  |
|           |           | fort                                |             |             |             | -  | -  | -  |
|           |           | très fort                           |             |             |             | -  | -  | -  |
|           | moyen     | faible                              | très faible | très faible | très faible | -  | -  | -  |
|           |           | moyen                               |             |             |             | -  | -  | -  |
|           |           | fort                                |             |             |             | -  | -  | -  |
|           |           | très fort                           |             |             |             | -  | -  | -  |
|           | fort      | faible                              | faible      | faible      | faible      | -  | -  | -  |
|           |           | moyen                               |             |             |             | -  | -  | -  |
|           |           | fort                                |             |             |             | -  | -  | -  |
|           |           | très fort                           |             |             |             | -  | -  | -  |
|           | très fort | faible                              | faible      | faible      | faible      | -  | -  | -  |
|           |           | moyen                               |             |             |             | -  | -  | -  |
|           |           | fort                                |             |             |             | -  | -  | -  |
|           |           | très fort                           |             |             |             | -  | -  | -  |

|          | Extension | Pfdeur surface | B1     | B2     | B3          | B4          | B5          | B6          |
|----------|-----------|----------------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Is moyen | faible    | faible         | faible | faible | très faible | très faible | -           | très faible |
|          |           | moyen          |        |        |             | très faible | -           | très faible |
|          |           | fort           |        |        |             | -           | -           | -           |
|          |           | très fort      |        |        |             | -           | -           | -           |
|          | moyen     | faible         | fort   | fort   | moyen       | faible      | très faible | faible      |
|          |           | moyen          |        |        |             | faible      | très faible | faible      |
|          |           | fort           |        |        |             | très faible | très faible | très faible |
|          |           | très fort      |        |        |             | très faible | très faible | très faible |
|          | fort      | faible         | moyen  | moyen  | faible      | faible      | très faible | très faible |
|          |           | moyen          |        |        |             | faible      | très faible | très faible |
|          |           | fort           |        |        |             | très faible | très faible | très faible |
|          |           | très fort      |        |        |             | très faible | très faible | très faible |
|          | très fort | faible         | moyen  | moyen  | faible      | faible      | très faible | faible      |
|          |           | moyen          |        |        |             | faible      | très faible | faible      |
|          |           | fort           |        |        |             | très faible | très faible | faible      |
|          |           | très fort      |        |        |             | très faible | très faible | faible      |

|         | Extension | Pfdeur surface | B1    | B2    | B3    | B4          | B5          | B6          |
|---------|-----------|----------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|
| Is fort | faible    | faible         | moyen | moyen | moyen | faible      | très faible | très faible |
|         |           | moyen          |       |       |       | faible      | très faible | très faible |
|         |           | fort           |       |       |       | très faible | très faible | très faible |
|         |           | très fort      |       |       |       | très faible | très faible | très faible |
|         | moyen     | faible         | fort  | fort  | fort  | fort        | faible      | moyen       |
|         |           | moyen          |       |       |       | fort        | faible      | moyen       |
|         |           | fort           |       |       |       | moyen       | faible      | moyen       |
|         |           | très fort      |       |       |       | moyen       | très faible | moyen       |
|         | fort      | faible         | fort  | fort  | fort  | moyen       | fort        | moyen       |
|         |           | moyen          |       |       |       | moyen       | fort        | moyen       |
|         |           | fort           |       |       |       | faible      | fort        | faible      |
|         |           | très fort      |       |       |       | faible      | moyen       | faible      |
|         | très fort | faible         | fort  | fort  | fort  | moyen       | moyen       | moyen       |
|         |           | moyen          |       |       |       | moyen       | moyen       | moyen       |
|         |           | fort           |       |       |       | faible      | moyen       | faible      |
|         |           | très fort      |       |       |       | faible      | faible      | faible      |

|                     | Extension        | Pfdeur surface   | B1        | B2        | B3        | B4        | B5          | B6        |
|---------------------|------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| <b>Is très fort</b> | <b>faible</b>    | <b>faible</b>    | fort      | fort      | fort      | moyen     | faible      | moyen     |
|                     |                  | <b>moyen</b>     |           |           |           | moyen     | faible      | moyen     |
|                     |                  | <b>fort</b>      |           |           |           | faible    | faible      | faible    |
|                     |                  | <b>très fort</b> |           |           |           | faible    | très faible | faible    |
|                     | <b>moyen</b>     | <b>faible</b>    | très fort | très fort | très fort | très fort | moyen       | fort      |
|                     |                  | <b>moyen</b>     |           |           |           | très fort | moyen       | fort      |
|                     |                  | <b>fort</b>      |           |           |           | très fort | moyen       | moyen     |
|                     |                  | <b>très fort</b> |           |           |           | fort      | faible      | moyen     |
|                     | <b>fort</b>      | <b>faible</b>    | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort   | très fort |
|                     |                  | <b>moyen</b>     |           |           |           | très fort | très fort   | très fort |
|                     |                  | <b>fort</b>      |           |           |           | fort      | très fort   | très fort |
|                     |                  | <b>très fort</b> |           |           |           | moyen     | fort        | fort      |
|                     | <b>très fort</b> | <b>faible</b>    | très fort | très fort | très fort | très fort | fort        | très fort |
|                     |                  | <b>moyen</b>     |           |           |           | très fort | fort        | très fort |
|                     |                  | <b>fort</b>      |           |           |           | fort      | fort        | très fort |
|                     |                  | <b>très fort</b> |           |           |           | moyen     | moyen       | très fort |



**Sollicitation = Accumulation**

| <b>Intensité</b>  | <b>Extension</b>  | <b>B1</b>   | <b>B2</b>   | <b>B3</b>   | <b>B4</b>   | <b>B5</b>   | <b>B6</b>   |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>faible</b>     | <b>Faible</b>     | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Forte</b>      | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Très forte</b> | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible |
| <b>moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Moyenne</b>    | faible      | très faible | faible      | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Forte</b>      | moyen       | faible      | faible      | très faible | très faible | faible      |
|                   | <b>Très forte</b> | moyen       | faible      | faible      | très faible | très faible | faible      |
| <b>forte</b>      | <b>Faible</b>     | faible      | faible      | faible      | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Moyenne</b>    | moyen       | faible      | moyen       | très faible | très faible | faible      |
|                   | <b>Forte</b>      | moyen       | faible      | moyen       | très faible | très faible | faible      |
|                   | <b>Très forte</b> | fort        | faible      | moyen       | très faible | très faible | faible      |
| <b>très forte</b> | <b>Faible</b>     | moyen       | moyen       | moyen       | faible      | faible      | faible      |
|                   | <b>Moyenne</b>    | fort        | moyen       | fort        | faible      | faible      | faible      |
|                   | <b>Forte</b>      | fort        | moyen       | fort        | faible      | faible      | moyen       |
|                   | <b>Très forte</b> | fort        | moyen       | fort        | faible      | faible      | moyen       |

**Sollicitation = Poussée**

| Intensité         | Extension         | B1          | B2          | B3          | B4          | B5          | B6          |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>faible</b>     | <b>Faible</b>     | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
|                   | <b>Moyenne</b>    | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
|                   | <b>Forte</b>      | très faible | -           | -           | -           | -           | très faible |
|                   | <b>Très forte</b> | très faible | -           | -           | -           | -           | très faible |
| <b>moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | faible      | -           | très faible | -           | -           | très faible |
|                   | <b>Moyenne</b>    | moyen       | très faible | faible      | très faible | -           | faible      |
|                   | <b>Forte</b>      | moyen       | faible      | faible      | faible      | très faible | moyen       |
|                   | <b>Très forte</b> | fort        | moyen       | faible      | faible      | faible      | moyen       |
| <b>forte</b>      | <b>Faible</b>     | moyen       | faible      | faible      | faible      | faible      | faible      |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort   | faible      | faible      | faible      | faible      | moyen       |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort   | moyen       | moyen       | fort        | moyen       | fort        |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort   | moyen       | moyen       | fort        | moyen       | fort        |
| <b>très forte</b> | <b>Faible</b>     | fort        | fort        | fort        | moyen       | moyen       | moyen       |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort   | très fort   | fort        | fort        | moyen       | fort        |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   | fort        | très fort   |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   |

**Sollicitation = Impact**

| <b>Intensité</b>  | <b>Extension</b>  | <b>B1</b>   | <b>B2</b>   | <b>B3</b> | <b>B4</b>   | <b>B5</b>   | <b>B6</b>   |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| <b>faible</b>     | <b>Faible</b>     | très faible | -           | faible    | -           | -           | -           |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très faible | -           | faible    | -           | -           | -           |
|                   | <b>Forte</b>      | très faible | -           | faible    | -           | -           | -           |
|                   | <b>Très forte</b> | très faible | -           | faible    | -           | -           | -           |
| <b>moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | faible      | très faible | faible    | -           | -           | -           |
|                   | <b>Moyenne</b>    | moyen       | faible      | faible    | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Forte</b>      | moyen       | faible      | moyen     | faible      | faible      | faible      |
|                   | <b>Très forte</b> | moyen       | faible      | moyen     | faible      | faible      | faible      |
| <b>forte</b>      | <b>Faible</b>     | moyen       | faible      | moyen     | faible      | faible      | faible      |
|                   | <b>Moyenne</b>    | fort        | moyen       | fort      | faible      | faible      | faible      |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort   | fort        | très fort | moyen       | faible      | faible      |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort   | fort        | très fort | moyen       | faible      | faible      |
| <b>très forte</b> | <b>Faible</b>     | très fort   | fort        | très fort | moyen       | moyen       | moyen       |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort   | très fort   | très fort | fort        | moyen       | fort        |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort   | très fort   | très fort | très fort   | fort        | très fort   |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort   | très fort   | très fort | très fort   | très fort   | très fort   |

**Sollicitation = Ablation**

| <b>Intensité</b>  | <b>Extension</b>  | <b>B1</b> | <b>B2</b> | <b>B3</b> | <b>B4</b> | <b>B5</b> | <b>B6</b> |
|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>faible</b>     | <b>Faible</b>     | fort      | moyen     | moyen     | faible    | faible    | faible    |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort | fort      | fort      | moyen     | moyen     | moyen     |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort | très fort | très fort | fort      | fort      | fort      |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort | très fort | très fort | fort      | fort      | fort      |
| <b>moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | fort      | fort      | fort      | moyen     | moyen     | moyen     |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort | très fort | très fort | fort      | fort      | fort      |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |
| <b>forte</b>      | <b>Faible</b>     | très fort | très fort | très fort | fort      | fort      | fort      |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |
| <b>très forte</b> | <b>Faible</b>     | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort | très fort |

## Enjeu Infrastructures et fonctions de transports

Vis-à-vis de cet enjeu, l'effet de poussée n'intervient pas ; les fonctions de vulnérabilité ne sont donc pas développées.

### Sollicitation = Déplacement vertical

|                      | Extension         | R1          | R2          |
|----------------------|-------------------|-------------|-------------|
| <b>Is faible</b>     | <b>Faible</b>     | -           | -           |
|                      | <b>Moyenne</b>    | très faible | -           |
|                      | <b>Forte</b>      | très faible | très faible |
|                      | <b>Très forte</b> | très faible | très faible |
| <b>Is moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | faible      | -           |
|                      | <b>Moyenne</b>    | faible      | très faible |
|                      | <b>Forte</b>      | faible      | faible      |
|                      | <b>Très forte</b> | faible      | faible      |
| <b>Is forte</b>      | <b>Faible</b>     | moyen       | faible      |
|                      | <b>Moyenne</b>    | moyen       | faible      |
|                      | <b>Forte</b>      | fort        | moyen       |
|                      | <b>Très forte</b> | fort        | moyen       |
| <b>Is très forte</b> | <b>Faible</b>     | fort        | moyen       |
|                      | <b>Moyenne</b>    | très fort   | fort        |
|                      | <b>Forte</b>      | très fort   | très fort   |
|                      | <b>Très forte</b> | très fort   | très fort   |

### Sollicitation = Déplacement horizontal

Ni la profondeur de la surface de rupture, ni l'extension latérale du phénomène n'interviennent dans l'évaluation de la vulnérabilité de cet enjeu.

|                     | R1          | R2          |
|---------------------|-------------|-------------|
| <b>Is faible</b>    | très faible | très faible |
| <b>Is moyen</b>     | faible      | très faible |
| <b>Is fort</b>      | moyen       | moyen       |
| <b>Is très fort</b> | très fort   | très fort   |

**Sollicitation = Accumulation**

| Intensité  | R1        | R2        |
|------------|-----------|-----------|
| Faible     | faible    | faible    |
| Moyenne    | moyen     | moyen     |
| Forte      | fort      | fort      |
| Très forte | très fort | très fort |

**Sollicitation = Impact**

| Intensité  | R1          | R2          |
|------------|-------------|-------------|
| Faible     | très faible | très faible |
| Moyenne    | faible      | faible      |
| Forte      | moyen       | moyen       |
| Très forte | fort        | fort        |

**Sollicitation = Ablation**

| Intensité  | Extension  | R1        | R2          |
|------------|------------|-----------|-------------|
| Faible     | Faible     | faible    | très faible |
|            | Moyenne    | moyen     | faible      |
|            | Forte      | fort      | moyen       |
|            | Très forte | très fort | fort        |
| Moyenne    | Faible     | moyen     | faible      |
|            | Moyenne    | fort      | moyen       |
|            | Forte      | très fort | très fort   |
|            | Très forte | très fort | très fort   |
| Forte      | Faible     | fort      | faible      |
|            | Moyenne    | très fort | moyen       |
|            | Forte      | très fort | très fort   |
|            | Très forte | très fort | très fort   |
| Très forte | Faible     | très fort | très fort   |
|            | Moyenne    | très fort | très fort   |
|            | Forte      | très fort | très fort   |
|            | Très forte | très fort | très fort   |

## Enjeu Surfaces naturelles

**Sollicitation = Déplacement vertical**

|                      | Extension         | T1          | T2          | T3          | EL          |
|----------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Is faible</b>     | <b>Faible</b>     | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                      | <b>Moyenne</b>    | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                      | <b>Forte</b>      | très faible | très faible | faible      | très faible |
|                      | <b>Très forte</b> | très faible | très faible | faible      | très faible |
| <b>Is moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | très faible | très faible | moyen       | très faible |
|                      | <b>Moyenne</b>    | très faible | très faible | moyen       | très faible |
|                      | <b>Forte</b>      | très faible | très faible | fort        | très faible |
|                      | <b>Très forte</b> | très faible | très faible | fort        | très faible |
| <b>Is forte</b>      | <b>Faible</b>     | faible      | moyen       | fort        | faible      |
|                      | <b>Moyenne</b>    | faible      | moyen       | fort        | moyen       |
|                      | <b>Forte</b>      | moyen       | fort        | très fort   | moyen       |
|                      | <b>Très forte</b> | moyen       | fort        | très fort   | moyen       |
| <b>Is très forte</b> | <b>Faible</b>     | moyen       | fort        | très fort   | moyen       |
|                      | <b>Moyenne</b>    | fort        | fort        | très fort   | fort        |
|                      | <b>Forte</b>      | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   |
|                      | <b>Très forte</b> | très fort   | très fort   | très fort   | très fort   |

**Sollicitation = Déplacement horizontal**

La profondeur de la surface de rupture n'entre pas en jeu ici.

|                      | Extension         | T1          | T2          | T3          | EL          |
|----------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Is faible</b>     | <b>Faible</b>     | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                      | <b>Moyenne</b>    | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                      | <b>Forte</b>      | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                      | <b>Très forte</b> | très faible | très faible | très faible | très faible |
| <b>Is moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                      | <b>Moyenne</b>    | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                      | <b>Forte</b>      | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                      | <b>Très forte</b> | très faible | très faible | très faible | très faible |
| <b>Is forte</b>      | <b>Faible</b>     | faible      | faible      | faible      | faible      |
|                      | <b>Moyenne</b>    | faible      | faible      | faible      | moyen       |
|                      | <b>Forte</b>      | faible      | faible      | moyen       | moyen       |
|                      | <b>Très forte</b> | faible      | faible      | fort        | moyen       |
| <b>Is très forte</b> | <b>Faible</b>     | fort        | fort        | fort        | moyen       |
|                      | <b>Moyenne</b>    | fort        | fort        | fort        | fort        |
|                      | <b>Forte</b>      | fort        | fort        | très fort   | fort        |
|                      | <b>Très forte</b> | fort        | fort        | très fort   | très fort   |

**Sollicitation = Accumulation**

| Intensité         | Extension         | T1          | T2        | T3        | EL          |
|-------------------|-------------------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| <b>Faible</b>     | <b>Faible</b>     | très faible | faible    | faible    | très faible |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très faible | faible    | moyen     | faible      |
|                   | <b>Forte</b>      | faible      | moyen     | fort      | faible      |
|                   | <b>Très forte</b> | faible      | moyen     | fort      | faible      |
| <b>Moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | très faible | faible    | faible    | faible      |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très faible | faible    | moyen     | faible      |
|                   | <b>Forte</b>      | moyen       | fort      | fort      | moyen       |
|                   | <b>Très forte</b> | moyen       | fort      | très fort | moyen       |
| <b>Forte</b>      | <b>Faible</b>     | moyen       | moyen     | moyen     | moyen       |
|                   | <b>Moyenne</b>    | moyen       | moyen     | fort      | moyen       |
|                   | <b>Forte</b>      | fort        | fort      | très fort | fort        |
|                   | <b>Très forte</b> | fort        | fort      | très fort | fort        |
| <b>Très forte</b> | <b>Faible</b>     | fort        | fort      | fort      | fort        |
|                   | <b>Moyenne</b>    | fort        | fort      | très fort | fort        |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort   | très fort | très fort | très fort   |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort   | très fort | très fort | très fort   |

**Sollicitation = Impact**

| Intensité         | Extension         | T1          | T2          | T3          | EL          |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Faible</b>     | <b>Faible</b>     | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très faible | très faible | très faible | très faible |
|                   | <b>Forte</b>      | faible      | faible      | très faible | très faible |
|                   | <b>Très forte</b> | faible      | faible      | très faible | très faible |
| <b>Moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | faible      | faible      | faible      | faible      |
|                   | <b>Moyenne</b>    | moyen       | moyen       | faible      | faible      |
|                   | <b>Forte</b>      | moyen       | moyen       | faible      | moyen       |
|                   | <b>Très forte</b> | fort        | fort        | faible      | moyen       |
| <b>Forte</b>      | <b>Faible</b>     | faible      | faible      | faible      | faible      |
|                   | <b>Moyenne</b>    | moyen       | moyen       | faible      | faible      |
|                   | <b>Forte</b>      | moyen       | moyen       | moyen       | moyen       |
|                   | <b>Très forte</b> | moyen       | moyen       | moyen       | moyen       |
| <b>Très forte</b> | <b>Faible</b>     | fort        | fort        | faible      | moyen       |
|                   | <b>Moyenne</b>    | fort        | fort        | faible      | fort        |
|                   | <b>Forte</b>      | fort        | fort        | moyen       | fort        |
|                   | <b>Très forte</b> | fort        | très fort   | moyen       | fort        |

**Sollicitation = Ablation**

| Intensité         | Extension         | T1        | T2        | T3        | EL        |
|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Faible</b>     | <b>Faible</b>     | faible    | faible    | moyen     | faible    |
|                   | <b>Moyenne</b>    | faible    | faible    | moyen     | faible    |
|                   | <b>Forte</b>      | moyen     | moyen     | fort      | moyen     |
|                   | <b>Très forte</b> | moyen     | moyen     | fort      | moyen     |
| <b>Moyenne</b>    | <b>Faible</b>     | moyen     | fort      | très fort | fort      |
|                   | <b>Moyenne</b>    | moyen     | fort      | très fort | fort      |
|                   | <b>Forte</b>      | fort      | fort      | très fort | fort      |
|                   | <b>Très forte</b> | fort      | fort      | très fort | fort      |
| <b>Forte</b>      | <b>Faible</b>     | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort | très fort | très fort | très fort |
| <b>Très forte</b> | <b>Faible</b>     | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Moyenne</b>    | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Forte</b>      | très fort | très fort | très fort | très fort |
|                   | <b>Très forte</b> | très fort | très fort | très fort | très fort |

## Enjeu Mobilier urbain - Véhicules

On considère les véhicules à l'arrêt. De ce fait, l'extension du phénomène n'intervient pas, sauf pour l'ablation.

### Sollicitation = Déplacement vertical

|               | V           |
|---------------|-------------|
| Is Faible     | très faible |
| Is Moyenne    | très faible |
| Is Forte      | faible      |
| Is Très forte | très fort   |

### Sollicitation = Déplacement horizontal

|               | V           |
|---------------|-------------|
| Is Faible     | très faible |
| Is Moyenne    | très faible |
| Is Forte      | très faible |
| Is Très forte | très faible |

### Sollicitation = Accumulation

| Intensité  | V         |
|------------|-----------|
| Faible     | faible    |
| Moyenne    | moyen     |
| Forte      | fort      |
| Très forte | très fort |

### Sollicitation = Impact

| Intensité  | V         |
|------------|-----------|
| Faible     | moyen     |
| Moyenne    | très fort |
| Forte      | très fort |
| Très forte | très fort |

**Sollicitation = Poussée**

| Intensité  | V           |
|------------|-------------|
| Faible     | très faible |
| Moyenne    | fort        |
| Forte      | très fort   |
| Très forte | très fort   |

**Sollicitation = Ablation**

| Intensité  | Extension  | V           |
|------------|------------|-------------|
| Faible     | Faible     | très faible |
|            | Moyenne    | moyen       |
|            | Forte      | moyen       |
|            | Très forte | moyen       |
| Moyenne    | Faible     | très faible |
|            | Moyenne    | fort        |
|            | Forte      | fort        |
|            | Très forte | fort        |
| Forte      | Faible     | très faible |
|            | Moyenne    | très fort   |
|            | Forte      | très fort   |
|            | Très forte | très fort   |
| Très forte | Faible     | très faible |
|            | Moyenne    | très fort   |
|            | Forte      | très fort   |
|            | Très forte | très fort   |



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique  
Service ARN**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34