

## INTRODUCTION GENERALE

---

L'augmentation de la population a fait grimper la demande d'aménagement de terrains pour la construction de maisons, d'infrastructures et d'autres installations. Simultanément, la disponibilité des sols à urbaniser s'est restreinte par le grand besoin de protéger les aires naturelles et les terres agricoles.

En conséquence de ces pressions combinées, on a tendance à vouloir réaliser nos constructions en zones marginales, comme celles menacées par des phénomènes naturels tels que les mouvements de pente. D'ailleurs, ceux-ci sont classés parmi les catastrophes les plus spectaculaires et parfois les plus meurtrières. Depuis une trentaine d'années, l'effet destructeur de ces événements naturels s'intensifie du fait qu'ils *frappent* des zones de plus en plus peuplées et que l'homme, dans la plupart des cas, néglige ou ignore l'équilibre établi par la nature.

A titre d'exemple, dans le monde, les mouvements de terrain provoquent la mort de 800 à 1000 personnes par ans. Mais ce chiffre ne prend pas en compte les glissements dus aux séismes, probablement les plus meurtriers. En fait, on s'est tout d'abord essentiellement préoccupé de secourir les victimes, mais on se rend compte, aujourd'hui, que les catastrophes naturelles sont un formidable obstacle au développement économique et social. De plus, exprimées en pourcentage du produit national brut, les pertes qu'elles causent dans les pays en voie de développement qui y sont particulièrement exposés, annihilent, et au-delà, toute croissance économique réelle. (d'après le Bureau du Coordonnateur des Nations Unies pour les secours en cas de catastrophe, Genève, Suisse).

Malheureusement, nous ne pouvant pas, le plus souvent, nous opposer de front aux excès de la nature, qu'ils soient d'origine atmosphérique ou tellurique, mais il est possible de déceler et de localiser les principaux secteurs où ces phénomènes ont le plus de chances de survenir. A partir de là on peut, dans le meilleur des cas, chercher à les éviter ou à s'en protéger, et dans tous les cas, faire en sorte que leurs effets soient les moins dommageables possibles.

Pour atteindre ces objectifs et pour une meilleure conception des opérations d'aménagement des terrains en pente, ainsi qu'une meilleure maîtrise des travaux de réalisation, et ce dans le souci d'optimiser les coûts de ces opérations, personne ne contestera l'intérêt d'utiliser à l'amont les méthodes cartographiques.

Ces dernières permettent de réaliser les inventaires et des synthèses à différentes échelles qui, complétées par des mesures de protection et des réglementations, sont la base d'une prévention efficace. N'est ce pas HAROUN TAZZIEF qui disait à ce sujet, en 1983 « *il n'y aura de prévention efficace que si les lois existantes sont enfin respectées, et si celles qui manquent encore sont tout d'abord promulguées, ensuite appliquées* ».

Dans ce contexte, un certain nombre de méthodes préventives se sont développées ces dernières années, parmi lesquels les *cartes d'aléa naturel* ont pris une place particulière. Ainsi, l'évaluation de l'aléa dû aux mouvements de pente fait de plus en plus partie des préoccupations de nos sociétés et de nos décideurs.

Dans le cadre de la réglementation algérienne en vigueur, chaque parcelle à urbaniser doit faire l'objet d'une caractérisation et d'une cartographie de l'aléa des mouvements de pente.

Ainsi, les cartes réalisées répondent aux besoins des aménageurs et des constructeurs de disposer d'une documentation synthétique et aisément accessible, relative au sol de la zone étudiée, et constituent un instrument d'orientation pour l'aménagement et l'urbanisme.

A travers ce mémoire, nous essayons d'établir ce type de cartographie ainsi de voir les différentes notions qui caractérisent l'aléa naturel. Il est composé de quatre chapitres résumés comme suit :

Dans le premier chapitre, il nous a paru utile, avant tout, d'exposer les principales familles de mouvements de pente ainsi que les facteurs, permanents et variables dans le temps, qui favorisent le déclenchement de ces phénomènes. Bien sûr la détermination de l'aléa dépend du type de mouvement et des facteurs qui engendrent cet instabilité.

Dans le second chapitre, nous présentons un bref aperçu sur quelques méthodes d'évaluation de l'aléa des mouvements de pente, qui ont été ou qui peuvent être introduites dans le dossier géotechnique d'urbanisme ou dans les plans d'occupation du sol.

Par la suite, le troisième chapitre présente l'art et la manière de réalisation d'une cartographie, ainsi que les principes d'élaboration d'une carte d'aléa naturel et les différentes cartographies liées aux mouvements de pente.

Nous nous sommes ensuite intéressés, dans le dernier chapitre, à l'étude de cas. Nous avons réalisé des cartes d'aléa des mouvements de pente pour des zones à urbaniser, situées à la commune de Hammam Bou Hanifia, wilaya de Mascara.

Enfin nous terminons cette étude par une conclusion regroupant les différents résultats et quelques propositions de sujets à traiter.

# CHAPITRE 1

## LES MOUVEMENTS DE PENTE

---

### 1. INTRODUCTION

Depuis 1846 l'homme (A. COLLIN, PETERSON, FELLEUS, BISHOP, MORGENSTERN, etc.) s'intéressait aux phénomènes de mouvements de pente concernant leurs morphologies, facteurs d'instabilité et causes, calcul et analyse de la stabilité des pentes. Ceci après les problèmes rencontrés fréquemment dans la construction des ouvrages, aménagement du territoire et urbanisation de nouveaux terrains.

Par la suite, ce chapitre met le point sur la typologie des mouvements de pente recensé dans la littérature, ainsi que les facteurs déterminants dans la genèse de ces événements.

### 2. DEFINITION

Les mouvements de pente regroupent tous les processus de transport en bloc, un volume plus au moins grand de matériaux d'un versant (R. COQUE, 1977). Selon la vitesse du mouvement, ils se répartissent en deux familles :

- Les déformations lentes, reptation et fauchage ;
- Les mouvements de terrain.

La reptation est un déplacement lent et continu de l'ensemble du matériau, résultant d'une infinité de très petits mouvements de particules les unes par rapport aux autres (M. CAMPY et J.J. MACAIRE, 1989). La caractéristique essentielle de la reptation est l'absence d'une limite nette entre zone mobile et zone stable.

Le fauchage désigne une évolution lente des *têtes de couches* qui s'incurvent peu à peu vers le bas sous l'effet de la gravité (P. ANTOINE et D. FABRE, 1980). Il est très fréquent sur les versants où la stratification ou la schistosité sont proches de la verticale.

Les mouvements de terrain impliquent une rupture et un déplacement simultané des matériaux (J.C. FLAGEOLLET, 1989). Ils sont divisés en quatre catégories ; définies par Colas et Pilot en 1976 et repris d'une manière universelle.

- Les chutes ;
- Les glissements de terrain ;
- Les coulées ;
- Le fluage et les solifluxions.

La distinction entre ces différentes classes se fait généralement selon l'agent de déplacement, la nature du matériau et la surface de rupture.

### 3. TYPOLOGIE DES MOUVEMENTS DE PENTE

Sous l'expression générique *mouvements de pente* sont regroupés plusieurs types de phénomènes d'instabilité des terrains, variables en fonction de la nature des matériaux mis en jeu, de la dimension, du mécanisme, de la cinématique, etc.

### 3.1. Terminologie

Les mouvements de pentes regroupent un ensemble de déplacements, plus ou moins brutaux, du sol ou du sous-sol d'origine naturelle ou anthropique.

Dans la description d'un glissement de terrain, A. MILLIES LACROIX, en 1981, a distingué trois secteurs : (figure 1.1)

- Le secteur amont, zone de départ ou d'arrachement ;
- Le secteur central ou corps de glissement en forme de dépression ;
- Le secteur aval qui présente parfois deux parties : Le pied généralement soulevé en un bourrelet ; le front constitue la langue qui progresse vers l'aval sur la pente qu'elle recouvre sous forme de coulée boueuse.

Ces éléments géomorphologiques présentés sont ceux d'un glissement rotationnel évoluant en coulée. Pour les chutes et éboulements, la morphologie se limite à une zone de départ avec la masse éboulée qui représente le corps.

### 3.2. Classifications

Par la diversité des facteurs responsables des glissements de terrain, il existe de nombreuses classifications qui ont été proposées par des géologues, des mécaniciens ou des géotechniciens.

Ces classifications nous permettent de dénommer les principaux types de mouvement de pentes, de telle façon qu'elles évoquent certaines de leurs caractéristiques essentielles ou permettent de les retrouver.

Bien sur, les premières étaient simples car elles s'appuyaient sur des observations. En 1846, A. COLLIN propose une classification basée sur la forme et la dimension de la masse déplacée.

K. TERZAGHI (1925) fait intervenir la mécanique des sols pour le classement des mouvements de terrains. Il distingue d'une part les mouvements se produisant à sec, et d'autre part, les mouvements impliquant des formations plastiques (tableau 1.1). Mais cette classification ne mentionne pas les mouvements liés à la solifluxion.

C.F.S. SHARPE en 1938 propose une répartition assez exhaustive qui tient compte de nombreux critères :

- Type de matériau ;
- Type ou forme de mouvement ;
- Dimensions du mouvement ;
- Causes du mouvement ;
- Vitesse de mouvement ;
- Organisation du matériau à l'intérieur de la masse glissée ;
- Relation entre masse en mouvement et son substratum.

Mais cette classification reste essentiellement fondée sur trois facteurs, le mode de mouvement, la teneur en eau et le type du matériau (tableau 1.2).

J.P. BOMBARD (1968) propose quatre critères qui peuvent être à la base d'une classification des mouvements de terrain :

- Le mode de mouvement ;
- Le type du matériau ;
- Les dimensions du mouvement ;
- La vitesse du mouvement.

L'inconvénient de cette classification, reste que la vitesse du mouvement est difficile à mesurer avec précision, et elle est très variable dans l'espace et dans le temps, du fait qu'il y a des phases d'accélération et de ralentissement dans la cinétique du mouvement.



**Tableau 1.1** Classification des mouvements de terrain, K. TERZAGHI (1925)

ORDRE	GROUPE	CLASSE	VARIETE
A./ Mouvements à sec	I./ Reptation (mouvement de masse, continu)	1. Reptation de sol	
		2. Reptation d'éboulis (matériaux meubles)	
	II./ Glissements (mouvement de masse rapide)	- gravier	
		- glacier rocheux	
		3. Mouvements de roches	Ecrolement de roches
		4. Mouvements d'éboulis (matériaux meubles)	
III./ Affaissement et coulées (résultat d'une variation rapide de la porosité)	5. Glissements mixtes	Glissement dans gravier	
	6. Sables bouillants et coulées de terre		
	7. Chutes, coulées de sable		
B./ Mouvements plastique	IV./ Dislocation et coulées (résultat d'une dislocation après gonflement et fragmentation)	8. Sédiments lacustres	Cendres volcaniques Dépôts lacustres anciens Dépôts lacustres récents Dépôts lacustres mixtes
		9. Desquamation et altération	
	V./ Coulées résultant d'une suppression hydrostatique	10. Glissement profond dans les matériaux homogènes	
		11. Glissement profond dans matériaux hétérogènes	
		12. Reprise de mouvement dans un ancien glissement	
	VI./ Expulsion (diminution de la résistance sous l'action d'une forte sous-pression)	13. Glissement suivant des plans et joints de stratification	
14. Compression et expulsion résultant de sous-pressions locales			
15. Gonflement résultant d'une baisse de la pression			
		16. Expulsion résultant de sous-pressions locales	

**Tableau 1.2** Classification des mouvements de terrain, C.F.S. SHARPE (1938)

MOUVEMENT		TERRE ou ROCHE					
TYPE	VITESSE	GLACE			EAU		
		Glace dominant	Terre ou roche + glace	Terre ou roche, sec ou peu d'eau	Terre ou roche + eau	Eau dominant	
COULEE	Habituellement imperceptible	TRANSPORT CALCAIRE	Reptation de Rock-glacier	REPTATION DE ROCHES			
	Lent à rapide		SOLIFLUXION	REPTATION D'ÉBOULIS	SOLIFLUXION		
	perceptible		AVALANCHE DE DEBRIS		COULEE DE TERRE		
rapide				COULEE DE BOUE (mudflow)			
GLISSEMENT	Lent à rapide				Glissement « rotationnel »		TRANSPORT FLUVIATIL
	perceptible				Glissement de débris		
	très rapide			Écroulement de débris			
				GLISSEMENT DE ROCHES			
				ECROULEMENT			
Glissement ou coulée	Brusque ou lent			AFFAISSEMENT - EFFONDREMENT			





J.P. MOUGIN (1973) intègre l'existence et la forme de la surface de rupture, il s'est basé sur quelques critères observables sur le terrain tels que : (figure 1.2)

- Existence d'une surface de rupture et sa forme ;
- Le degré de relation de cette surface avec le contexte géologique ;
- Le degré de remaniement de la masse glissée ;
- La nature des terrains impliqués ;
- L'extension de la masse glissée.

G. COLAS et G. PILOT (1976) proposent une classification basée sur deux critères fondamentaux, qui sont :

- La nature du matériau ;
- Le type de déplacement.

Enfin et dans un cadre plus général, on peut classer ces phénomènes suivant la rhéologie et suivant la nature des matériaux glissés.

Sous l'angle rhéologique, les mouvements de pente sont classés en deux grandes familles :

- Les glissements proprement dits, qui se caractérisent par l'apparition de surfaces de cisaillement bien définies à l'intérieur du milieu. Dans ce cas, le milieu a un comportement élasto-plastique.
- Les fluages et les coulées boueuses qui se caractérisent respectivement par une déformation de type visco-plastique ou un écoulement de type fluide.

Suivant la nature des matériaux qui constituent le terrain, nous distinguons dans la pratique trois types de mouvement :

- Les mouvements affectant des sols ;
- Les mouvements affectant des masses rocheuses dissociées et remaniées (qui se comportent de fait comme des sols) ;
- Les mouvements et écartements affectant les roches massives diaclasées.

Pour des classifications plus récentes, on peut citer à titre d'exemple, CRUDEN et VARNES (1996) qui se sont basés d'une part sur la nature des matériaux en cause (rocher, sol ou débris) et d'autre part sur le type de mécanisme de déformation et de rupture (chutes de matériaux, basculements, glissements plans ou rotationnels, etc.).

P. ANTOINE (1992) propose une classification basée sur les mécanismes. On trouve par exemple dans la première catégorie le fauchage et le fluage. Dans la seconde catégorie les chutes en masse et écroulements, les glissements proprement dits, les écoulements, les mouvements généralisés ou complexes.

K. SASSA (1985) a proposé une classification plus géotechnique en fonction de deux critères ; l'un est relatif au matériau, l'autre est relatif au type de mouvement.

Toutefois, il faut noter que ces classifications ne doivent pas faire oublier les associations possibles de mouvements de différentes familles, soit se succédant dans le temps (fauchage aboutissant à un éboulement, par exemple), soit se juxtaposant dans l'espace (glissement d'un versant marneux et éboulement de la corniche rocheuse à l'amont, par exemple).

### **3.3. Principales familles de mouvements de pente**

#### **3.3.1. Reptation**

C'est un déplacement par gravité, continu de l'ensemble du matériau, de vitesse lente (de quelques mm à quelques dm par an), ils peuvent cependant s'accélérer en phase paroxysmale pour aller même jusqu'à la rupture et le mouvement s'évoluera en un glissement de terrain.


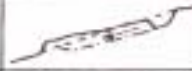



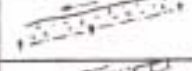



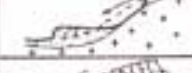
SURFACE DE RUPTURE DEFINIE OU NON	RELATION de la Surface de Rupture avec la GEOLOGIE	REMANIEMENT INTERNE	FORME de la SURFACE de RUPTURE	TERRAINS CONCERNES	EXTENSION des MASSES en MOUVEMENT	ZONE de DEPART	CLASSE	T Y P E	SCHEMA
SURFACE DE RUPTURE DEFINIE	SURFACE de RUPTURE INDEPENDANTE de la STRUCTURE GEOLOGIQUE des TERRAINS ou dans un TERRAIN HOMOGENE	FAIBLE	CIRCULAIRE	TOUS	FAIBLE	EXISTANTE	GLISSEMENTS DE TERRAIN AU SENS STRICT	GLISSEMENT CIRCULAIRE	
			FLANE	SAUF ROCHES DURES	*			GLISSEMENT FLAN	
			MIXTE		MOYENNE			GLISSEMENT MIXTE	
		FORT	quelconque	SOLS MEUBLES	FAIBLE * MOYENNE	EXISTANTE	COULEES	COULEE DE TERRE	
				ROCHES DURES	FORTE * tres forte			MOYENNE * TRES FORTE	EXISTANTE
		*	*	SOLS MEUBLES	FAIBLE	INEXISTANTE		SOLIFLUXION	
	DANS UNE COUCHE et EN RELATION avec sa GEOMETRIE	FAIBLE	selon la structure geologique	TOUS SAUF TRES DURS	FAIBLE * MOYENNE	EXISTANTE	GLISSEMENTS DANS UNE COUCHE	GLISSEMENT DE BLOC	
		FORT			MOYENNE * FORTE			GLISSEMENT DE BLOC ET ECROULEMENT	
	au CONTACT de DEUX COUCHES ou de DEUX TERRAINS	FAIBLE	selon la limite entre les terrains	tous	FAIBLE * FORTE	EXISTANTE	GLISSEMENTS COUCHE SUR COUCHE	GLISSEMENT SELON LA STRATIFICATION	
		FORT		alteration: sol sur roche				GLISSEMENT SUPERFICIEL * D'ALTERATION	
NON DEFINIE	*	VARIABLE	pas	ROCHES	FAIBLE	*	FAUCHAGE		

Figure 1.2 Classification des mouvements de terrain, J.P. MOUGIN (1973)

En général, la reptation intéresse les couches superficielles (quelques décimètres ou mètres de profondeur) et argileuses (formations d'altération).

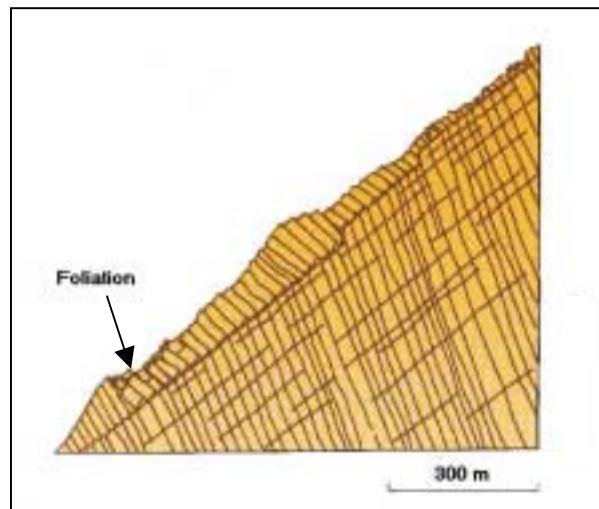
La caractéristique essentielle de la reptation est l'absence d'une limite nette entre zone mobile et zone stable.

### 3.3.2. Fauchage

C'est un mouvement lent des *têtes de couches* qui s'incurvent peu à peu vers le bas sous l'effet de la gravité. (figure 1.3)

Ce type de déformation affecte des formations géologiques sur laquelle la schistosité, la foliation ou le litage sont proches de la verticale.

Le mécanisme de fauchage peut évoluer et se transformer en un mécanisme de glissement rocheux.



**Figure 1.3** Exemple de fauchage dans des roches métamorphiques (fauchage affectant un versant à une échelle hectométrique, d'après FREITAS et WATERS, 1973)

### 3.3.3. Solifluxion

Ce phénomène s'accroît sous l'effet du gel-dégel, particulièrement au moment du dégel quand le matériau de surface est saturé et qu'un sol gelé subsiste en profondeur.

En général, les solifluxions touchent superficiellement (profondeur inférieure à 2m) les sols meubles et spécialement les versants marneux. Elles sont caractérisées par une zone de départ inexistante et une faible extension des masses en mouvement.

### 3.3.4. Glissement de terrain

Il est défini comme le déplacement d'une masse de terrain bien délimitée, meubles ou rocheux au long d'une surface de rupture par cisaillement qui correspond souvent à une discontinuité préexistante.

Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydrauliques ou sismiques) ou d'une modification des conditions limites.

Les matériaux déplacés peuvent évoluer de façon très variée suivant leur nature et les volumes en cause. S'il s'agit de roches, celles-ci se fragmentent généralement et le glissement initial se transforme en un éboulement. S'il s'agit de sols saturés, le remaniement et la destruction partielle de la texture peuvent donner un matériau de consistance plastique ou fluide à l'origine de coulées boueuses.

En fonction de la géométrie de la surface de rupture (figure 1.4), on distingue :

- *Les glissements plans* : Mouvement au long d'une surface de rupture sensiblement plane pouvant être un joint stratigraphique, un plan de faille, une surface de schistosité ou de foliation, une interface entre formation de pente.

- *Les glissements circulaires ou rotationnels* : Surface de glissement plus ou moins circulaire ; mouvement caractérisé en général par l'existence d'une zone de départ nette et par un bourrelet frontal plus ou moins marqué. Ils se produisent en particulier en terrains assez homogènes, à dominante argileuse ou marneuse.
- *Les glissements quelconques, composite ou complexes* : Le mouvement est très semblable au précédent dans son allure externe, mais la (ou les) surface (s) de rupture est (sont) de forme générale convexe et passe (nt) au travers de différents niveaux de faiblesse du massif.

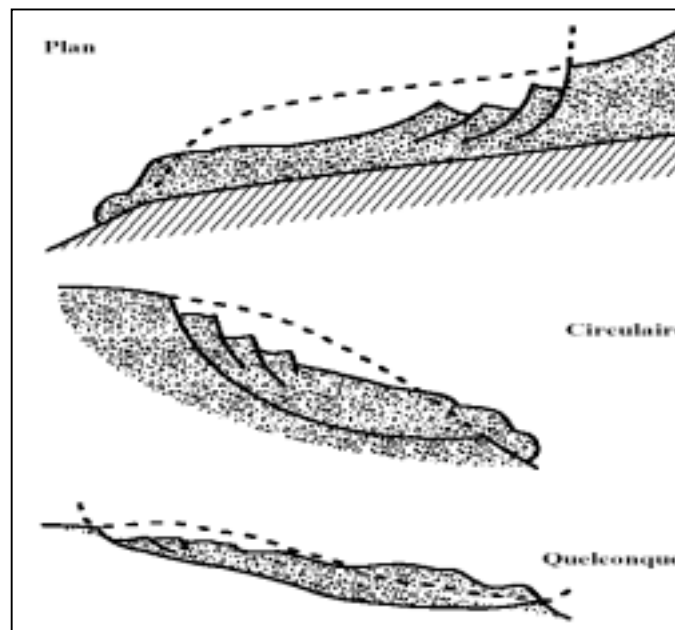


Figure 1.4 Différents types de glissements

La vitesse de déplacement de la masse glissée est généralement lente, avec des accélérations liées le plus souvent aux mauvaises conditions météorologiques (en phase de glissement proprement dite, les vitesses peuvent aller de quelques dizaines à quelques centaines de mètres par jour). (figure 1.5)

L'extension dépend de la vitesse d'évolution du mouvement. Elle est généralement faible pour les ruptures circulaires et quelconques, et peut être beaucoup plus forte pour des glissements plans, selon le contexte morphologique.

### 3.3.5. Coulées boueuses et laves torrentielles

Les coulées apparaissent dans des matériaux meubles (sols argileux ou marneux) lorsque leur teneur en eau augmente de manière importante (la masse en mouvement a franchi sa limite de liquidité). Ces coulées peuvent se produire à la suite d'une solifluxion ou d'un glissement de terrain.

Elles consistent en la propagation de matériaux sans cohésion ou ayant perdu brutalement leur cohésion dès la mise en mouvement.

Lors d'un phénomène de coulée boueuse :

- Le degré de remaniement de la masse en mouvement est total.
- La vitesse et la distance parcourue par une coulée boueuse sont très variables, dépendant de nombreux facteurs comme la nature des matériaux, la quantité d'eau, la viscosité du mélange eau/matériau, la topographie, la saturation en eau des sols sur lesquels se déplace la coulée.

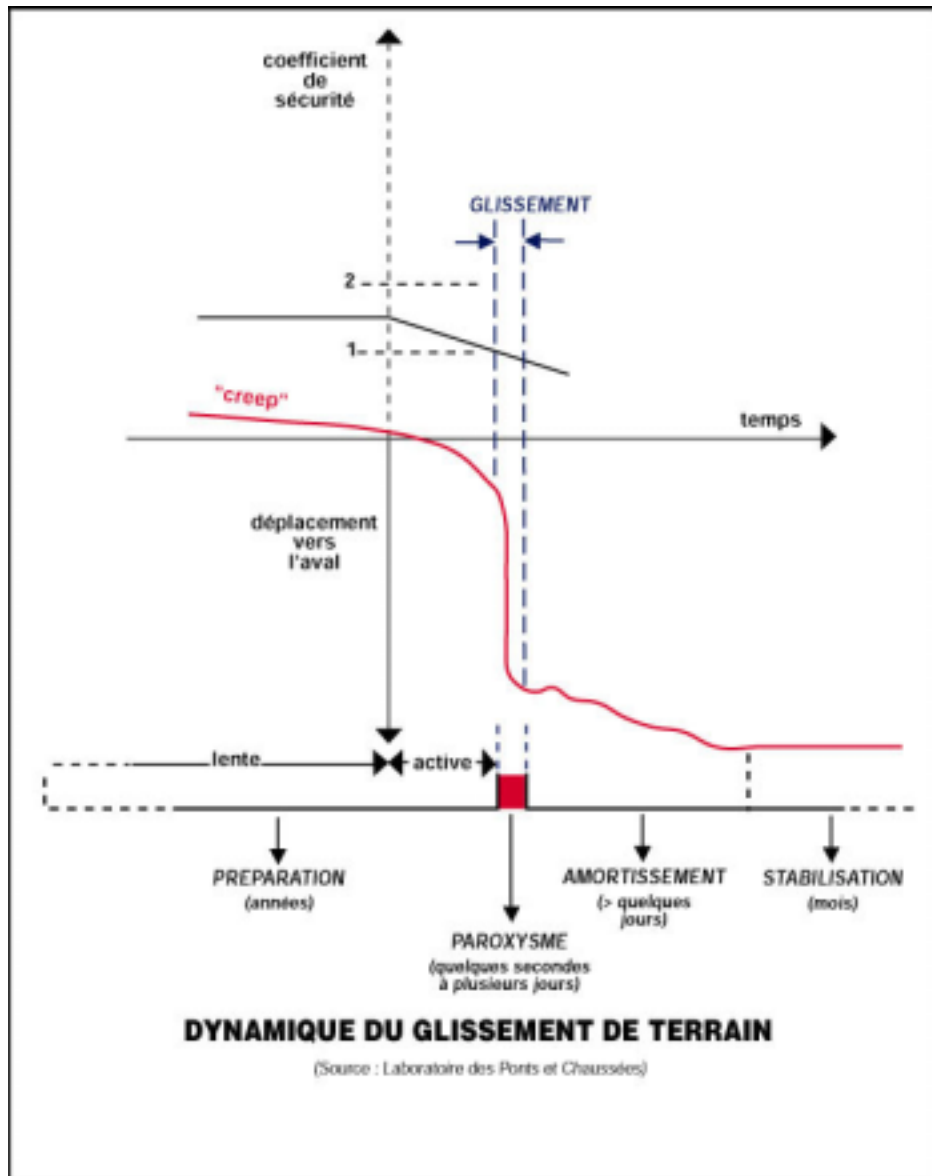


Figure 1.5 Dynamique du glissement de terrain (LCPC, 2003)

Elles montrent presque toujours :

- Une zone supérieure élargie (rassemblement de matériaux par exemple au pied d'un glissement, zone de départ de la coulée).
- Un chenal d'écoulement beaucoup plus étroit et de longueur extrêmement variable (zone de transfert).
- Un lobe terminal (zone d'accumulation) élargie en une sorte de cône de déjection, mais de profil convexe.

Les laves torrentielles se déclenchent dans un contexte de bassin torrentiel aux pentes instables, le matériau déjà saturé est destabilisé suite à un apport d'eau soudain, d'origine météorique (violent orage) ou profonde (débouillage de Karst, rupture de poches d'eau souterraines). Elles progressent très rapidement (plusieurs mètres par seconde) dans le chenal d'écoulement du torrent, érodant les berges du torrent, emportant tout sur leur passage, et parcourant des distances pouvant dépasser le kilomètre.

### 3.3.6. Chutes de blocs et éboulements

Ce sont des phénomènes rapides ou événementiels, résultant de l'évolution de falaise, et mobilisant des blocs de roche plus ou moins homogènes depuis un sommet ou une pente. (figure1.6)

Ils consistent en la chute libre ou au roulement au départ, après rupture, de blocs par fragmentation. Le mouvement pouvant ensuite se poursuivre par une série de rebonds de hauteur décroissante (dans le cas d'une pente régulière).

La chute de blocs ne concerne qu'un nombre réduit d'éléments. Pour les éboulements, la masse instable est beaucoup plus volumineuse.

Les blocs déstabilisés ont une trajectoire plus ou moins autonome. L'extension du phénomène est donc variable, car la distance parcourue par les blocs rocheux sera en fonction de la taille des blocs, de la raideur de la pente et de l'amortissement des chocs, etc.

Ce phénomène se caractérise par une forte désorganisation ou dislocation des matériaux mis en mouvement. Le volume de matériaux mis en jeu est extrêmement variable, de quelques dizaines à quelques milliers de m<sup>3</sup>.

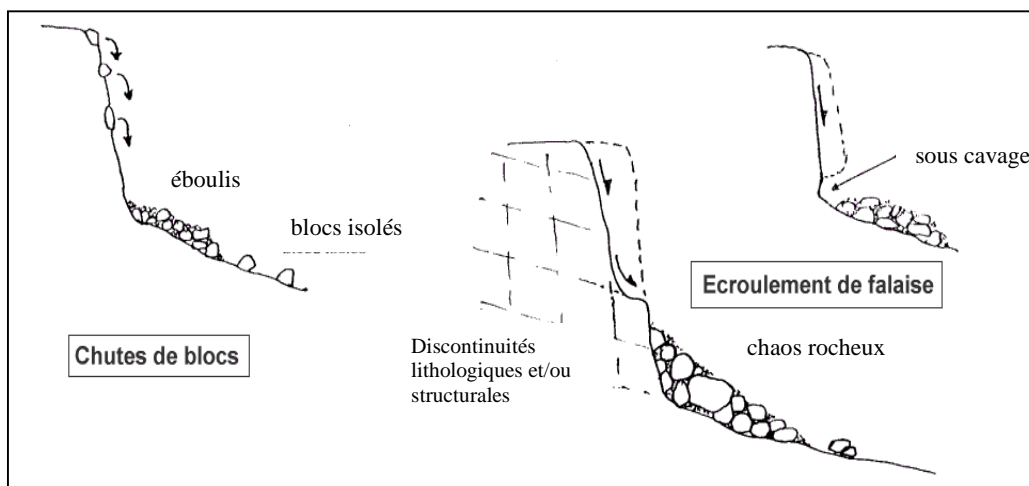


Figure 1.6 Schéma de principe de chutes de blocs et éboulements

## 4. FACTEURS D'INSTABILITE

Les mouvements de pente sont des manifestations naturelles de l'évolution du relief, en action, à la surface terrestre depuis des millions d'années. Les observations et les études effectuées à partir d'événements passés ont permis de mettre en évidence certaines conditions de site favorables à l'apparition de tel ou tel phénomène d'instabilité.

### 4.1. Facteurs permanents

Ce sont des facteurs de prédisposition d'un site aux instabilités (relief, nature géologique des terrains, etc.).

#### 4.1.1. La pesanteur

Elle constitue le moteur essentiel des mouvements de terrain, qualifiés souvent de gravitaires.

#### 4.1.2. L'eau

Elle est un facteur très déterminant pour la genèse d'un glissement de terrain. Elle agit par ameublissement et dégradation mécanique des terrains. Elle joue en même temps un facteur permanent et un facteur variable dans le temps (précipitation).

#### 4.1.2.1. Action mécanique

Les pressions interstitielles élevées dans les sols constituent un élément défavorable à la stabilité d'une pente. Ces zones humides sont caractérisées par une nappe affleurant en quasi-permanence et par une végétation hygrophile particulière. Elles indiquent dans la plus part des cas une forte probabilité d'avoir une instabilité dans une pente.

L'érosion des berges de cours d'eau ou des côtes marines est aussi la cause des instabilités de masse. L'action des vagues qui s'exerce au pied des falaises côtières contribue au recul des côtes par éboulements successifs.

#### 4.1.2.2. Action chimique

On peut citer en particulier l'hydrolyse, qui est un processus lent et qui conduit à la transformation climatique de certains minéraux silicatés, comme par exemple les feldspaths, dont l'altération entraîne la formation d'argiles.

L'hydratation de certains minéraux (anhydrite, par exemple) accompagnée de gonflement, peut contribuer à désorganiser un massif.

### 4.1.3. La nature et les caractéristiques mécaniques des terrains

Les caractéristiques mécaniques des terrains représentent les données de base imposées par la nature et l'histoire du terrain.

Les schistes argileux, les argiles, les marnes, les micaschistes s'altèrent facilement en surface et donnent lieu à des glissements ou à des coulées boueuses.

Les formations superficielles récentes, généralement non consolidées, tapissant les versants à forte pente, sont vulnérables et instables.

Les formations anisotropes (formations stratifiées) présentent souvent des alternances de niveaux durs et tendres (marno-calcaires, comme exemple) qui ont un comportement mécanique et hydraulique particulier, souvent défavorable à la stabilité.

Les terrains affectés par de grands glissements anciens, dits fossiles, sont cependant fragilisés et donc sensibles à une perturbation d'origine naturelle ou humaine.

La variation importante lithologique, dans une même formation géologique peut être à l'origine d'une répartition des mouvements de terrain.

#### 4.1.4. La structure des terrains

La tectonique, simple ou cassante, conditionne notablement la susceptibilité des terrains aux instabilités.

Les discontinuités qui affectent les roches cohérentes jouent un rôle déterminant dans la stabilité des massifs rocheux. Elles constituent des surfaces de faiblesse sur lesquelles se désigne la rupture et qui peuvent être à l'origine d'une étude de prédiction du mécanisme et du type de glissement (glissements plans, des glissements de dièdres, etc.) en se basant sur leurs orientations.

Les joints sédimentaires, plan de schistosité ou de foliation sont eux aussi des surfaces de faiblesse qu'il faut prendre en compte. Ils jouent le même rôle (favorisant l'instabilité des massifs) que les discontinuités.

#### 4.1.5. La morphologie

La pente des talus représente un paramètre qui conditionne sa stabilité. Il existe une pente limite au-delà de laquelle on observe un optimum favorable aux glissements.

On ne peut pas utiliser la valeur de la pente comme déterminante, elle s'associe avec d'autres facteurs tels que la nature lithologique, la hauteur des versants et la présence ou non de l'eau.

#### 4.1.6. Le couvert végétal

Le rôle stabilisateur du couvert végétal et des arbres tient à plusieurs facteurs :

- L'ancrage par les racines : Le terrain du versant se trouve emprisonné dans un radicaire dense et donc il est stable.

- Le drainage par l'évapotranspiration : Les arbres prélèvent dans le terrain une quantité d'eau considérable par l'évapotranspiration.
- La rétention des eaux de pluie : La couverture végétale permet la rétention des eaux pluviales qu'elles ne viennent pas imbiber la masse de terrain.
- La protection contre l'érosion : La couverture végétale représente un tapis protecteur qui réduit fortement l'action du ruissellement superficiel.

A l'inverse, l'action de la végétation peut être déstabilisante en :

- Chargeant le versant ;
- Favorisant l'infiltration ;
- Interceptant l'énergie éolienne et induction des forces de traction dans le sol ;
- Créant une structure étagée : roche mère, roche altérée et sol compacté par la structure des racines ;
- L'élargissement des fissures dans un massif fissuré et leur progression en profondeur par le développement des racines et par suite augmentation des forces motrices à l'écoulement.

Sur le terrain, la végétation peut être indicatrice des glissements, il est possible de localiser et de délimiter les différentes parties d'un glissement à partir de la tenue des arbres ; arbres en pipe, arbres inclinés, paquets d'arbres isolés. (figure 1.7)

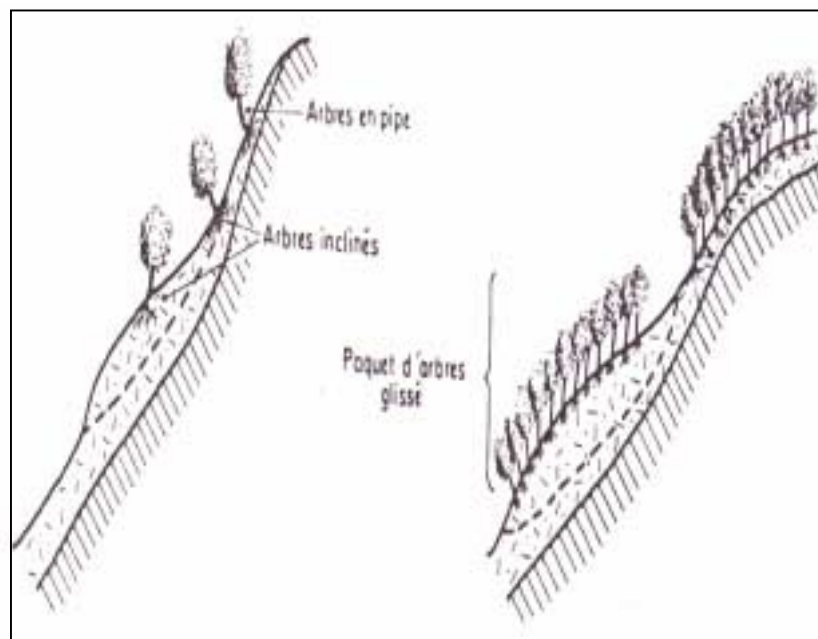


Figure 1.7 Relation entre mouvement de pente et végétation (A. FARES, 1994)

## 4.2. Facteurs variables dans le temps

Ce sont eux qui déclenchent l'instabilité ou qui provoquent une accélération marquée du mouvement conduisant à la rupture.

### 4.2.1. Les précipitations

Les glissements de terrain apparaissent souvent au moment hydrologique le plus défavorable, c'est-à-dire lors de périodes pluvieuses prolongées, lors de fonte de neige ou après une longue période humide, selon des mécanismes tels que :

- L'augmentation de la pression interstitielle dans les sols saturés, due à un épisode pluvieux exceptionnel ou à une fonte de neiges, qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement du sol.



- La saturation des sols par descente d'un front d'infiltration influe aussi et fait augmenter le poids moteur.
- Une réduction de la consistance d'une argile causée par l'augmentation de la teneur en eau, lorsque celle-ci se rapproche de la limite de liquidité  $w_l$ , le milieu passe de l'état plastique à l'état liquide et la résistance au cisaillement diminue.
- L'érosion provoquant des changements de géométrie du versant, et par suite une modification de la pente qui implique une diminution du coefficient de sécurité.
- Des écoulements souterrains qui ont des actions défavorables sur la stabilité des pentes tel que la pression de courant et érosion souterraine.

#### 4.2.2. La température

Les variations de températures sont un facteur déclenchant de chutes de pierres ou de blocs, en raison des dilatations différentielles qui se manifestent.

#### 4.2.3. Le Gel et dégel

Dans les principaux sols limoneux, la congélation et la décongélation peuvent donner des pressions interstitielles excessives et par suite, elles influent sur les mouvements de surface (solifluxion).

Le gel s'accompagne d'une augmentation de volume de 9% environ, et tend à écraser les particules des sols en créant et élargissant des fissures. Ce phénomène est à l'origine de certaines chutes de blocs ou de glissement de terrain.

Le dégel s'accompagne de libération de grandes quantités d'eau et donne lieu à des glissements-coulées ou à des chutes de blocs et éboulements.

#### 4.2.4. Le séisme et le volcanisme

Les vibrations provoquées par les séismes sont responsables du déclenchement de mouvements de pente très variés tels que glissements, chutes de blocs ou écroulements, soit par action mécanique directe, soit par la modification des pressions interstitielles.

Des phénomènes plus spécifiques se produisent également, comme des glissements à morphologie particulière, survenant dans des sites sujets à la liquéfaction de couches sableuses ou soumis à une forte amplification des vibrations.

L'explosion d'un volcan est souvent accompagnée d'une activité sismique qui favorise l'instabilité des versants.

L'action de surpression de gaz et de vapeur d'eau peut, en outre, favoriser le déclenchement de mouvement de pentes sur les flancs du volcan.

#### 4.2.5. L'action de l'homme

L'homme constitue fréquemment une cause d'accélération ou déclenchement des instabilités, notamment :

- Les modifications de l'équilibre naturel des pentes ; talutage en pied de versant, remblaiement en tête de versant ;
- Les modifications des conditions hydrologiques du milieu naturel; rejets d'eau dans une pente (fluide de canalisation, par exemple), pompage excessif d'eau qui favorisent la dissolution des roches solubles, etc.
- Les ébranlements provoqués par les tirs à l'explosif, qui sont susceptibles de déclenchement des chutes de pierres et de blocs ou vibrations dues au trafic routier ou ferroviaire qui peuvent déstabiliser à la longue des versants.

### 5. AUTRE CLASSIFICATION DES CAUSES D'INSTABILITE

Les facteurs de déclenchement et d'évolution de mouvements de pente, appelés auparavant facteurs variables dans le temps, sont nombreux et variés. Certains auteurs les ont regroupé en trois familles principales :

- Modification du moment moteur ;
- Modification des conditions hydrauliques ;
- Modification des caractéristiques géotechniques et rhéologiques des terrains.

Alors, différentes études statistiques ont fait apparaître que les causes les plus fréquentes sont d'origine hydraulique. (tableau 1.3)

**Tableau 1.3** Etude statistique sur les causes des glissements de terrain (d'après M.A. ALLAL et K.A. BENACHENHOU, 1995)

	ALLAL (1993)	E.GERVEAU (1991)	DESVARREUX (1988)	J.L. DUVILLE & J. LACUBE (1989)
Modification moment moteur	34%	31%	---	---
Modification condition hydraulique	53%	49%	52%	61%
Modification caractéristique géotechnique et rhéologique	13%	20%	---	---
Nombre de mouvements étudiés	32	50	250	?

D'une façon générale, il y a une seule cause globale de tous les mouvements de pente, c'est une modification de l'équilibre du massif considérée. Cette cause a été décomposée en plusieurs causes de différentes origines dont la première approche qualitative a été donnée en 1950 par TERZAGUI.

Pour plus de clarté et de simplicité, on propose de voir la classification des causes de mouvements de pente réalisée par M.A. ALLAL et K.A. BENACHENHOU (1995). Elle est faite suivant les trois familles de facteurs suivantes :

- Facteurs hydrauliques ;
- Facteurs mécaniques ;
- Facteurs dynamiques.

## 5.1. Les facteurs hydrauliques

### 5.1.1. Précipitations ou fonte des neiges

ZARUBA et MENCL (1969) ont trouvé une corrélation entre une forte pluie annuelle et la fréquence des glissements pour plusieurs zones en Tchécoslovaquie.

FUKUOKA (1953) a reporté qu'une relation définitive semble exister entre une forte pluie et la vitesse de glissement du sol pour de nombreux glissements au Japon.

Les glissements ravageurs dans Rio De Janeiro en Brésil durant 1966 et 1967 se sont produits pendant ou après de très forts orages (BARATA 1969).

Des pluies torrentielles dans la région de Saguenay au Canada pendant l'année de 1996 ont déclenché plusieurs mouvements de terrain (Service de la Géotechnique et de la Géologie, Québec).

Alors toute augmentation de la pression interstitielle tout le long de la surface de glissement, diminue la contrainte normale effective et par suite la résistance par frottement (de cisaillement).

Les précipitations et fonte des neiges font naître trois processus :

- Humidification du sol et infiltration ;
- Ruissellement de surface ;
- Evapotranspiration.

#### 5.1.1.1. humidification du sol et infiltration

L'eau qui tombe à la surface du sol commence par humidifier la fraction supérieure du sol. Si la pluie se poursuit suffisamment et longtemps, l'humidification sera de plus en plus importante et entraîne une infiltration, c'est à dire une arrivée d'eau à la nappe

(réalimentation des nappes). Ces phénomènes peuvent jouer un rôle mécanique dans l'équilibre de la pente, et ceci à différents niveaux :

- *Augmentation du degré de saturation* : Ceci va avoir deux conséquences mécaniques :
  - \* Le poids volumique de sol situé au-dessus de la nappe augmente ;
  - \* Les forces de capillarité, qui se développent à l'interface entre la phase air et la phase eau, vont diminuer avec la raréfaction de la phase air. Il va alors y avoir diminution de la succion qui joue un rôle cohésif sur le sol.
- *Forces de volume dues à l'eau* : C'est un paramètre important, il est nécessaire de pouvoir les diminuer (les forces) par des réseaux de drainage performants pour améliorer la stabilité.
- *Élévation brutale du niveau de la nappe ou du niveau d'eau dans un réseau fissuré* : Lorsque le front d'infiltration atteint le niveau de la nappe, celle-ci va supporter une surpression qui peut être importante (quelques Kpa) et qui peut apparaître brutalement. En même temps que la hauteur de la nappe augmente, le coefficient de sécurité de la pente chute.

Dans un massif rocheux fissuré il peut arriver qu'une venue d'eau apparaisse brutalement, entraînant une augmentation des pressions d'eau et par conséquent une baisse du coefficient de sécurité.

- *Écoulements souterrains* : Ils ont des actions défavorables sur la stabilité des pentes, et qui sont :
  - \* La pression de courant : Elle correspond aux frottements visqueux liés à l'écoulement qui sont transmis aux grains solides (force d'entraînements). L'écoulement freiné par le milieu poreux transmet à ce dernier des efforts mécaniques (principe de l'action et de la réaction). L'eau exerce donc une poussée sur le matériau qu'elle traverse et met en question la stabilité de la pente.
  - \* Colmatage des terrains : Il résulte du dépôt des particules qui se trouvaient en suspension dans le liquide filtrant (l'eau), dans les interstices du milieu. Ce phénomène peut changer les conditions aux limites hydrauliques, et notamment la pression interstitielle, en diminuant la perméabilité des terrains à l'aval des versants. Il est fréquent à l'origine des ruptures survenant en pied des pentes.
  - \* Erosion souterraine : C'est le transport des particules du matériau dans les terrains, traduit par une augmentation des débits qui vont causer le phénomène du *renard* (érosion régressive), ce dernier diminue la résistance mécanique des terrains.
- *Un ramollissement des sols d'origine chimique* : Lorsque l'eau infiltrée est agressive ou usée, elle peut par une action électrolytique (échange d'ions) modifier la structure de certaines argiles par floculation ou défloculation du milieu colloïdal, ce dernier phénomène correspond à un ramollissement.

#### 5.1.1.2. Ruissellements de surface

Lorsque l'intensité de la pluie est forte, la pellicule d'eau en surface peut circuler sur la tranche supérieure du sol saturé (sur une faible épaisseur). Ils induisent, essentiellement, des phénomènes d'érosion externe (superficielle) qui ont pour effet de modifier la géométrie des versants et donc leurs conditions de stabilité (sapement des berges fluviales ou des falaises côtières, ravinement des versants).

#### 5.1.1.3. Evapotranspiration

Ce terme regroupe généralement évaporation et transpiration. Pendant et après un épisode pluvieux, une partie non négligeable de l'eau arrivée au sol est immédiatement évaporée. Le phénomène de la transpiration joue dans le même sens que l'évaporation, les racines des plantes sont capables de reprendre de l'eau du sol. Cela provoque le phénomène de retrait, donc la formation des fissures.

### 5.1.2. Gel et dégel

Ces deux phénomènes sont cités auparavant (paragraphe 1.3.4.2). On peut ajouter que l'observation d'un certain nombre de sites d'écoulements en Norvège (1951-1955) a permis, pour la première fois, de dégager l'influence du gel et du dégel. La majorité de ces écoulements ont eu lieu au printemps et en automne, quand la température varie autour du point de congélation (BJERRUM et JOSTARD, 1968).

### 5.1.3. Phénomène du retrait-gonflement

Pour bien comprendre l'impact du phénomène sur le glissement de terrain, citons l'expérience réalisée par U. NASCIMENTO (1953) : Un échantillon d'argile est successivement desséché puis humidifié plusieurs fois de suite. Posé sur une surface horizontale, il conserve sa position. Mais sur une surface inclinée, il progresse doucement vers le bas, donc le retrait/gonflement de l'argile favorisent l'action de la pesanteur (reptation des talus).

Sous un climat semi-aride, les massifs argileux prennent leur maximum de retrait et se fissurent très profondément (diminution de la résistance mécanique). Après, lorsque les pluies surviennent, toutes les fissures se remplissent d'eau en causant le gonflement de l'argile, où la résistance au cisaillement diminue d'avantage et une coulée boueuse peut s'amorcer.

### 5.1.4. Vidange rapide

L'expérience a montré qu'un versant baigné par un plan d'eau est fréquemment touché par des mouvements de pente lors de l'abaissement brutal de ce plan d'eau.

On peut citer comme exemples, le glissement se produisant lors du drainage du lac Steep Rock en Canada (LEGG et BARTLEY, 1953) et le mouvement de pente pendant la vidange du réservoir Look Out Point en Oregon, Canada (POPE et ANDERSON, 1960).

Cette instabilité provient de la pression de courant des eaux interstitielles du massif qui, en s'écoulant, charge le haut du massif.

Ce type de mouvement provient particulièrement dans les digues, les barrages en terre, et le pied des versants des lacs artificiels.

### 5.1.5. Infiltration par sources d'eau artificielles (réservoir ou canal)

Le remplissage du réservoir peut déclencher aussi de grands mouvements de masse, comme c'était le cas à Vajont en Italie (MULLER, KIERSCH, 1964), le cas du réservoir à Gepatsch en Autriche (BRETH, LAUFFER et d'autre, 1967), et le cas du remplissage du lac FRANKLIN ROOSEVELT à Washington au Etats Unis (JONES, EMBODY et PETERSON, 1961) où plus de 500 glissements se sont produits.

La fuite des réservoirs et des barrages peut causer une rupture par une érosion interne régressive ou par une canalisation. Comme se développe, l'écoulement de l'eau augmente et le toit de la conduite ainsi créée peut s'affaisser et causer un glissement.

### 5.1.6. Déboisement - déforestation

Le déboisement d'un versant est une action favorable pour les mouvements de pente, parce qu'il désorganise le terrain en profondeur et favorise la pénétration des eaux dans la masse.

## 5.2. Facteurs dynamiques

### 5.2.1. Tremblement de terre et vibrations

Ce qu'on peut ajouter à ce qu'il a été vu au paragraphe (1.3.4.2), c'est que les vibrations d'autres origines (machines vibrantes, engins de terrassement, battage de pieux, etc.) ont les mêmes conséquences qu'un séisme.

On peut évoquer le glissement de la province de Kansu en Chine de 1920, déclenché par un séisme (CLOSE et MC CORMICK, 1922). Le glissement de Surte en Suède de 1950 qui

s'est produit sur une argile sensible molle, il a été provoqué par les vibrations du battage des pieux (JACKOBSON, 1952). Le glissement se produisant à Turtle Mountain à Alberta au Canada, il a été attribué par TERZAGHI (1950) à des opérations de mine dans la région.

### **5.2.2. Mouvements tectoniques**

Les mouvements tectoniques dans la croûte terrestre peuvent causer une augmentation de l'angle de la pente et depuis contribuer aux mouvements de pente.

### **5.3. Facteurs mécaniques**

#### **5.3.1. Terrassements**

Cette action mécanique a des répercussions défavorables sur la stabilité des talus lorsqu'elle n'est pas bien faite.

On sait que la pente des versants représente un paramètre qui conditionne sa stabilité et qu'il existe une pente limite, au-delà de laquelle la rupture apparaisse. Parfois les travaux de terrassement changent la pente naturelle en dépassant cet angle limite (modification de la géométrie). La conséquence directe est que ce talus subit un déplacement.

Les terrassements, en supprimant la butée de pied d'un versant, réduisent les moments stabilisateurs et ainsi le coefficient de sécurité qui engendre une instabilité.

#### **5.3.2. Surcharges sur un versant**

Cette surcharge peut être un remblai, un immeuble, un mur de soutènement, une décharge, etc. qui se trouve en tête ou à mi-pente d'un versant.

L'augmentation de la charge et du moment moteur crée une diminution du coefficient de sécurité qui est favorable à l'apparition d'une rupture rationnelle.

## **6. CONCLUSION**

Beaucoup de difficultés surviennent quand il s'agit de classer les mouvements de pente. Certains s'interrogent même sur la légitimité d'une telle entreprise, à cause de la diversité des facteurs d'instabilité et des paramètres à prendre en compte, malgré qu'elle réduise la complexité de ces événements. Ceci est bien représenté par le fait qu'il y a d'autres phénomènes, comme le ravinement (qui est considéré comme une instabilité dans notre cas d'étude) ou l'érosion, qui ne sont pas décrits ci-dessus à cause de la divergence du point de vue des auteurs de ces classifications.

Aussi, dans une perspective de gestion du risque, faire la différence entre les familles de mouvements de pente est primordiale. Ainsi, il faut noter l'importance de la cinématique du développement de la rupture et du déplacement des masses rompues, où l'eau joue très souvent un rôle majeur.

## CHAPITRE 2

# CARACTERISATION DE L'ALEA DES MOUVEMENTS DE PENTE

---

### 1. INTRODUCTION

Jadis, sous la pression des événements dramatiques vécus dans le monde, que sont les mouvements de pente, s'est développée une notion complexe appelée *aléa* qui nous permet de quantifier le risque d'apparition de ces derniers, afin de s'en protéger en les prévoyant.

L'objectif de ce chapitre est d'en savoir plus sur l'aléa des mouvements de pente et de sa caractérisation, ainsi que quelques différentes méthodes d'évaluation de ce concept.

### 2. DEFINITIONS

Le mot « *aléa* » vient du latin « *alea* » qui signifie « *coup de dés* », et qui a comme synonyme le mot « *hasard* » (J.C. PAULY et M. PAYANY, 2002).

Dans ce qui suit, on le définit comme la probabilité d'apparition d'un phénomène naturel donné dans une zone donnée, dans une période de référence donnée.

De cette définition on peut tirer les éléments suivants : (P. ANTOINE et al., 2000).

- **Notion de phénomène naturel** : Il s'oppose au phénomène anthropique provoqué par une action de l'homme. Toutefois, on peut constater dans certains cas des interactions entre les deux. On retiendra que les phénomènes délocalisés ont une probabilité de survenir en n'importe quel point du territoire, et que les phénomènes localisés ont une probabilité de survenir qui est fonction du territoire considéré.

Dans notre cas, il est défini assez précisément comme mouvement de pentes qui regroupe des événements très variés, par leur nature (instabilités de versants : glissements, écroulements, coulées, etc.) et par leur dimension (phénomènes significatifs à partir de quelques m<sup>3</sup>, et pouvant atteindre quelques centaines de millions de m<sup>3</sup>, voir plus).

- **Une composante spatiale** : Un aléa donné s'exerce sur une zone donnée, qu'il faut délimiter. La répartition spatiale des mouvements de pentes est guidée en général par la topographie et par la géologie (lithologie, nature et fracturation des formations affleurantes, hydrogéologie), c'est à dire par l'environnement physique. Pour certains phénomènes à propagation importante (éboulements et chutes de blocs, coulées boueuses), on distingue une zone de départ et une zone d'épandage ; l'extension de cette dernière est toujours délicate à évaluer et l'on peut, dans certains cas, avoir recours à des outils numériques (exemple : trajectographie des blocs).
- **Une composante temporelle** : C'est la possibilité d'effectuer une prédiction de la date de déclenchement d'un mouvement de pente (occurrence temporelle du phénomène). Il faut adopter dans ce cas, une attitude probabiliste à cause de la difficulté à cerner la période d'occurrence.

En effet, on est amené à distinguer plusieurs modalités d'occurrence temporelle, et donc plusieurs manières d'approcher l'aléa :

- **Cas des phénomènes à occurrence unique** : Ils sont bien définis dans le temps (exemple de la chute d'un bloc isolé ou d'un éboulement bien identifié). L'aléa peut théoriquement être caractérisé par une probabilité d'apparition, même si cela s'avère bien difficile dans la pratique.
- **Cas des phénomènes répétitifs** : Comme exemple, les chutes de pierres en provenance d'une paroi rocheuse, ou certaines coulées boueuses. L'aléa peut alors être quantifié par la période de retour du phénomène.
- **Cas des phénomènes déclarés en mouvement lent et quasi-permanent** : Comme les fluages, certains glissements ou glissements-coulées. Leur identification est évidemment essentielle pour les aménageurs. Bien souvent une autre question se pose, celle de l'éventualité d'une accélération du phénomène actuellement en régime régulier et tranquille ; on est ramené alors au premier cas.  
Toutefois, l'aléa peut être subdivisé en deux parties :
  - Probabilité d'avoir une rupture ;
  - Probabilité de l'évolution du glissement après la rupture.

### 3. LA DIFFICULTE D'ESTIMER LA PROBABILITE D'OCCURRENCE

En règle générale, et contrairement au domaine des risques sismiques, il est très difficile de quantifier la probabilité d'occurrence d'un mouvement de pente. Cela revient principalement à la non-récurrence des phénomènes, à l'évolution de ce dernier, à la complexité du milieu naturel géologique et à la diversité des facteurs déclencheurs de ce type de phénomène.

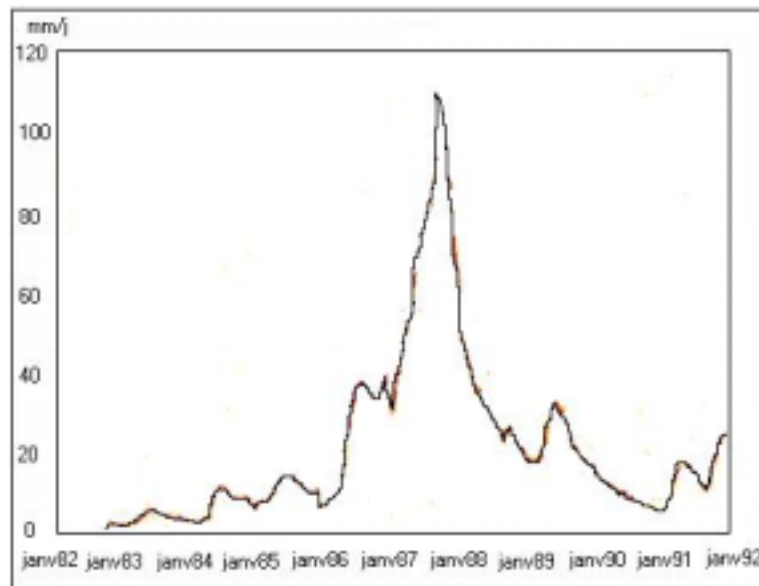
Alors la seule voie actuellement opérationnelle consiste en une approche plus qualitative (prédisposition du site à un type de phénomène donné) que quantitative (détermination théorique de l'occurrence temporelle).

#### 3.1. Quelques considérations théoriques

La difficulté de prévoir la date de déclenchement d'une instabilité est illustrée par l'exemple du glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes) où le site instable était instrumenté. La figure 2.1 nous montre une évolution très inquiétante du mouvement qui pouvait conduire en juillet 1987 à des prévisions pessimistes, alors que cette évolution a été suivie au contraire d'un ralentissement remarquable (P. ANTOINE et al., 2000).

Malgré ces difficultés, deux raisons justifient la nécessité d'une attitude probabiliste vis-à-vis du déclenchement des instabilités :

- La rupture est en général déclenchée par des facteurs externes variables dans le temps, tels qu'une pluie, une fonte des neiges ou un séisme, évènements qui ne peuvent être prévus de façon déterministe ;
- La rupture est également conditionnée par des facteurs permanents évoluant lentement et qui sont très imparfaitement connus.



**Figure 2.1** Glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes) : vitesse mensuelle d'une cible, de 1982 à 1991 (P. ANTOINE et al., 2000)

En considérant le premier point, l'aléa devrait être caractérisé par une probabilité d'occurrence dans un laps de temps donné, exemple  $P_{10}$  = probabilité d'avoir un mouvement au moins une fois dans les dix prochaines années.

Dans le cas des phénomènes répétitifs (comme chute de pierres), on peut déterminer généralement la fréquence d'apparition ou le temps de retour, en utilisant la série statistique des évènements passés, à condition qu'elle soit suffisamment complète. Ce qui nous amène à développer dans les années à venir les recherches historiques et le recensement d'évènements passés.

Concernant la zone d'épandage pour les phénomènes à propagation importante, il est nécessaire de combiner la probabilité de départ (probabilité qu'il se produise un glissement de terrain) et la probabilité d'atteinte (probabilité que les éboulis atteignent les bâtiments). La deuxième probabilité décroît plus ou moins régulièrement avec la distance à la source du mouvement.

### 3.2. L'approche pratique

Elle est obtenue indirectement à partir d'une évaluation empirique de la prédisposition ou susceptibilité plus ou moins forte du site au phénomène concerné, qui résulte de la conjonction de tels ou tels facteurs défavorables sur le site. Autrement dit, on s'intéresse qu'aux facteurs permanents du site pour déterminer un « *degré d'instabilité* » du site.

Toutefois, pour introduire le facteur temps dans l'estimation de la probabilité en utilisant l'approche pratique, on affecte une durée conventionnelle de l'ordre de la durée de vie des constructions et ouvrages à cette dernière (soit une cinquantaine ou une centaine d'année en général).

Donc, l'occurrence temporelle n'est pas estimée dans l'absolu, et par suite une des composantes de l'aléa manque, ce qui rend difficile l'utilisation opérationnelle de la carte d'aléa (par exemple pour des questions de constructibilité). Il faut au moins qu'on puisse estimer si un phénomène est très probable (ou non) dans un délai de quelques années, dans un délai de plusieurs dizaines d'années ou dans un délai supérieur à quelques siècles.



#### 4. L'INTENSITE ET L'ALEA

L'utilisation de la carte d'aléa doit faire la différence entre phénomènes majeurs et phénomènes secondaires, compte tenu de ces préoccupations. C'est pourquoi le réalisateur de cette carte (géologue, géotechnicien) est amené à hiérarchiser les aléas liés aux différents événements suivant une grille ou échelle commune.

Par conséquent, on est conduit à ajouter aux trois éléments de base, qui sont nature, extension spatiale et occurrence temporelle, un quatrième relatif à l'importance, à l'intensité du phénomène.

##### 4.1. Différentes variantes de la notion d'intensité

Dans la définition de l'intensité d'un mouvement de terrain, on peut mettre l'accent sur ses conséquences vis-à-vis des vies humaines (la gravité) ou vis-à-vis des constructions (l'agressivité), d'ailleurs ces deux composantes forment la vulnérabilité.

##### 4.1.1. La gravité

La gravité mesure l'importance vis-à-vis des vies humaines, elle est appréciée indépendamment du fait que des personnes séjournent réellement ou non dans la zone concernée.

A titre d'exemple, le tableau 2.1 donne la gravité avec le volume mobilisé et la cinématique.

**Tableau 2.1** Exemple de définition de quatre niveaux de gravité (vis-à-vis des vies humaines) d'un mouvement de terrain (P. Antoine et al., 2000)

Gravité	Préjudices humains	Exemples de Phénomènes (à titre indicatif)
Très faible	Pas d'accident ou accident très improbable	Retrait par dessiccation, Affaissement minier, Fluage, glissement lent (<1m/h)
Moyenne	Accident isolé	Glissement important à paroxysme rapide (quelques dcam/h), chutes de pierres isolées
Forte	Quelques victimes	Chute de blocs, Lave torrentielle, Fontis
Majeure	Quelques dizaines de victimes ou Plus	Eboulement en masse, Ecoulement, Lave torrentielle majeure, Effondrement généralisé de carrière

##### 4.1.2. L'agressivité

L'agressivité ou « *dommageabilité* » d'un phénomène est la capacité de causer des dommages aux constructions et ouvrages. On peut cependant donner chaque niveau d'intensité, les degrés d'endommagement subis par différents types de construction.

Le tableau 2.2 définit trois niveaux d'intensité correspondant à des capacités croissantes de créer des dommages.

**Tableau 2.2** Exemple de niveaux d'agressivité vis-à-vis des constructions (P.ANTOINE et al., 2000)

Niveau d'intensité (agressivité)	Type de dommage attendu	Exemples de phénomènes (à titre indicatif)
Niveau faible	Gros œuvre très peu touché chutes de pierres, glissement pelliculaires, etc.	Affaissements de faible amplitude
Niveau moyen	Gros œuvre atteint, mais réparation possible : fissuration modérée par exemple glissements d'ampleur limitée, etc.	Affaissement de grande amplitude, effondrements ponctuels de faible diamètre, chutes de blocs
Niveau élevé	Gros œuvre fortement touché (voire destruction totale), rendant utilisable la construction ; réparation très coûteuse ou impossible	Eboulement rocheux, glissements de grande ampleur, effondrements généralisés de carrières, etc.

#### 4.1.3. La demande de prévention potentielle (DPP)

Pour classer en intensité les phénomènes, une autre procédure consiste à estimer sommairement le coût d'une stabilisation du mouvement ou coût d'une parade active. Il faut distinguer les stabilisations qui sont du niveau du propriétaire individuel et celles qui relèvent d'un investissement collectif.

Le tableau 2.3 nous donne quatre niveaux d'intensité d'un mouvement de terrain basée sur la demande de prévention potentielle.

#### 4.1.4. Paramètres descriptifs de l'intensité

Bien sûr, il est difficile de fournir des règles de détermination de la gravité ou de l'agressivité des différents types de mouvements de terrain. Pour cela on se base sur l'expérience et l'étude d'accidents passés qui nous permet d'estimer l'intensité.

Il est fréquent d'apprécier l'intensité tout en donnant une liste de paramètres physiques :

- Cas d'un glissement de terrain : Volume mobilisé, aire de la zone en mouvement, épaisseur de terrain glissé, vitesse moyenne de déplacement, etc.
- Cas d'une coulée boueuse ou d'une lave torrentielle : Volume mobilisé par un épisode, charge en gros blocs, vitesse d'écoulement, etc.
- Cas d'une chute de blocs ou d'un éboulement : Volume total mobilisé, volume des blocs individuels, aptitude de ces blocs à se fragmenter en cours de la chute, énergie des blocs, etc.

Comme exemple, on prend le cas des chutes de pierres ou de blocs et des éboulements rocheux où le volume est le paramètre d'intensité. Tableau 2.4 regroupe les trois éléments de conception de l'intensité cités auparavant, ils se traduisent par des échelles un peu différentes.

**Tableau 2.3** Exemple de définition de quatre niveaux d'intensité d'un mouvement de terrain, basé sur la DPP (P. ANTOINE et al., 2000)

Niveau d'intensité DPP	Niveau des mesures de prévention nécessaire	Exemples de mesures de prévention(à titre indicatif)
Faible	Moins de 10% de la valeur vénale d'une maison individuelle moyenne	Purge de quelques blocs instables en falaise, confortation d'une cave par pilier maçonné
Moyenne	Parade financièrement supportable par un groupe restreint de propriétaires (immeuble collectif, petit lotissement)	Réalisation d'un merlon de terre en protection contre les chutes de blocs, comblement d'une carrière souterraine, drainage de faible ampleur dans une zone instable
Forte	Parades spécifiques, intéressant une aire géographique débordant largement le cadre parcellaire, et d'un coût très important	Stabilisation d'un glissement de terrain de grande ampleur, confortement d'un pan de falaise instable
Majeure	Pas de parade sûre (techniquement ou économiquement envisageable)	Phénomène exceptionnel impliquant plusieurs dizaines de millions de mètre cubes

**Tableau 2.4** Cas des chutes de blocs et éboulements rocheux : estimation de l'intensité suivant différentes définitions d'après le volume mobilisé (P. ANTOINE et al., 2000)

Volume mobilisé (v)	Gravité	Agressivité	DPP
$V < 1 \text{ dm}^3$	Très faible à moyenne	Nulle à faible	Faible
$1 < V < 100 \text{ dm}^3$	Moyenne	Faible à moyenne	Faible
$0.1 \text{ m}^3 < V < 1 \text{ m}^3$	Moyenne à forte	Moyenne	Moyenne
$1 \text{ m}^3 < V < 1000 \text{ m}^3$	Forte à majeure	Moyenne à élevée	Moyenne
$1000 \text{ m}^3 < V < 100000 \text{ m}^3$	Majeure	Elevée	Forte
$100000 \text{ m}^3 < V$	Majeure	Elevée	Forte à majeure

Il faut noter quand même, que pour ces quatre tableaux (exemples de classement d'intensité), on a considéré tous les types de mouvements de terrain (y compris affaissement et effondrement).

En fin de compte, il appartient au géologue, géotechnicien, de choisir une définition de l'aléa et de construire une correspondance entre les niveaux d'intensité et les paramètres descriptifs des différents types d'instabilité rencontrés.

## 5. METHODES D'ÉVALUATION DE L'ALÉA DES MOUVEMENTS DE PENTE

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'évaluation de l'aléa, que nous présentons dans ce chapitre. Elles peuvent être qualitatives ou quantitatives, et directes ou indirectes.

Les méthodes qualitatives sont subjectives et portent le zonage d'aléa sur des termes descriptifs (qualitatifs). Les méthodes quantitatives produisent des estimations numériques (probabilités) pour l'occurrence des phénomènes de glissement dans toutes zones d'aléa.

Les méthodes directes consistent en une cartographie géomorphologique de l'aléa de mouvements de pente. Concernant les méthodes indirectes, l'évaluation de l'aléa est faite essentiellement par étapes judicieuses.

Les plus importantes méthodes proposées dans la littérature peuvent se regrouper en quelques catégories principales (CARRARA et al 1992 ; VAN WESTEN 1993 ; CARRARA et al 1995 ; HUTCHINSON 1995), et qui sont :

- Cartographie géomorphologique d'aléa : Méthode directe et qualitative, elle met en évidence la capacité et la compétence de l'investigateur à estimer l'actuel et le potentiel mouvement de pente ;
- Méthode basée sur des indices : C'est une méthode indirecte et qualitative, elle est fondée a priori sur la connaissance de toutes les causes des événements et les facteurs d'instabilités responsables de ces derniers ;
- Analyser l'inventaire des glissements de terrain : C'est une tentative de prédire de future modèle d'instabilité par distribution passée ou présente le dépôt de mouvements de terrain. Elle est accomplie en préparant la carte de densité des phénomènes (carte donnant le nombre ou le pourcentage de surface couvert par les dépôts de glissements de terrain partout dans la région). C'est une méthode indirecte et quantitative ;
- Méthodes statistiques, probabilistes : Elles se basent sur l'analyse de relations fonctionnelles entre les facteurs d'instabilité et la distribution, passée ou présente, des glissements de terrain. C'est une méthode indirecte et quantitative ;
- Méthode géotechnique ou physique : Elle est basée sur les lois physiques ou géotechniques qui contrôlent l'instabilité des pentes. C'est une méthode indirecte et quantitative.

On peut aussi différencier ces méthodes (d'après FARES 1994) en deux groupes, méthodes déterministes (arithmétique) et méthodes probabilistes.

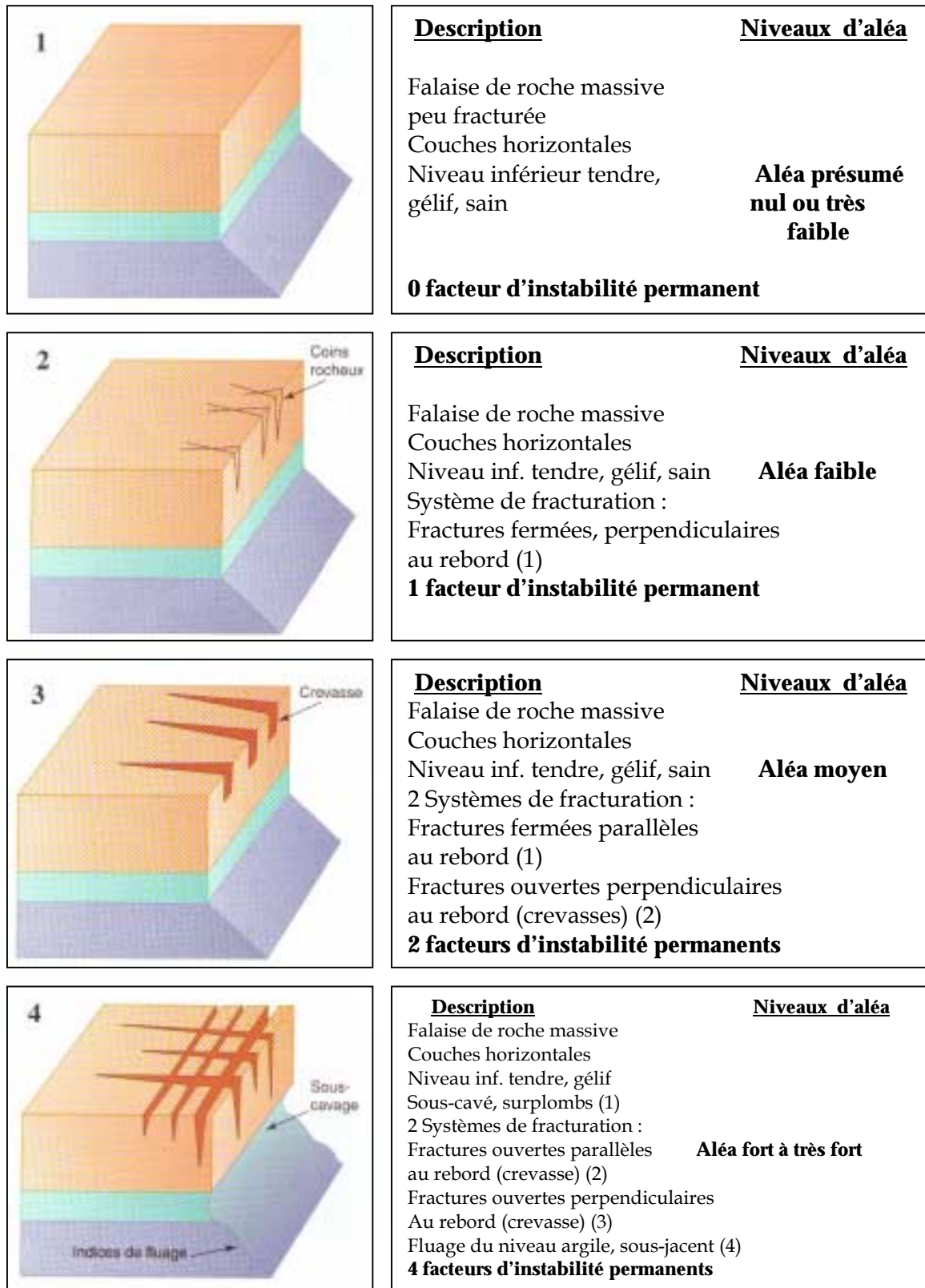
D'après P. ANTOINE et al (2000), ces méthodes sont classées en catégories suivantes :

- Jugement qualitatif d'expert ;
- Méthode par pondération des facteurs ;
- Étude statistique ;
- Calculs systématiques de stabilité.

### 5.1. Méthodes basées sur l'expérience de l'ingénieur chargé de l'étude

Dans ce cas, l'ingénieur estime le degré d'aléa en fonction de critères qualitatifs, de nature empirique, en tenant compte de son expérience. Seulement, il apparaît nécessaire qu'il formule par écrit sa façon d'approcher la question (liste des facteurs prise en compte, hiérarchisation et combinaison de ceux-ci, etc.), de façon à réduire la subjectivité de la démarche.

Comme une première méthode, le degré d'aléa est déterminé pour une falaise rocheuse à partir du nombre de facteurs d'instabilité présents sur le site. La figure 2.2 présente schématiquement cette démarche.



**Figure 2.2** Schéma illustrant la méthode d'estimation du degré d'aléa en fonction des facteurs de prédisposition présents : cas d'une corniche rocheuse pouvant donner lieu à des chutes de blocs et à des éboulements (P. ANTOINE et al., 2000)

Une autre méthode est utilisée pour la carte ZERMOS de Nantua (France). Les auteurs ont constitué une grille d'évaluation qui permet de déterminer, pour chaque type de phénomène (cas d'instabilités rocheuses et de glissements de sols), le degré d'aléa (0, 1, 2, 3 ou 4 en degré croissant), d'après son intensité (liée au type de phénomène et à sa dynamique) et sa modalité d'occurrence temporelle. Le tableau 2.5 donne un extrait de cette grille.

L'auteur peut aussi, par son expérience sur le terrain, mettre directement en correspondance le degré d'aléa avec les conditions de site qui conduisent à ce degré. A titre d'exemple, pour les glissements de terrain de la région de Grenoble, la description des critères caractérisant l'aléa fort est présentée par le tableau 2.6. Ceci selon le service de restauration des terrains en montagne du département de l'Isère (cartes d'aléa préparatoires aux Plans de Prévention aux Risques PPR). Insistons sur le fait que ce type de grille d'estimation de l'aléa suppose une excellente expérience régionale des instabilités.

**Tableau 2.5** Exemple de grille d'évaluation de l'aléa utilisée pour la carte ZERMOS de Nantua (extrait d'après VILLAINÉ et BOBILLON, 1976) (P. ANTOINE et al., 2000)

Description de l'instabilité		Position de la zone	Modalité d'occurrence temporelle		
Type d'instabilité	Dynamique		Permanent ou répétitif à grande fréquence	Occasionnel ou répétitif à faible fréquence	Etat non déclaré (potentiel)
		Lieu de départ	4 ou 3	4 ou 3	
Chutes de pierres et de blocs	Rapide	Zone d'épandage habituel	4	4	
		Zone d'épandage exceptionnel	3	3	
		Lieu de départ		4	3
Eboulements de quelques centaines de mètres cubes	Rapide	Zone d'épandage habituel		4	3
		Zone d'épandage exceptionnel		3	3
		Lieu de départ		4	3
Eboulement rocheux de plusieurs milliers de mètres cubes	Rapide	Zone d'épandage habituel		4	3
		Zone d'épandage exceptionnel		3	3
		Zone d'épandage très exceptionnel		Zone non individualisée	2
Glissements de versants marneux	Variable		3	3 ou 2	1

**Tableau 2.6** Extrait d'une notice de PPR du département de l'Isère, explicitant les conditions de site qui conduisent à un degré d'aléa fort vis-à-vis des glissements de terrain (d'après un document du service Restauration des Terrains en Montagnes RTM de l'Isère) (P. ANTOINE et al., 2000)

Aléa	Indice	Conditions d'attribution (une des quatre situations ci-dessous)	Exemples de formations géologiques
Fort	G3	Glissement actif dans toutes pentes, avec nombreux indices de mouvement (fissures, bourrelets, contre-pentes, etc.) et dégâts au bâti et aux axes de communication.	Couvertures d'altération des marnes, d'épaisseur estimée > 4m.
		Marge de sécurité autour de ces glissements actifs.	Moraines argileuses. Molasse argileuse. Argiles glacio-lacustre.
		Glissements anciens ayant entraîné de fortes perturbations du terrain.	Schistes très altérés, etc.
		Berges de torrents encaissés, susceptibles d'être déstabilisées lors de crues.	

## 5.2. Méthode par pondération des facteurs

Là aussi, l'expérience et la compétence de l'auteur de la carte sont encore mobilisées. Cette méthode ne se résume pas à faire une combinaison mécanique de notes, mais elle a l'avantage de constituer un cadre homogène, pour ainsi dire normalisé (utile dans le cas où plusieurs auteurs se partageraient le terrain à couvrir), et permet à l'auteur de ne rien oublier.

On peut citer la méthode de GEF (1978), elle est destinée à un seul type d'ouvrage, la route, et d'une seule famille de phénomènes, les chutes de pierres et de blocs.

Cette méthode distingue cinq niveaux d'aléa : nul, faible, moyen, élevé, très élevé.

Ces niveaux sont déterminés à partir de deux éléments :

- La probabilité de chute, dans la zone de départ, avec comme facteurs déterminants principaux la topographie et les discontinuités du massif ;
- La possibilité d'arrêt avant la route, avec comme facteurs déterminants la topographie, la végétation et les protections existantes.

D'autres facteurs peuvent localement être pris en compte pour affiner le classement : végétation en falaise, venue d'eau, antécédents.

Chacun de ces facteurs étant noté 0,1 ou 2, le niveau d'aléa (vert, jaune, orange, rose, rouge) résulte de l'ensemble des notes.

Exemple :

{	Probabilité de chute : 2
	Probabilité d'arrêt : 1 pour la topographie
	2 pour la végétation
	1 pour les protections
	autres facteurs : 1 pour les venues d'eau
	2 pour les antécédents

d'où la couleur attribuée : Rouge.

Une autre méthode est celle de la cartographie d'aléa en Lorraine (PERROT, 1988) : elle combine occurrence temporelle et intensité dans une zone soumise à des glissements sur versants marneux.

L'intensité d'un glissement est quantifiée par :

- La surface mobilisée (note de 1 à 7) ;
- La profondeur de la surface de rupture (note de 1 à 7) ;
- La vitesse de déplacement (note de 1 à 7) ;

Notes dont on fait la somme.

La probabilité d'apparition est notée de la façon suivante :

- Phénomène actif : 9 ;
- Phénomène ancien stabilisé : 5 ;
- Pas de mouvement visible : de 0 à 9 en fonction de la pente, de la nature lithologique et de la présence ou non d'un recouvrement d'éboulis calcaires.

L'aléa est déterminé par la grille suivante :

intensité	→	très forte	forte	moyenne	faible	
probabilité	↓	très probable	élevé	élevé	moyen	faible
		peu probable	moyen	moyen	faible	nul

Un autre exemple de détermination du degré d'aléa est celui de GUPTA et ANBALAGAN (1997). Les types de phénomènes considérés sont les glissements dans des massifs rocheux plus ou moins altérés, de type plan ou dièdre.

Cette méthode est basée sur une approche empirique où on combine des facteurs d'instabilité de pentes majorés, qui sont :

- Lithologie (note maxi : 2.0) ;
- Relation entre orientation des discontinuités et du versant (note maxi : 2.0) ;
- Valeur de la pente (note maxi : 2.0) ;
- Relief, dénivelée locale (note maxi : 1.0) ;
- Conditions hydrogéologiques (note maxi : 1.0) ;
- Degré de couverture du sol par la végétation (note maxi : 2.0).

Le degré d'aléa est déterminé par le calcul de la somme totale S des notes affectées à chaque facteurs cités au-dessus :

$S \leq 3.5$	aléa très faible
$3.5 < S \leq 5.0$	aléa faible
$5.0 < S \leq 6.0$	aléa modéré
$6.0 < S \leq 7.5$	aléa fort
$7.5 < S$	aléa très fort

### 5.3. Méthode de FAVRE et al.

C'est une approche par expertise et une démarche naturaliste, implicite. Elle a fait l'objet d'études à partir de références à des événements vécus sur le site ou sur un environnement analogue.

FAVRE et al.(2004) l'ont utilisé pour établir une cartographie d'aléa de la partie centrale montagneuse du Liban. Ceci à partir de cinq cas de glissements étudiés se produisant dans la zone à cartographier, et qui présentent certaines similitudes entre les facteurs causaux.

Justement, les facteurs pris en compte dans cette opération sont : la géologie, la pente (topographie), le sol (nature du terrain) et l'hydrogéologie. Alors chaque facteur a été partitionné en trois modalités correspondant à un risque quasi nul, à un risque moyen et à un risque important.

Pour le facteur géologie, les modalités adoptées sont :

- Modalité 0 : Formation compacte et homogène où il ne peut y avoir de glissement ;
- Modalité 1 : Formation hétérogène, alternance de marnes et de bancs de calcaires fins ; c'est dans ce type de formation que se trouvent les cas étudiés ;
- Modalité 2 : Formation tendre.

Ces modalités sont représentées sur une carte (tirée de la carte géologique) où la modalité 1 a été hachurée.

A propos du facteur pente, les modalités affectées sont :

- Modalité 0 : Pente < 15° (pentes faibles) ;



- Modalité 1 :  $15^\circ < \text{Pente} < 30^\circ$  (pentes moyennes) ;
- Modalité 2 :  $30^\circ < \text{Pente}$  (pentes fortes).

Ils obtiennent une carte (tirée de la carte topographique) où la modalité 2 a été hachurée.

Concernant le facteur sol :

- Modalité 0 : Sols sableux, alluvions diverses ;
- Modalité 1 : Sables fauves côtiers, sols jaunâtre de montagne sur calcaires ;
- Modalité 2 : Sols argileux (la plupart des sols glissés ont une base argileuse).

Dans une carte tirée de la carte des sols, la modalité 2 a été hachurée.

Pour le facteur hydrogéologie, les modalités sont :

- Modalité 0 : Région généralement sans nappes ou à nappes très locales ;
- Modalité 1 : Région avec nappes locales ou discontinues ;
- Modalité 2 : Région avec nappes étendues.

Les cas d'études sont en modalité 1, celle-ci a été hachurée pour obtenir une carte tirée de la carte d'hydrogéologie.

Enfin, le croisement (superposition) de ces quatre cartes de facteurs permet d'obtenir la carte de l'aléa mouvements de pente, avec cinq degrés :

- Zone vierge d'hachures : Aléa nul ;
- Zone à une seule hachure : Aléa faible ;
- Zone à deux hachures : Aléa moyen ;
- Zone à trois hachures : Aléa élevé ;
- Zone à quatre hachures : Aléa très élevé.

#### 5.4. Méthode statistique

Un exemple d'étude statistique est présenté dans ce qui suit. Il s'agit de la cartographie d'aléa faite en Calabre (Italie) par CARRARA (1984). C'est un essai méthodologique qui ne peut avoir de portée générale. La méthode comprend deux étapes :

- Définition d'un critère quantitatif permettant de distinguer zones stables et zones instables à partir de l'analyse d'un secteur-test représentatif de l'ensemble ;
- Utilisation de ce critère pour estimer l'aléa dans l'ensemble de la région traitée.

Dans un premier temps un quadrillage 100x100 m est défini, et chaque parcelle est caractérisée par dix-sept attributs, tels que lithologie, pente, couverture végétale, profondeur estimée de la nappe, etc. une analyse factorielle dans le secteur-test met en évidence un premier facteur  $F_1$ , différenciant au mieux les parcelles, qui dépend essentiellement de la lithologie, de la pente et du type de couvert végétal.

Ensuite ce paramètre  $F_1$  est utilisé pour discriminer zones stables et zones instables, après un calage dans le secteur-test.

Le pouvoir de discrimination est résumé dans le tableau suivant, exprimé en pourcentage des parcelles du secteur-test (10 000 parcelles, dont au total 81% sont correctement classées) :

estimé observé	stable	instable	total
stable	82%	18%	100%
instable	28%	72%	100%

#### 5.5. Méthode du SGG (Service de la Géotechnique et de la Géologie. Québec)

Cette initiative a vu le jour après la catastrophe de juillet 1996 (des glissements de terrain déclenchés par des pluies torrentielles) dans la région du Saguenay (Canada).

Le SGG a utilisé la méthodologie de cartographie et d'estimation de l'aléa qui est expliquée dans ce qui suit.

La première étape est l'élaboration de la phase analytique : carte des informations de base (compilation des données géologiques et géotechniques) et carte des dangers (identification de tous les types de glissements de terrain).

Ensuite, les informations des deux cartes précédentes sont analysées et synthétisées pour obtenir une carte d'aléas qui permet de classer les zones de façon qualitative selon le degré de probabilité qu'il y survienne un glissement de terrain. Cette opération est élaborée par le SGG, en collaboration avec des experts norvégiens (K. KARLSRUD et S. LACASSE 1998). Ce travail de zonage est basé sur le jugement de l'ingénieur, lequel peut poser un diagnostic différent dans des conditions particulières.

Dans le cas présent, cinq classes d'aléas ont été définies par les critères suivants :

- **Zone à probabilité élevée (ZPE)** : talus à pente forte présentant des signes majeurs d'instabilité ou subissant des processus d'érosion lors de la cartographie. Dans ces zones, la stabilité du talus se dégrade continuellement et l'apparition d'un glissement de terrain est fortement probable sans que l'on puisse cependant en fixer l'échéance.
- **Zone à probabilité moyenne (ZPM)** : talus à pente forte ne présentant aucun signe d'instabilité ainsi qu'aucun processus d'érosion lors de la cartographie. Dans ces zones, la stabilité du talus ne se dégrade pas (ou très peu) en fonction du temps, mais elle peut varier en fonction des conditions météorologiques. Une combinaison de facteurs particuliers (exemple : pluie abondante et fonte de neige printanière rapide) ou un événement majeur (exemple : pluies de juillet 1996) peuvent constituer des facteurs déclencheurs. L'apparition d'un glissement de terrain est donc liée à la probabilité que surviennent de tels événements particuliers.
- **Zone à probabilité faible (ZPF)** : talus à pente modérée où aucun glissement d'origine naturelle ne devrait survenir, à moins de conditions très exceptionnelles telles un tremblement de terre d'extrême amplitude. Bien qu'ils soient stables à long terme, des aménagements dans ces talus ou à proximité pourraient provoquer des glissements de terrain. C'est pourquoi des précautions particulières sont nécessaires pour utiliser ces terrains.
- **Zone à risque de coulée argileuse (ZRCA)** : cette zone inclut une bande située au sommet du talus à l'arrière des ZPE en bordure des cours d'eau ; elle est caractérisée par la présence probable ou confirmée (en zone habitée) d'argile sensible (figure 2.3). Un glissement rotationnel profond dans le talus pourrait amorcer une coulée argileuse.
- **Zone à risque de coulée argileuse hypothétique (ZRCAH)** : cette zone inclut une bande située au sommet du talus à l'arrière de terrain à pente forte ou modérée ; elle est caractérisée par la présence confirmée ou probable d'argile sensible. Un glissement rétrogressif majeur ne pourrait survenir que si des conditions exceptionnellement défavorables étaient réunies. L'évaluation de la rétrogression probable est basée sur la dimension des plus grandes cicatrices de coulée argileuse dans le secteur concerné. Cette zone circonscrit donc toutes les autres aux endroits où elle existe.

Pour les trois premières classes, la zone à risque comprend le talus lui-même et une bande au sommet et à la base de celui-ci. Ces bandes peuvent être affectées par des glissements de terrain et sont sensibles aux interventions humaines qui pourraient constituer un facteur déclencheur. Leurs dimensions sont basées sur les résultats de l'inventaire des glissements de terrain de 1996 au Saguenay, Lac-Saint-Jean par le Centre Géoscientifique de Québec ainsi que sur l'expérience du Ministère des Transports du Québec et de l'ancien Service de Géotechnique du Ministère des Ressources Naturelles.

Les données de cet inventaire ont permis d'établir des relations statistiques détaillées concernant les dimensions de la bande de protection. La figure 2.4 montre le pourcentage des glissements de terrain dont l'étalement des débris a dépassé une distance donnée qui

est exprimée en fonction de la hauteur du talus. On peut voir que 60% des glissements ont des débris qui ont dépassé une distance correspondant à la moitié de la hauteur du talus. Pour une dimension égale à deux fois la hauteur du talus, seuls 2% des glissements ont des débris s'étalant au-delà de cette limite. Il s'agit cependant de cas où la liquidité des matériaux remaniés était très élevée, ce qui signifie que leur impact est minime.

La largeur de la bande de protection a donc été fixée à deux fois la hauteur du talus, puisque les éléments situés dans cette zone sont presque tous autant vulnérables. Au-delà de cette distance, les débris sont très liquides. Par conséquent, le risque devient extrêmement faible.

Les deux dernières classes identifient les terrains où pourrait se développer un grand glissement de terrain de type « *coulée argileuse* » si les conditions nécessaires étaient réunies. Il s'agit généralement de terrains plus ou moins plats situés à l'arrière des talus précédemment identifiés.

Ces deux dernières classes ont des objectifs différents. Dans le premier cas, il est important de tenir compte de la délimitation de ces zones dans la gestion quotidienne du terrain pour éviter les développements dans une zone dangereuse. Dans la deuxième classe, l'identification de cette zone permet d'avoir une meilleure connaissance du territoire pour la gestion en cas de sinistre majeur.

Le périmètre de sécurité à définir temporairement en bordure d'un talus nouvellement érodé, peut être de dimension variable dépendant de la présence ou non d'argile sensible.



**Figure 2.3** Exemple de zonage le long d'un ravin avec les bandes de protection au sommet du talus et les zones à risque de coulée argileuse (SGG)

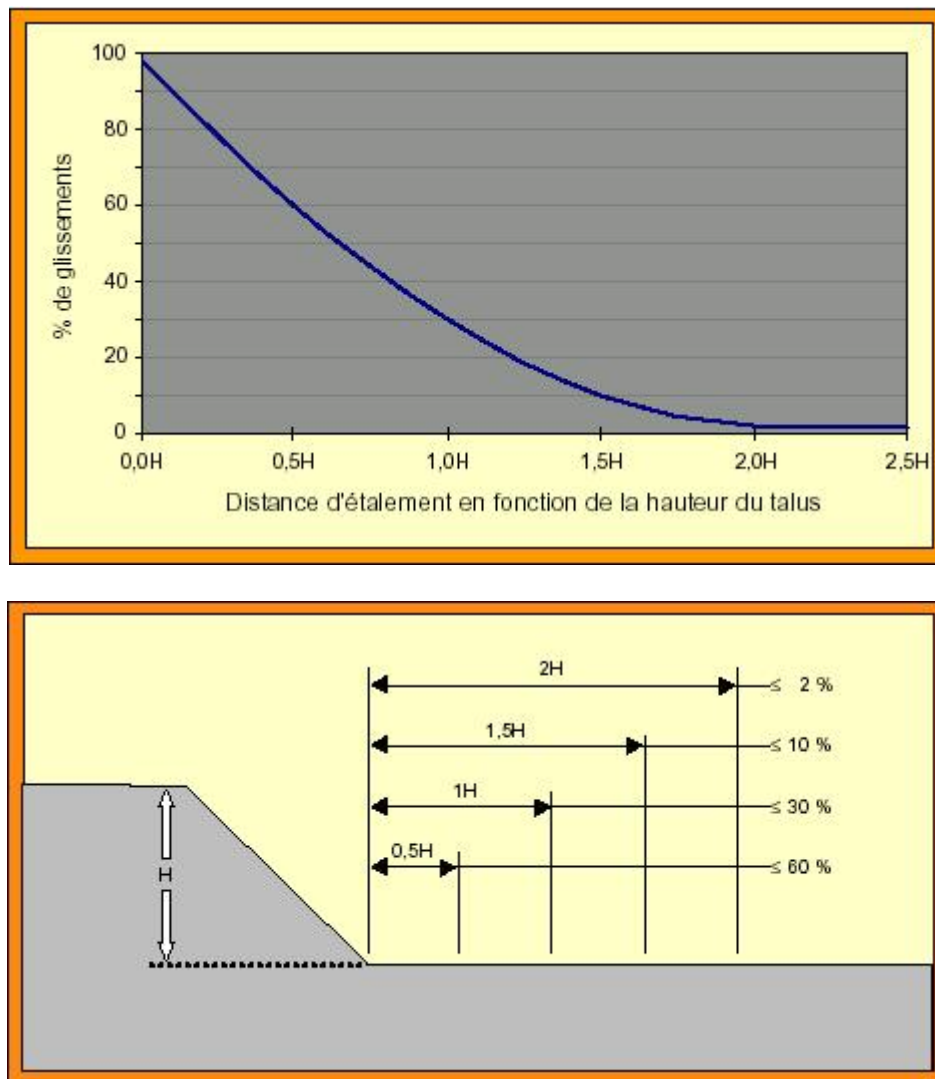


Figure 2.4 Dimension de la bande de protection (SGG)

### 5.6. Méthode utilisée par FARES

Cette méthode de cartographie des risques naturels (on utilise le terme risque pour respecter la terminologie de l'auteur, mais son sens, dans cette méthode, est aléa) a été utilisée pour faire face aux mouvements de terrain au niveau du site de Taounate (Rif central, Maroc) (figure 2.5).

Elle tient en compte les facteurs permanents liés à la topographie, à la nature et à la structure du matériau et à la géomorphologie. Ces facteurs sont cartographiés séparément pour obtenir les cartes de facteurs du risque.

La superposition de ces cartes fait ressortir les relations entre la lithologie, la pente et les indices d'instabilité. Une étude basée sur les calculs de rapports de surfaces (rapport des surfaces instables sur la surface de la classe considérée) permettent de fonder une simulation du risque qui est gradué en cinq niveaux dans une échelle numérique (1,2,3,4 et 5). Ceci conduit à transcrire les cartes de facteurs en cartes numériques appelées cartes de simulation du risque.

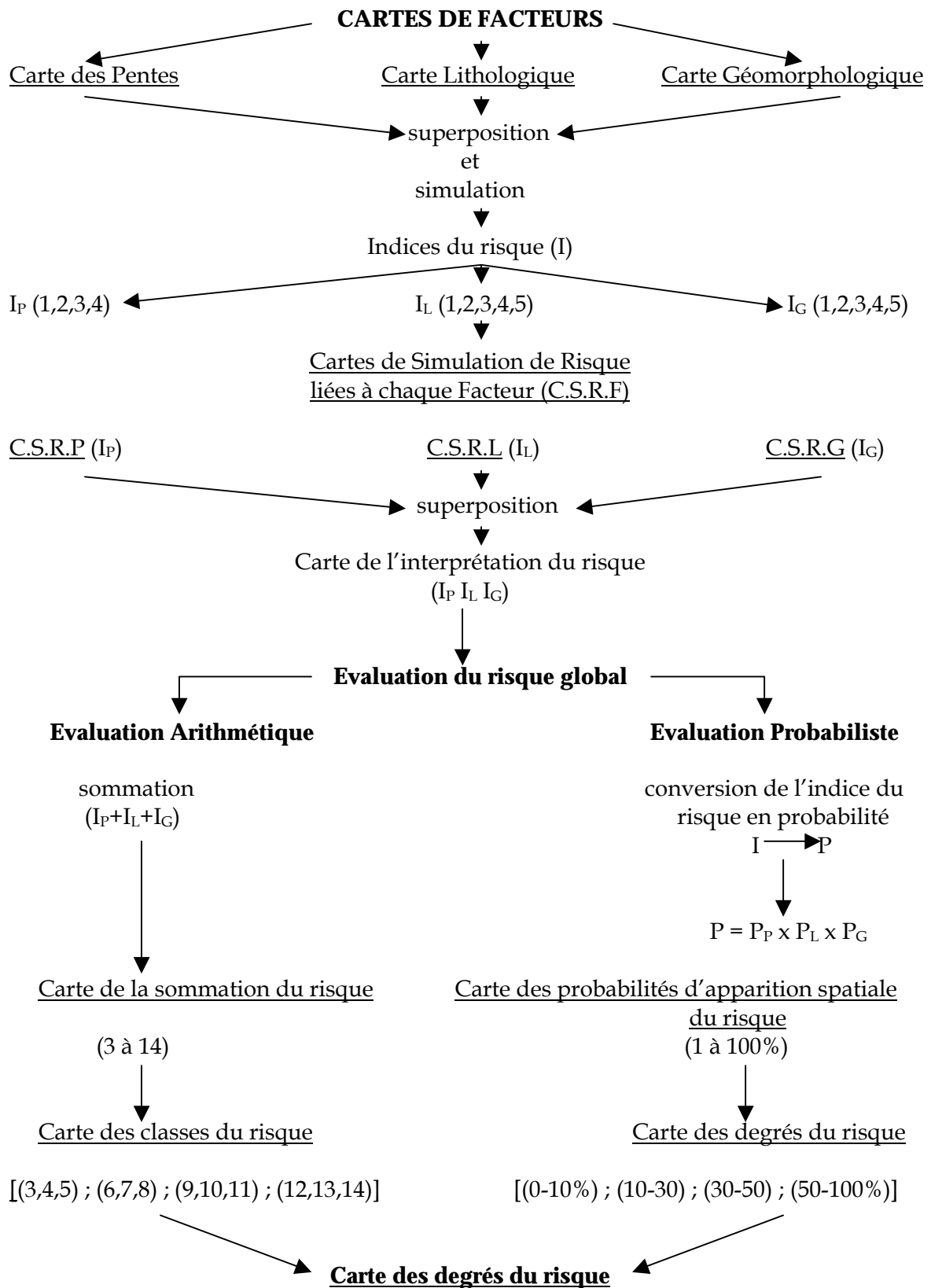


Figure 2.5 Schéma de la méthode de la cartographie des risques naturels (d'après FARES, 1994)

La carte de l'interprétation du risque délimite des secteurs où figurent les niveaux du risque assigné à chaque facteur selon des triplets.

L'évaluation du risque résultant de l'action conjointe des facteurs a été effectuée suivant deux méthodes : la méthode arithmétique et la méthode probabiliste, aboutissant à deux cartes synthétiques des risques naturels.

- L'évaluation arithmétique : Elle consiste à faire la somme des trois indices des triplets figurant dans la carte de l'interprétation du risque ( $I_p + I_l + I_g$ ). On obtient alors la carte de la sommation du risque qui présente douze zones, où la somme indiciaire donne un maximum de 14 (4+5+5) et un minimum de 3 (1+1+1). Ces douze zones sont réduits à quatre classes exprimant le degré du risque naturel pour obtenir la carte des classes du risque. Ces classes sont définies selon les fourchettes suivantes :
  - Classe 1 : Risque faible ou négligeable (3,4,5) ;
  - Classe 2 : Risque moyen (6,7,8) ;
  - Classe 3 : Risque élevé (9,10,11) ;
  - Classe 4 : Risque très élevé (12,13,14).
  
- L'évaluation probabiliste : consiste à convertir les indices du risque en terme de probabilité partielle (Tableau5). Par suite, l'évaluation du risque est estimée au produit des probabilités des différents facteurs, pour avoir la carte des probabilités d'apparition du risque :
 
$$P_R(\%) = P_p \times P_l \times P_g \times 100$$
 avec :  $P_R$  est la probabilité d'apparition spatiale du risque (minimum 1%, maximum 100%). Cette carte présente 23 secteurs des probabilités allant de 1 à 100%. En ramenant ces pourcentages de probabilité à quatre niveaux du risque, on obtient la carte finale des degrés du risque, avec :
  - (1 à 10%) degré du risque faible ou négligeable ;
  - (10 à 30%) degré du risque moyen ;
  - (30 à 50%) degré du risque élevé ;
  - (50 à 100%) degré du risque très élevé.

### 5.7. Méthode de D.M. McCLUNG

C'est une méthode d'estimation de l'aléa concernant les dangers associés aux pentes montagneuses. On calcule la probabilité que des installations ou des véhicules soient heurtés au moins une fois lorsqu'ils sont exposés sur une période de temps finie  $L$ , à des événements dont la période de retour est  $T$ , pour un endroit donné.

Dans cette méthode on fait l'hypothèse que les événements sont rares, indépendants et suivent une loi de distribution d'arrivée binomiale (de Bernoulli) ou un processus de poisson.

**Distribution Binomiale** : Supposant que la probabilité d'avoir l'événement (chute de blocs ou de pierres, torrent de débris) est durant n'importe quel intervalle petit de temps  $\Delta t$ . Alors le nombre total d'événements durant un temps fini  $L = n \times \Delta t$  est décrit par la fonction de la probabilité binomiale :

$$P_k(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k} \quad (2.1)$$

Avec  $k=0,1,2,3,\dots,n$  et  $n$  et  $k$  sont des nombres entiers.

Dans l'équation (2.1)  $P_k(k)$  représente la probabilité pour que l'événement se réalise  $k$  fois ( $k$  est un nombre aléatoire) pendant  $n$  (essai) intervalle de temps indépendant  $\Delta t$ , dans la période de temps finie  $L$ .

La probabilité  $p$  pour qu'un événement se réalise durant n'importe quel intervalle de temps indépendant est :

$$0 \leq \Delta t/T \leq 1$$

et le nombre d'événement espéré durant n période de temps est  $n \Delta t / T$ .

De l'équation (2.1), la probabilité de rencontre  $E_p$ , est la probabilité d'occurrence au moins une fois pendant n essais. C'est la somme de tout les termes excepté  $k=0$  :

$$E_p = 1 - \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right)^n \quad (2.2)$$

*Processus de Poisson* : Considérant le processus de Poisson pendant une période finie de temps ( $L=n \times \Delta t$ ) avec la période de retour  $T$ . Dans ce cas on considère que l'intervalle  $\Delta t$  est très petit, telle que quand  $n \rightarrow \infty$ ,  $\Delta t \rightarrow 0$ , mais le produit ( $L=n \times \Delta t$ ) reste constant et fini, comme pour la distribution binomiale. Pour telle hypothèse, la fonction de la probabilité s'écrit :

$$P_k(k) = \frac{\mu^k \exp(-\mu)}{k!} \quad (2.3)$$

avec  $k=0,1,2,3,\dots, \infty$  et  $\mu$  : paramètre de poisson ( $\mu=L/T$ )

$k$  est un nombre aléatoire d'événement et  $\mu$  est le taux d'occurrence de l'événement de poisson durant  $L$ .

De l'équation (2.3), la somme de tous les termes excepté  $k=0$  nous donne la probabilité de rencontre :

$$E_p = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T}\right) \quad (2.4)$$

L'équation [4] peut s'appliquer pour n'importe quel période de retour :  $0 \leq T \leq \infty$ .

Quand  $T \rightarrow 0$ ,  $E_p \rightarrow 1$  ; et quand  $T \rightarrow \infty$ ,  $E_p \rightarrow 0$ .

### 5.8. Méthode utilisant une approche géomorphologique

C'est une méthode élaborée par M. CARDINALI et al. (2002) sur la région d'Umbria du centre d'Italie. Elle est basée sur la reconnaissance de glissements de terrain anciens et existants, sur des examens minutieux de la géologie et la géomorphologie locales et sur des études de sites-spécifiques et des informations historiques d'événements anciens de mouvement de terrain.

Pour cela, une carte d'inventaire de glissements de terrain multi-temporelle est réalisée, en interprétant des différentes séries de photographies aériennes stéréoscopiques réalisées pendant la période 1941-1999 et d'autres cartes pendant les années 2000 et 2001.

En considérant la définition de l'aléa comme étant la probabilité d'occurrence de glissements de terrain d'une magnitude donnée, dans une zone donnée et pendant une période de temps prédéfinie, celle-ci contient les concepts de localisation spatiale (ou), magnitude ou intensité (quelle échelle) et fréquence d'occurrence (quand). L'emplacement se reporte à la capacité de prévoir où le glissement de terrain se produira ; magnitude se reporte à la prédiction de la taille et vélocité de l'événement ; et fréquence se reporte à la capacité de prévoir l'apparition temporelle de l'événement. Alors l'évaluation de l'aléa naturel a été faite, dans ce cas, en combinant la fréquence et l'intensité des événements.

La fréquence est obtenue à travers l'analyse des données historiques et de la carte d'inventaires multi-temporelle qui couvre 60 ans (de 1941 à 2001) d'observations.

Par conséquent, quatre classes de fréquence de glissements de terrain sont identifiées :

- Fréquence basse (1), quand seulement un événement est observé ;
- Fréquence moyenne (2), quand 2 événements sont observés,
- Fréquence élevée (3), quand 3 événements sont observés ;
- Fréquence très élevée (4), quand plus de 3 événements sont observés pendant 60ans.

L'intensité (I) est définie en fonction du volume déplacé (v) et de la vitesse (s) d'un glissement de terrain  $I = f(v, s)$ . Le tableau 2.7 montre comment l'intensité a été affectée pour chaque mouvement de terrain (ou groupe de mouvement de terrain) en se basant sur l'estimation du volume et la vitesse attendue. Le volume est estimé suivant le type de glissement de terrain, tandis que pour la vitesse, elle dépend du type de rupture, du volume en mouvement et de la profondeur estimée de la surface de rupture, et l'estimation de l'étendue du mouvement.

**Tableau 2.7** Intensité du mouvement de terrain (M. CARDINALI et al. 2002)

Volume estimé (m <sup>3</sup> )	Vélocité attendue de glissement de terrain		
	mouvement très rapide (chute de pierre)	mouvement rapide (coulée de débris)	mouvement lent (glissement)
<0.001	faible (1)		
<0.5	moyenne (2)		
>0.5	élevé (3)		
<500	élevé (3)	faible (1)	
500-10 000	élevé (3)	moyenne (2)	faible (1)
10 000-50 000	très élevé (4)	élevé (3)	moyenne (2)
>500 000		très élevé (4)	élevé (3)
>>500 000			très élevé (4)

L'aléa naturel (H) dépend de la fréquence du mouvement (F) et de son intensité (I),  $H=f(F,I)$ . Le tableau 2.8 nous montre comment l'aléa a été défini en mettant en relation la fréquence (estimée suivant 4 classes, basée sur le nombre d'événements) avec l'intensité (définie aussi en 4 classes, basée sur l'estimation du volume en mouvement et la vitesse attendue). Donc le degré d'aléa est défini en deux indices numériques bien positionnés, à gauche celui de la fréquence (F) et celui de la droite représente l'intensité (I).

**Tableau 2.8** Degré d'aléa en fonction de l'intensité et de la fréquence (M. CARDINALI et al., 2002)

Fréquence estimée	Intensité du mouvement de terrain			
	faible (1)	moyenne (2)	élevé (3)	très élevé (4)
basse (1)	11	12	13	14
moyenne (2)	21	22	23	24
élevé (3)	31	32	33	34
très élevé (4)	41	42	43	44

Il faut noter que l'aléa présenté sur le tableau 7 n'est pas classé d'une façon absolue en niveau (ou degré) d'aléa. Quand les valeurs d'indices numériques sont extrêmes, le degré d'aléa est facilement défini ( $H=44$  et  $H=11$ ), tandis que pour les valeurs intermédiaires, il est difficile de classer l'aléa, et cette opération reste une question d'opinion (l'aléa  $H=41$  est élevé ou faible par rapport à  $H=14$ ). Les auteurs de cette approche ont classé le degré d'aléa comme suit :

Aléa : 11 12 13 21 14 22 23 31 32 24 33 41 42 34 43 44  
 faible ← 21 14 22 23 31 32 24 33 41 42 → élevé



## 6. CONCLUSION

En bref, la caractérisation complète de l'aléa dû aux mouvements de pente fait en général référence à quatre éléments :

- Type de phénomène (développé au chapitre précédent) ;
- Intensité ;
- Extension spatiale (relative au type de phénomène) ;
- Élément temporel (généralement, c'est la durée conventionnelle de l'ordre de la durée de vie des constructions).

Concernant les méthodes d'évaluation de l'aléa des mouvements de pente, l'expérience et la compétence de l'auteur de la carte sont toujours mobilisées.

La méthode experte reste toujours générale, simple et pratique, tandis que pour les méthodes statistiques et probabilistes n'ont de raison d'être qu'en fonction des données dont on dispose, données en quantité comme en qualité, et demandant des structurations élaborées et informatisées.

## CHAPITRE 3

# CARTOGRAPHIE DE L'ALEA DES MOUVEMENTS DE PENTE

---

### 1. INTRODUCTION

**« Si ardu étant ce chemin qu'il serait difficile de le donner à entendre par des paroles ou de l'écrire avec la plume. La meilleure explication qu'ait trouvé pour cela le génie des hommes est de le donner en peinture sur une carte ». MARTIN CORTES (1510-1582, Séville, Espagne)** (Institut Géographique National, IGN 2004, France).

Les hommes ont utilisé des cartes depuis la plus lointaine antiquité, vraisemblablement avant même l'invention de l'écriture. Certains dessins sur les grottes préhistoriques pourraient bien constituer des croquis de leurs territoires. Plus pratique, on retrouve, dès trente siècles avant notre ère, des tablettes d'argile sur lesquelles étaient gravés des itinéraires.

Ensuite, ce type de communication s'est développé en parallèle avec les instruments de mesures et de représentations cartographiques, en passant par différentes époques, pour arriver au XX<sup>ème</sup> siècle (l'ère moderne) où l'apport de la photographie aérienne puis la télédétection par satellite, paracheva l'œuvre de 25 siècles de recherche (IGN).

Dans notre cas, on associe la cartographie (comme un moyen conceptuel) à l'aléa de mouvements de pente, afin de repérer et délimiter les zones pouvant être exposées à des risques naturels. Ainsi, on essaye dans ce chapitre, de présenter la notion de cartographie dans un cadre général, puis en particulier comme carte d'aléa des mouvements de pente et son principe d'élaboration.

### 2. DEFINITIONS

La cartographie est l'art et la manière de faire des cartes, documents scientifiques et artistiques concernant toutes les représentations en plans, coupes ou reconstitution tridimensionnelle de la Terre ou autres corps célestes, à toutes les échelles [traduit et adopté par MEYEN, 1973].

D'après DECADE (groupe de travail et de réflexion, Français), la cartographie est définie comme l'ensemble des études et des opérations scientifiques, techniques, et artistiques, intervenants à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation, en vue de l'élaboration, de l'établissement et de l'utilisation de cartes, plans et modes d'expression.

### 3. OBJECTIF DE LA CARTOGRAPHIE

L'utilisation fréquente de la cartographie dans plusieurs domaines, revient à ce qu'elle se substitue avantageusement et même quelquefois exclusivement au mode littéraire pour exprimer la perception de l'espace et le traitement des données. En plus, la carte joue un rôle à tous les niveaux d'une étude, comme document de travail, de recherche, d'information et de décision.

Elle est utilisée dans plusieurs applications pour son grand intérêt pratique, cité ci-dessus, comme par exemple:

- *Connaissance du milieu naturel* : Pour inventorier les sols et préciser leurs distributions dans l'espace. Cette cartographie établit donc un état des lieux et elle peut servir dans toutes sortes de domaines prévus ou imprévus.
- *Planification de l'occupation du sol* : Pour réserver les meilleures terres à l'agriculture et les moins bonnes au reste des activités humaines. Malheureusement, les choses ne vont pas ainsi pour deux raisons : d'une part, les bonnes terres sont les mêmes pour tout le monde. Les constructeurs comme les agriculteurs préfèrent les terrains plats, accessibles, pas trop humides et sans obstacles majeurs. D'autre part, la compétition n'est pas égale entre l'agriculture et les autres branches de l'activité humaine si on se réfère à des indicateurs économiques.
- *Aménagements agricoles* : Des cartes de sol sont souvent utilisées au préalable à différents types d'aménagements agricoles ; comme le drainage, l'irrigation et le défrichement et restauration des sols.
- *Protection des sols* : Pour lutter contre l'érosion, la dessalinisation et contre les pollutions chimiques.
- *Autres applications* : En particulier :
  - L'aménagement des zones côtières pour lutter contre l'urbanisation anarchique ;
  - L'étude de processus de désertification ;
  - La caractérisation des sites pollués surtout dans les pays développés.

Dans notre application, la cartographie est associée au risque naturel. La gestion des risques a besoin de la cartographie et d'une manière plus générale de la gestion de données géoréférencées pour être plus efficace.

#### 4. LES SYSTEMES DE REPRESENTATION GRAPHIQUE

La cartographie constitue un outil puissant qui permet de représenter sur un fond topographique adopté, des phénomènes localisables tant qualitatifs que quantitatifs. Elle associe sur un même document trois types d'informations :

- *Une référence spatiale* : C'est la représentation plane d'une portion de surface à travers un système de projection (Lambert par exemple) ;
- *Un rapport dimensionnel* : Traduit par une échelle ;
- *Un message thématique* : Retranscrit grâce à un langage spécifique défini par la sémiologie graphique. La légende doit sortir de l'ésotérisme du technicien si la carte est destinée à un public non initié.

Ce document a l'impact et la puissance de l'image et il a une vision qui doit être instantanée et globale. Or l'œil perçoit simultanément trois composants : deux pour le repérage spatial (X,Y), et une pour la qualification de l'objet. Cette troisième variable qu'il faut en tenir compte pour hiérarchiser des niveaux de lecture, en classant les informations par ordre d'importance et de corréliser leur mise en valeur aux systèmes de représentation disponibles.

Les données à reporter sont de plusieurs sortes :

- Quantitatives, exprimées par des unités de mesure ;
- Ordonnées, que l'on peut classer ;
- Qualitatives, traduites par des valeurs descriptives non mesurables, exprimant soit une association, soit une différenciation.

Pour les représenter, on a recours à deux références fondamentales du système graphique :

- **L'implantation** : Elle est ponctuelle, linéaire ou zonale (figure 3.1). Notons que les figurés et les poncifs servent aussi bien à localiser ponctuellement un phénomène qu'à exprimer une couverture zonale en les répétant ;



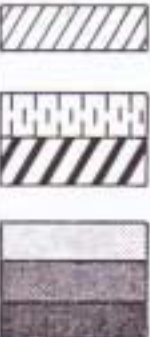

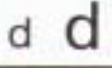

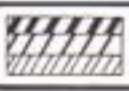




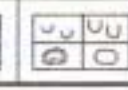
Implantation	Figurés	Remarque
<p><u>Ponctuelle</u></p> <p>poncifs</p> <p>figurés</p> <p>Bulle, cartouche</p>		<p>Graphismes suggestifs qui provoquent la représentation classique des phénomènes dans les cartes ZERMOS, par exemple</p> <p>Figurés alphabétiques hiérarchisés de diverses manières</p> <p>types - capitales - minuscules</p> <p>grasses - gras - maigre</p> <p>corps - taille des corps (7 à 9)</p> <p>surcharge - (lettres entourées, soulignées)</p> <p>disposition - lettre en indice</p> <p>les indications sont portées dans un cadre à l'intérieur duquel on a supprimé les détails du fond de plan. Un trait localise l'information</p>
<p><u>Linéaire</u></p>		<p>Plusieurs figurés sont possibles pour exprimer une hiérarchie, une probabilité, une fréquence d'un phénomène. Traits pleins gras, maigre, tireté gras, maigre, pointillé, etc.)</p>
<p><u>Zonale</u></p> <p>un type d'information</p> <p>plusieurs informations non ordonnées</p> <p>plusieurs niveaux d'informations ordonnées</p>		<p>Trame couleur, trame points ou lignes en noir et blanc</p> <p>Trames différentes (traits points), poncifs...</p> <p>Trame identique (traits ou points), de même linéature, indiquant des paliers de valeur différente, exemple : 10, 30, 50%.</p>

Figure 3.1 Les modes d'implantation des données (G. GARRY et P. DECAILLOT, 1987)

- **Les variables visuelles** : Il faut signaler que l'œil d'un capteur enregistre huit variables ; les deux dimensions du plan, la taille (surfaces croissantes), la valeur (pourcentage de noir ou de couleur dans une même teinte : 10, 20, 50, 100%), la forme, le grain (variation de trames, lignes, points en conservant la même valeur), la couleur et l'orientation. La figure 3.2 montre les principales utilisations des variables en fonction des types de données. Il est possible de combiner deux ou plusieurs variables en ajoutant par exemple des lettres à la couleur.

Niveau d'organisation des données	Taille	Valeur nb. couleur	Grain	Couleur	Forme	Orientation
Quantitatif						
Ordonné						
Qualitatif différentiel						
Qualitatif associatif						

**Figure 3.2** L'utilisation des variables visuelles (G. GARRY et P. DECAILLOT, 1987)

La couleur est de loin la variable la plus efficace, elle est flatteuse dans la présentation d'une carte et constitue un bon support médiatique, mais elle n'est pas exclusive des autres variables. Le seul inconvénient reste son coût de reproduction.

L'utilisation de la couleur peut être de diverses manières :

- Une même couleur avec plusieurs valeurs pour exprimer une hiérarchisation, un ordre : degré d'aléa ;
- Une couleur par type de donnée, type de risque, etc. Il existe dans ce cas particulier une référence culturelle significative par analogie avec les feux routiers tricolores ;
- Une couleur à deux valeurs pour traduire un même phénomène à deux niveaux (l'espace/temps par exemple ; actif/ancien, actif/potentiel, etc.).

Ces trois scénarios sont également possibles avec une trame points noir et blanc sans toutefois dépasser quatre ou cinq valeurs pour qu'elles restent aisément discernables. La trame noire et blanche peut aussi se superposer à la couleur soit (trame trait) pour indiquer une deuxième information (par exemple : Un niveau d'aléa et une nature de terrain), soit (trame points) par redondance pour insister sur l'importance du message.

On peut aussi, comme exemple, concevoir la carte en noir et blanc avec des trames de valeurs différentes, renforcées par les lettres initiales des couleurs concernées, à condition bien sûr, que ce système de lettres ne soit pas déjà retenu pour une autre information (R : rouge ; B : bleu, etc.).

## 5. CARTOGRAPHIE DES ZONES EXPOSEES A DES MOUVEMENTS DE PENTE

Le terme de risque peut s'entendre de diverses façons ; un choix est nécessaire dès le début de l'analyse.

Sur un plan purement théorique le risque peut être considéré comme la probabilité pour qu'un événement donné surgisse, abstractions faites des conséquences socioéconomiques qui peuvent en résulter [A. THOMAS, 1973].

Sur un plan plus général, le risque est couramment défini (d'après le dictionnaire) comme un danger, un péril, un inconvénient possible. Il implique la réalisation éventuelle d'un événement lié à une force naturelle majeure. Cette définition sous-entend évidemment, à la différence de la précédente, que le risque ne peut être caractérisé qu'en fonction de l'homme, menacé dans sa personne ou ses biens, par le péril ou le danger.

Seulement avant d'aller plus loin, il faut rappeler deux points essentiels qui sont mentionnés au chapitre précédent :

- On adopte dans notre travail la première définition du risque -citée au-dessus- pour obtenir une carte d'aléa naturel (parce qu'on ne peut évaluer la vulnérabilité dans des terrains nus);
- Concernant les phénomènes naturels, on s'intéresse qu'à une catégorie donnée d'événements : ceux qu'appartient aux mouvements de pente (glissement de terrain, chute de blocs ou de pierres, coulée boueuse, etc.) tout en écartant les affaissements, effondrements et les phénomènes géodynamiques.

### 5.1. Objectif de la cartographie liée aux mouvements de pente

Il est indispensable, avant d'entreprendre le travail technique de cartographie proprement dit, que le projet auquel on s'attache soit bien défini. De façon générale, on peut distinguer quatre types principaux de cartographie en relation avec les mouvements de pente :

- *La carte de constat* : Appelée aussi carte d'inventaire, nous permet de faire l'inventaire et le repérage des phénomènes anciens ou récents. Elle est quasi objective et donne une idée globale, en tenant compte de la densité des phénomènes, de la répartition de l'activité des mouvements de terrain ;
- *La carte d'aléa* : Elle vise à délimiter les zones où la probabilité de survenance du phénomène naturel en une période de temps donnée est identique, probabilité appelée aléa. Il faut noter que l'aléa dans une zone est indépendant de l'occupation actuelle de cette zone ;
- *La carte de risque* : Elle combine aléa et enjeux (les populations ou les biens actuellement exposés) pour évaluer le risque ;
- *La carte des mesures de prévention* : En fonction des aléas et des risques, cette carte définit dans chaque secteur les mesures à prendre, qu'elles soient techniques (drainage par exemple) ou non (nécessité d'une étude avant construction).

Il faut signaler que les membres réalisateurs des cartes d'aléa doivent être en accord (l'auteur de la carte et son donneur d'ordre) en définissant :

- *Les types d'instabilités prises en compte* : Tous types d'instabilité ou certains types ;
- *Le territoire couvert* : Notons qu'il y a deux types de zonage ; zonage surfacique et zonage d'itinéraire. Pour le premier, il faut souvent déborder des limites correspondant à la commande, pour examiner des zones situées plus à l'amont, comme exemple, zone de départ de lave torrentielle, coulée boueuse ou falaise génératrice de chutes de blocs. Pour le deuxième, il s'agit d'un zonage linéaire qui suit la voie de communication et prend en compte toutes les instabilités qui peuvent la concerner ;
- *La notion d'aléa et en particulier d'intensité* : Et donc corrélativement le but final visé : protection des vies humaines, limitation des dommages aux ouvrages et constructions, etc.

De plus, le spécialiste qui réalise la carte d'aléa doit avoir toujours en vue le but final de son entreprise, et il doit atteindre les deux objectifs principaux assignés à cette carte :

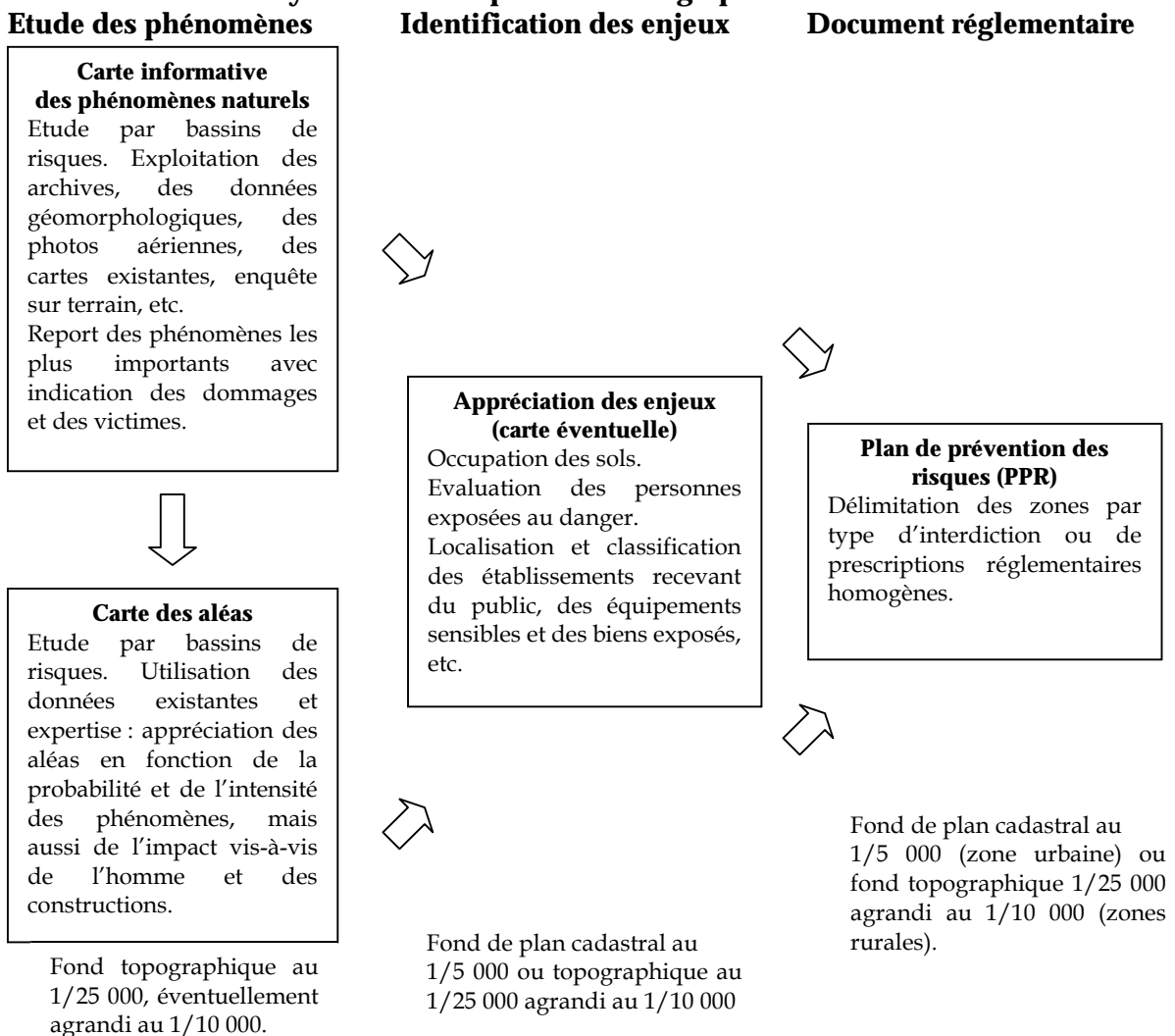
- *Fournir une information la plus complète possible sur les phénomènes naturels* : La carte doit être significative et intelligible au spécialiste qui la dresse, sans perdre pour autant l'une de ses fonctions premières qui est la communication. Les informations doivent

passer, d'une manière compréhensible, de l'émetteur au récepteur. On peut citer l'exemple des cartes ZERMOS (France) qui ont été vendues en librairie. Donc la carte est de type informatif, et doit induire un comportement responsable des citoyens et des décideurs (récepteur), qui se protégeront des dangers ou éviteront les zones à risque ;

- **Préparer la réalisation d'une carte de type réglementaire** : Son rôle est d'imposer des contraintes et des modalités aux habitants, aux usagers d'un équipement public, aux candidats à la construction, etc. (obligation de travaux de protection, interdiction de construire, etc.) de façon à réduire le risque. En France, les plans de prévention des risques (PPR), dressés au niveau communal, délimitent des zones dans lesquelles une réglementation s'impose aux projets nouveaux, voire aux installations existantes (figure 3.3).

En général, le but final et essentiel d'une carte thématique (relative à un thème) est de communiquer (exprimée des similitudes, des différences, des tendances, des orientations) et de jouer un rôle à tous les niveaux d'une étude, comme document de travail, de recherche, d'information et de décision.

### Synthèse des étapes de la cartographie des PPR



**Figure 3.3** Diagramme décrivant la démarche des PPR, incluant la carte des aléas et le carte informative qui la précède (carte de constat) (d'après un document du ministère français de l'environnement et de l'aménagement du territoire) (P. ANTOINE et al. 2000)

## 5.2. Les choix cartographiques

On a cité auparavant quatre types de carte associés aux mouvements de terrain. On peut à leurs tours les classer et les regrouper schématiquement, selon leurs niveaux d'information et leur complexité, en trois documents généraux. On distingue donc les cartes d'inventaire au sens large, les cartes de synthèse et les cartes réglementaires.

### 5.2.1. Cartes d'inventaire

Ces cartes sont destinées essentiellement aux techniciens qui prennent en considération des sources de renseignements inexploitable par les non-spécialistes, telle que photo-interprétation, enquête sur le terrain, etc. Toutefois, on peut citer l'exemple de la carte PER (plans d'exposition aux risques, France) qui s'adresse à un large public. Elle a pour but de situer les phénomènes connus (manifestation dans le temps et extension) et de livrer quelques éléments permettant à ce dernier de comprendre la carte d'aléa (principaux facteurs d'instabilité par exemple).

La seule difficulté qui réside dans cette carte est qu'elle soit « multirisque » et ceci par la représentation des différents types de mouvements de terrain (glissement de terrain, chute de blocs, etc.) par plusieurs couleurs. Certaines cartes traitent de six phénomènes présentés selon trois possibilités, c'est-à-dire trois nuances. Ceci sature l'œil par les dix-huit couleurs à identifier.

Pour cette carte, l'ordre de présentation des éléments met donc en relation :

- Une identification spatio-temporelle ;
  - Le phénomène : couleur dominante ;
  - Son déroulement dans le temps (ancien/ actif/ potentiel/ rare/ fréquent) : couleur nuancée ;
  - Son type : poncifs.
- Une seconde série de renseignements, qui vise à souligner les principaux facteurs d'instabilité des mouvements de terrain et les systèmes de défense.

### 5.2.2. Cartes de synthèse

Elles sont l'expression finale d'une étude, intégrant par exemple les cartes intermédiaires : géologique, clinométrique, géotechnique, lithologique, hydrogéologique, etc., et qui met en évidence les manifestations potentielles d'un ou plusieurs phénomènes (occurrence, intensité) en un zonage hiérarchisé.

En fonction du niveau d'information, on peut distinguer deux grandes catégories (citées auparavant) :

- *Carte de risque* : Comme exemple, cartes ZERMOS (Zones Exposées aux Risques de Mouvements de Sol et du sous-sol, France) ;
- *Cartes d'aléa* : Qui représentent des études préalables aux POS (Plans d'Occupation du Sol).

Dans ces deux cas, les cartes établies sont destinées aux collectivités locales, à l'administration, au public, et doivent être d'autant plus intelligibles.

La couleur sera réservée à l'information la plus importante, c'est-à-dire à la hiérarchisation des risques ou de l'aléa suivant la finalité du document.

### 5.2.3. Cartes réglementaires

Elles ont pour but de préciser les modalités d'occupation et d'utilisation des sols en distinguant les zones sans prescription constructibles sous certaines conditions, et inconstructibles. Ainsi, elles sont l'aboutissement logique des réalisations cartographiques précédentes qui mettent le danger en évidence. Il importe que la connaissance du risque soit diffusée, que des directives techniques préventives soient élaborées (les mesures de prévention peuvent relever de règles constructives, de travaux de protection, de règles

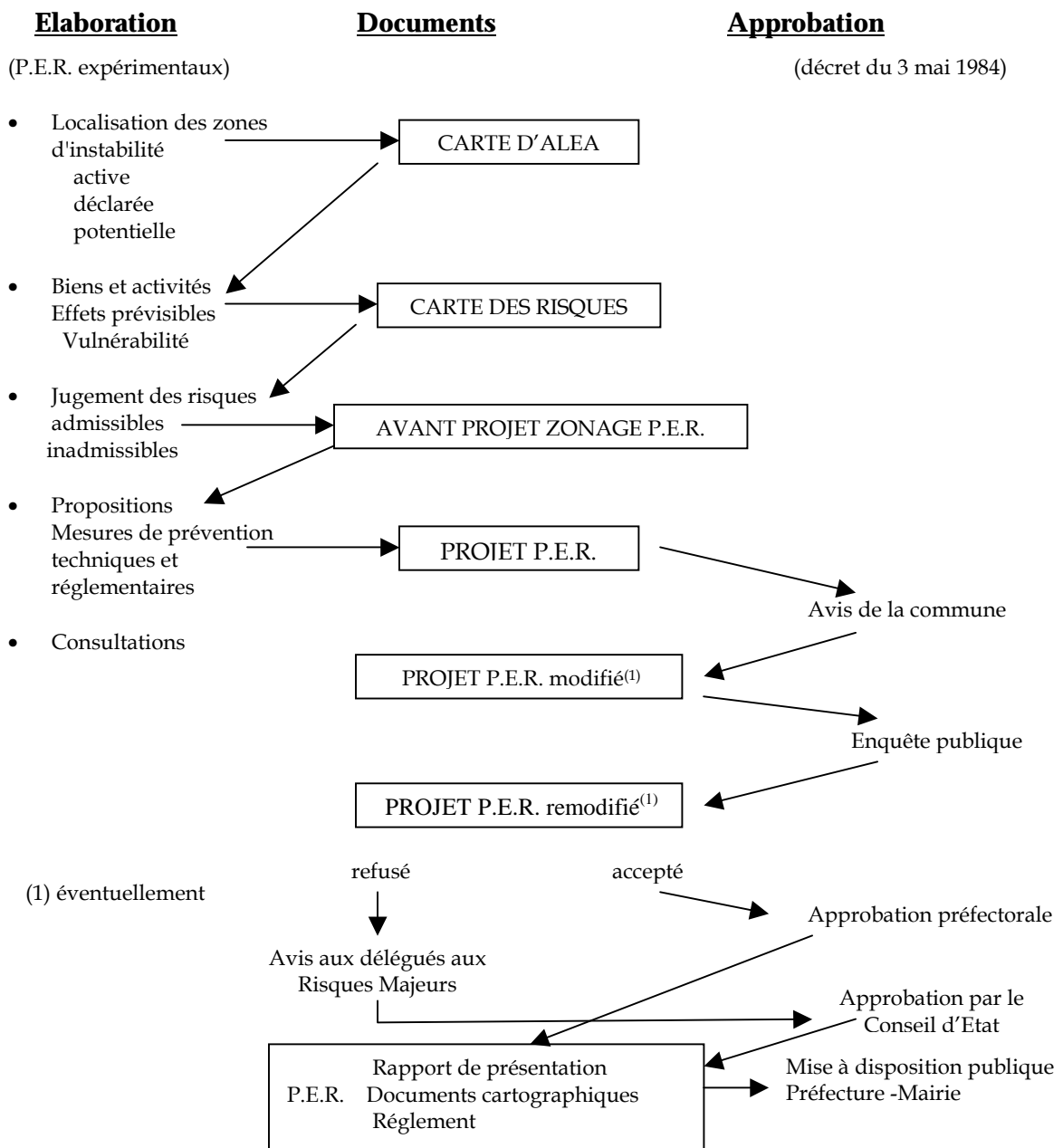


d'urbanisme), une réglementation instantanée et que celle-ci soit appliquée même s'il le faut d'une manière autoritaire, et doit être comprise et acceptée.

Dans le cas le plus simple, ces cartes classent et délimitent les terrains en deux zones :

- En zone A, les nouvelles constructions sont interdites sauf autorisations exceptionnelles.
- En zone B, les nouvelles constructions sont soumises à une réglementation particulière.

Enfin, pour retrouver ces différents types de cartes, et les liens qui existent entre elles on peut donner l'exemple de la loi française sur les catastrophes naturelles qui a prévu de réglementer et limiter les constructions dans les zones à risques, en s'appuyant sur des Plans d'Exposition aux Risques (PER) qui ont valeur de servitude d'utilité publique et sont établies par les services techniques et les administrations de l'état (figure 3.4).



**Figure 3.4** Procédure scientifique, technique et administrative d'établissement d'un PER (France) mouvement de terrain (J.C. FLAGEOLLET, 1989)

### 5.3. Contexte de la cartographie d'aléa

Les travaux de protection ont été réalisés assez tôt dans l'humanité, les digues du Nil sont mentionnées dès le cinquième millénaire avant J.C. En revanche, la notion de cartographie préventive en général, et de cartographie de l'aléa des mouvements de pentes en particulier, apparaît beaucoup plus tard. Elle apparaît suite à des différents accidents « *naturels* » survenus.

En France, après les deux catastrophes meurtrières du plateau d'Assy (Haute-Savoie) et Val-d'Isère (Savoie) survenues en 1970, ont commencé à apparaître des études de cartographie de l'aléa lié aux mouvements de terrain. La première initiative, dans ce domaine, fut celle du département de l'Isère confronté aux problèmes posés par l'extension de la zone urbaine de Grenoble.

Ces cartographies se sont développées sur le plan national (en 1972) dans le cadre d'une opération bien connue sous le sigle ZERMOS (Zones Exposées aux Risques de Mouvements du Sol et du sous-sol), réalisées par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et le laboratoire de géologie appliquée de l'Université de Grenoble. Il s'agissait en fait d'un document d'alerte destiné à refuser l'excuse de l'ignorance quant à la présence de mouvements de terrain.

Elles se poursuivirent en 1982 avec les PER (Plans d'Exposition aux Risques), relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, qui va généraliser la cartographie des risques naturels dans la pratique administrative. Les PER déterminent notamment les zones exposées et les techniques de prévention.

En 1985 un autre type de cartographie a vu le jour, relatif à la protection de l'environnement, il s'agit des plans de prévention des Risques Naturels (PPR), qui instituent un cas d'expropriation pour risques naturels majeurs menaçant gravement des vies humaines.

En Grande Bretagne, seuls des essais locaux de cartographie ont été réalisés, le plus souvent à base de cartes géomorphologiques, dont le but était essentiellement scientifique.

En Norvège, une cartographie de l'aléa lié aux glissements dans les argiles sensibles a été engagée.

En Autriche, la cartographie est spécifique aux risques d'avalanches et aux risques torrentiels. Elle s'intéresse donc aux mouvements de terrain que lorsque ceux-ci sont dus aux torrents.

En Suisse, des cartes d'alerte dans le cadre du projet DUTI (Détection et Utilisation des Terrains Instables) ont été réalisées. Elles sont obtenues en combinant les données géologiques et géomorphologiques.

En Italie, l'action de cartographie des aléas a été entreprise particulièrement dans de nombreuses régions telles que le Piémont, La Lombardie ou l'Emilie Romagne.

Au Maroc, la cartographie d'aléa naturel a commencé pour la première fois dans les années soixante, en même temps que les cartes géotechniques de Casablanca, de Fès, de Tanger. En 1968 A. MILLES LACROIX établit pour l'ensemble du Rif une carte prévisionnelle des mouvements de terrain.

En Algérie, l'apparition de la carte de l'aléa des mouvements de pente est plus récente. Ces dernières années, notre réglementation exige qu'elle soit intégrée dans les dossiers d'urbanisme en général, et dans le plan d'occupation de sol en particulier. On peut citer comme travaux, les cartes réalisées par A. ALLAL (2003) de certaines parcelles appartenant aux commune Hacine, El-Melh, Bouchenine ainsi que Hammam Bou Hanifia (toutes appartiennent à la wilaya de Mascara. Algérie) dans le cadre « *urbanisation et expansion de ces villes* ».

#### 5.4. Cartes d'aléa

La définition et la caractérisation de l'aléa a été précisées au chapitre précédent. Seulement, ceci n'écarte pas quelques inconvénients et dangers de confusion sur l'expression française *risque naturel*. Cette dernière recouvre en même temps deux notions d'appréciation du risque que font courir les mouvements de terrain, et autres phénomènes naturels, et qui sont :

- La possibilité, la probabilité ou la certitude de survenance du mouvement ;
- Les effets qu'ils sont susceptibles de produire, victimes et dégâts.

Les efforts de précision terminologiques de l'UNDRO (UNITED NATIONS DISASTER RELIEF CO-ORDINATOR) ont essayé d'écarter les *dangers* de contre sens (tableau 3.1).

**Tableau 3.1** Définition et terminologie des risques naturels, UNDRO, 1979 (J.C. FLAGEOLLET, 1987)

UNDRO 1979		EQUIVALENT FRANCAIS
Définition	Terminologie	
Probabilité d'occurrence, en un lieu donné, d'un phénomène potentiellement dangereux susceptible de causer des dommages aux personnes et aux biens.	Natural hazard	Risque naturel (aléas)
Degrés de probabilité et d'intensité du phénomène		Niveau de risque
	Natural disaster	Catastrophe naturelle
Importance ou degré des dégâts et pertes résultant de l'occurrence d'un phénomène naturel d'une ampleur donnée et exprimée selon une échelle de 0 (pas de dégâts) à 1 (perte totale)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vulnerability</li> <li>• Damage</li> </ul>	Dommages
Morts, blessés et dégâts attendus, probables, dus à un phénomène naturel et fonction à la fois du phénomène lui-même et de la vulnérabilité	Risk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coûts et dommages prévisibles</li> <li>• Risques</li> </ul>

Bien sûr, dans notre travail, le zonage du risque est établi à partir d'une probabilité d'occurrence de survenance du mouvement, à partir de cartes dites d'aléa qui localisent la probabilité d'apparition d'un mouvement d'un certain type et d'une certaine intensité.

La probabilité d'apparition est liée à l'action conjointe de certains facteurs d'instabilité (la pente, la nature des roches, etc.) pris en considération. L'aléa combine intensité et probabilité pour aboutir à trois ou quatre niveaux pouvant les représenter par des couleurs différentes : fort, moyen, faible, présumé nul. Ces cartes constituent le document graphique préparatoire des Plans d'Exposition au Risque, à l'échelle du Plan d'Occupation des Sols.

#### 6. ELABORATION D'UNE CARTE D'ALEA

L'estimation et le zonage de l'aléa suivent une démarche qui peut être résumée de la façon suivante :

- Faire le recensement des mouvements actifs ou passés ;

- Identifier les facteurs d'instabilité les plus défavorables, et par analyse les différents types de phénomènes ;
- Enfin, estimer l'aléa dans chaque zone définie comme homogène vis-à-vis des facteurs identifiés précédemment. Si une zone est soumise à plusieurs types d'instabilités (glissement de la couverture meuble et éboulement rocheux venant du fond supérieur, par exemple), elle sera qualifiée vis-à-vis des différents phénomènes.  
Généralement, l'établissement d'une carte d'aléa comporte deux phases :
- *Une phase analytique* : Consacrée au recueil de l'information à partir de la collecte des documents existants et archives, d'enquêtes, d'observations sur le terrain, d'un examen des photographies aériennes, etc. ;
- *Une phase d'interprétation et de synthèse* : Au cours de laquelle sont reportées, sur un même document, les informations recueillies, qui sont ensuite confrontées et corrélées entre elles pour obtenir, zone par zone, une graduation estimée de l'aléa.

### 6.1. La collecte des informations

Elle a pour but de rechercher et de rassembler le maximum d'informations concernant les phénomènes anciens ou récents et ceci en élargissant l'investigation dans le temps ( le passé est la clef de l'avenir ), par une enquête historique, et dans l'espace, par observation du terrain (raisonnement par analogie).

#### 6.1.1. L'enquête historique

Compte tenu des différentes sources des mouvements de terrain (précipitation, séisme, volcan, etc.), l'enquête sur ces derniers est presque nécessairement menée conjointement avec celle qui porte sur les tremblements de terre et les inondations. Seulement il faut faire la part entre les phénomènes concernant la localisation et la chronologie des événements.

Les documents à consulter et à analyser pour une enquête sont le plus souvent de nature géologique (géologie générale structurale, hydrogéologie, formations superficielles, etc.) et géotechnique (propriétés géotechniques des formations), tels que :

- Cartes géologiques, hydrogéologiques, géomorphologiques, etc. ;
- Rapports géotechniques établis à la suite d'instabilités ;
- Mémoires de thèse ou autres travaux de recherche en relation avec la géologie de l'ingénieur.

En plus on consultera avec profit les services techniques de l'état (Protection Civile, Equipement, Agriculture, etc.) et des collectivités locales, les bureaux d'étude publiques ou privés, les universités, etc. à la recherche d'autre source documentaires comme consultation de :

- *Banque de données de sondages* : on y trouvera des informations sur la nature du substratum, sur l'épaisseur des formations superficielles, etc. ;
- *Consultation des archives* : c'est une précieuse source d'information sur les événements passés qui ont causé des victimes ou des dommages. Elles constituent une mémoire très précise des événements survenus. Ainsi, la grande et la petite presse signale régulièrement les événements ayant fait des victimes ou causés des dommages. On peut citer l'exemple de la Normandie, où le dépouillement exhaustif de 25 collections de journaux régionaux et locaux, hebdomadaires et quotidiens, de 1875 à 1985, a permis de recenser 235 cas de mouvements de terrain, sur 135 emplacements différents, et dont 98 n'ont bougé qu'une seule fois en plus d'un siècle.
- *Consultation de banques de données de mouvements de terrain* : la saisie informatique des données d'événements a conduit à l'élaboration de modèles de fiches d'inventaires et d'analyse statistique de plus en plus précis et complets. En France une banque de données nationale des mouvements de terrain (BDMVT) est en cours d'élaboration.

### 6.1.2. La reconnaissance et l'observation du terrain

C'est une phase indispensable du travail de réalisation d'une carte d'aléa. Elle complète et contrôle les informations relatives aux mouvements répertoriés lors de l'enquête historique et les documents consultés. Elle consiste à :

- Procéder à des levés spécifiques : lithologiques, géomorphologiques, hydrogéologiques, structuraux, notamment dans certaines zones délicates. Ceci en complément de cartes géologiques ou autres qui peuvent exister. Ces levés peuvent être associés aux désordres observés dans les constructions pour obtenir une carte manuscrite ;
- Séparer et classer les mouvements anciens préhistoriques, mouvements anciens historiques, et mouvements passés mais récents. La distinction entre mouvements actuels et mouvements du passé se fonde souvent sur un critère géomorphologique, celui de la « fraîcheur » des formes correspondantes. Les cartographes préfèrent souvent parler de mouvements actifs, et de mouvements inactifs.

L'arrêt de l'activité entraîne une dégradation des formes plus ou moins rapide et plus ou moins prononcée (tableau 3.2).

**Tableau 3.2** Eléments indicatifs de l'activité (A) et de l'inactivité (B) d'un mouvement de terrain (glissement, coulée) (CROZIER, 1984)

A	B
• Talus, banquettes et crevasses à bords anguleux	• id° bords arrondis
• Crevasse et dépression sans remplissage secondaire	• id° avec dépôts secondaires
• Déplacements secondaires sur les faces de talus	• Absence
• Stries de frottement sur le plan de rupture et les plans de cisaillements des bordures	• Absence
• Fraîcheur des faces de blocs	• Altération des faces de blocs
• Drainage désorganisé, nombreuses mares et dépression non drainées	• Système de drainage intégré au versant
• Bourrelets de pression en contact avec les bords du glissement	• Bords fissurés et levées abandonnées
• Absence de pédogenèse sur la surface de rupture affleurante	• Présence
• Présence de végétation à croissance rapide	• Végétation à croissance lente
• Différence de végétation dans et hors du glissement	• Pas de différence
• Arbres inclinés sans nouvelle croissance verticale	• Croissance verticale au-dessus du tronc incliné

Il faut définir aussi le qualificatif « *dormant* », qui dans la terminologie anglo-saxonne, s'applique à des glissements anciens encore mal stabilisés. Certains auteurs fondent leur distinction entre dormant et actif sur les âges respectifs des mouvements.

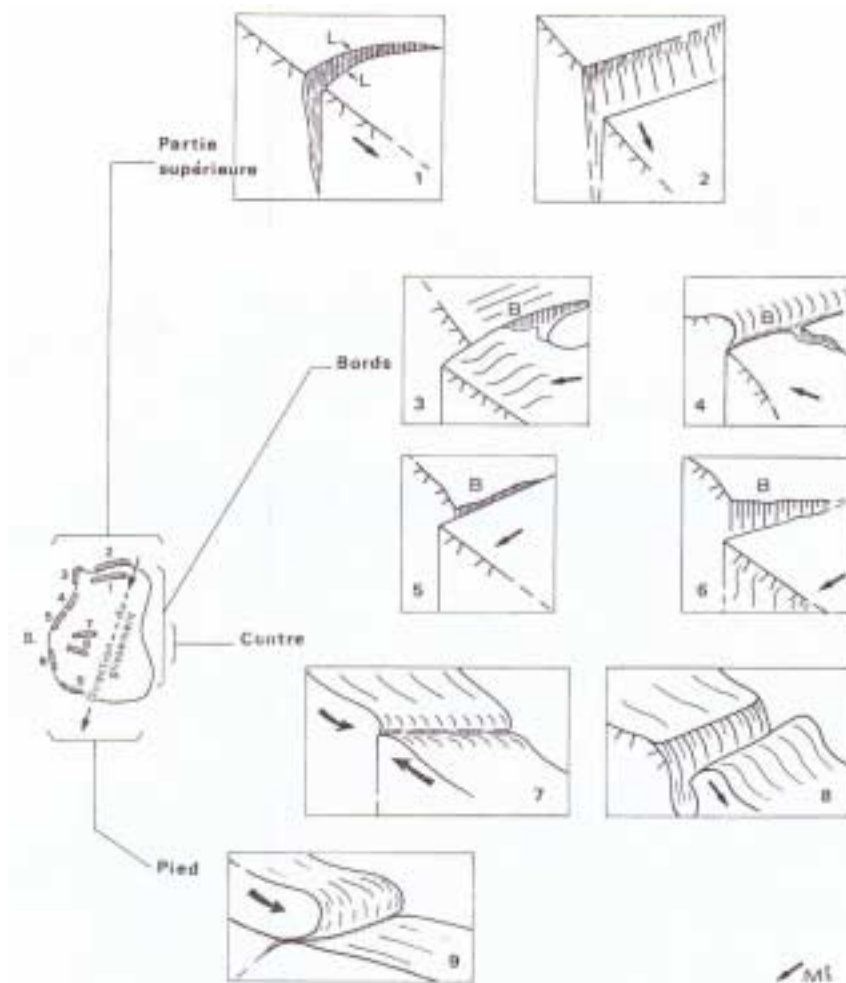
Selon D.J. VARNES (1978), une pente est active si un déplacement est intervenu au moins une fois pendant un cycle saisonnier.

Au Japon, pour S. YANAY (1987) sont actifs ceux qui se sont produits plusieurs fois au même endroit dans les dernières 300 ans, et sont dormants ceux qui n'ont pas manifesté d'activité depuis 1000 ans.

On peut aussi différencier les glissements en fonction de leur degré d'activité défini par leur vitesse moyenne. Le projet DUTI (Détection et Utilisation des Terrains Instables) en suisse, estime que les désordres et les problèmes surviennent quand la vitesse moyenne de déplacement dépasse 2 cm par an. La vitesse est, selon les cas, mesurée ou estimée soit directement par procédés topo métriques, soit indirectement par comparaison d'images (photos aériennes). L'estimation est établie à l'aide d'indicateurs appartenant aux formes de terrain, à la couverture végétale, à l'hydrographie et aux constructions.

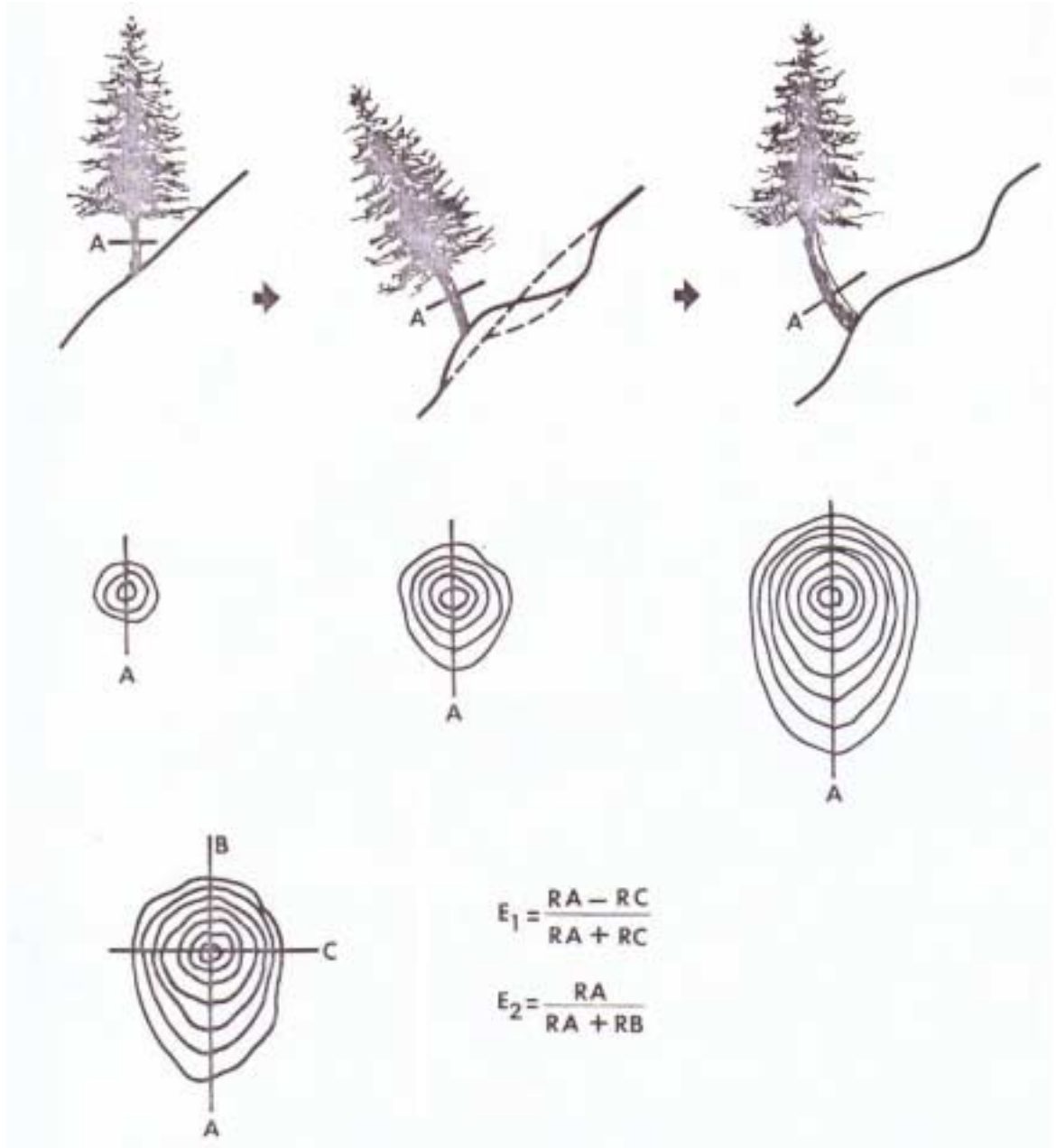
- Rechercher les indices d'instabilité n'ayant pas été mis en évidence au cours des phases précédentes.

Bien sûr, les mouvements laissent des traces repérables directement sur place ou sur les photographies aériennes (panchromatique noir et blanc, infrarouge couleur, enregistrements infrarouges thermiques) ou sur les images satellitaire, et ceci selon le type de mouvement et son ancienneté. On peut citer : fracturation active en paroi rocheuse dénotant une déformation récente (épontes fraîches, racines étirées au travers des diaclases ouvertes, etc.), fissures manifestées sur terrain (figure 3.5), inclinaison des arbres due au basculement subi lors d'un glissement rotationnel ancien (figure 3.6), léger gonflement de talus indiquant un fluage, présence de blocs éboulés cachés par un couvert forestier, déformation ou fissuration de chaussées, fissuration de bâtiments, déformation ou rupture de murs de soutènements, etc.



**Figure 3.5** Types de fissures ou crevasses dans des glissements (d'après BOMBARD, 1968)

Les arbres inclinés nous permettent non seulement de déceler les mouvements de terrain, mais aussi de nous renseigner de manière beaucoup plus fine sur ces derniers, et ceci en observant l'allure de leur tronc ainsi que la forme et la largeur des anneaux de croissance du tronc et des branches. Par exemple, ces observations sont traduites en indices d'excentricité (figure 3.6).



**Figure 3.6** Redressement d'un tronc d'arbre sur un versant en glissement et effet d'excentricité sur les anneaux de croissance (J.C. FLAGEOLLET, 1989)

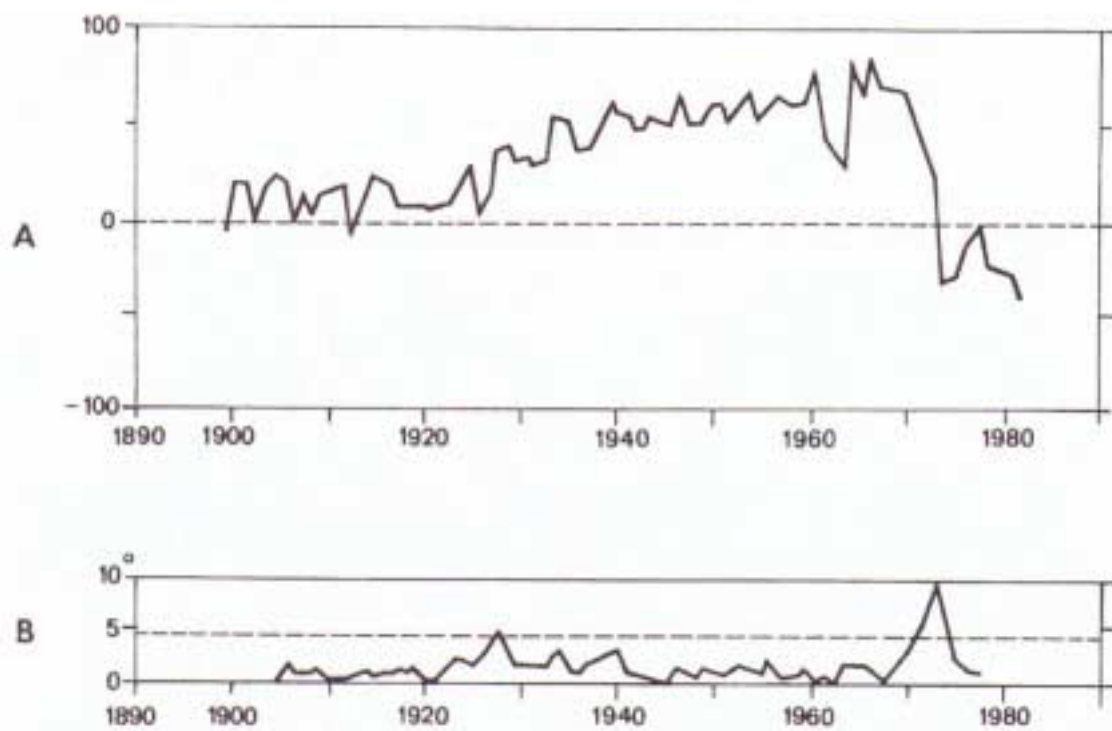
E : indice d'excentricité ;

R : rayon ;

$E_1$  : d'après R. BRAAM (1987) ;

$E_2$  : d'après J. ALESTALO (1971).

La méthode d'étude des processus géomorphologiques d'un versant par les caractéristiques de croissance des arbres, a comme nom : « dendrogéomorphologie ». R. BRAAM et al. (1987) l'ont appliqué avec succès dans le bassin du Riou Bourdaux (région de Barcelonnette) pour y détecter les périodes et les secteurs d'activité, sur près d'un siècle, depuis le reboisement (figure 3.7). Cette analyse des mouvements anciens peut déboucher sur une prévision.



**Figure 3.7** Datation des inclinaisons successives enregistrées dans un *Latrix decidua*, dans un glissement au-dessus de Barcelonnette (d'après R. BRAAM et al., 1987)

A : variations de l'indice d'excentricité.

B : dates, amplitude de l'inclinaison et activité du versant.

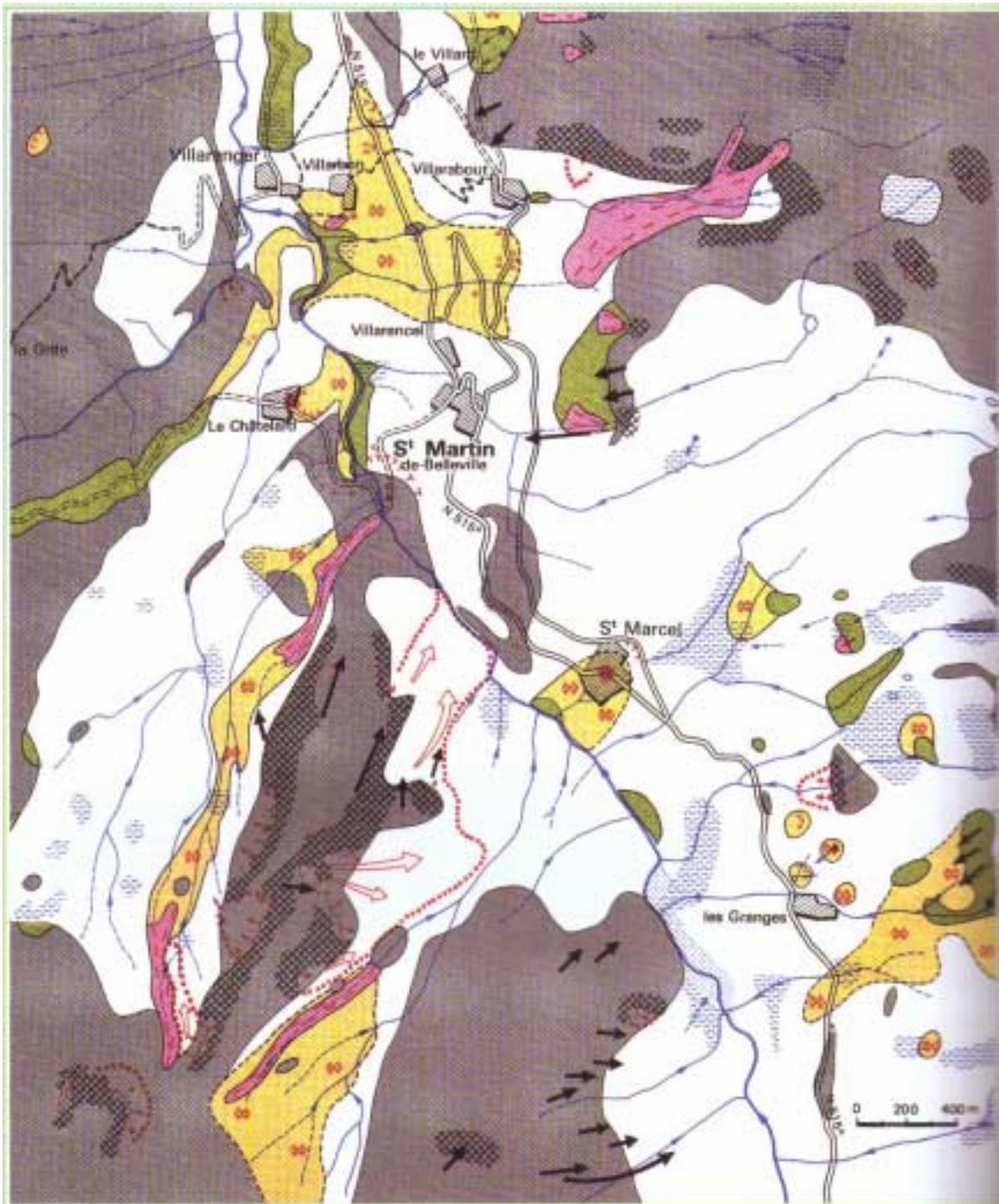
L'examen des photographies aériennes permet de restituer une image en relief grâce à la prise de vue stéréoscopique. Elles permettent :

- De comprendre des phénomènes en analysant les indices d'instabilité trouvés ;
- D'inventorier très rapidement les mouvements actifs ou récents sur de très grandes étendues, et notamment dans les zones difficiles d'accès ;
- De suivre l'évolution morphologique d'une région par la comparaison de photographies prises à des époques différentes ;
- De détecter parfois les traces de mouvements, dont les contours très flous seraient inobservables au sol.

Ces indices ainsi répertoriés et analysés, peuvent être représentés en carte graphique (figure 3.8), qui peut être nommée : carte des indices d'instabilité ou carte géomorphologique.

- Compléter les informations apportées par les documents écrits au moyen de la consultation des habitants, même si ceux-ci peuvent ne pas être objectifs dès lors qu'il s'agit de leur propre terrain.





a : extrait de carte  
(Légende – voir page suivante)



## 6.2. L'établissement de cartes analytiques

Les cartes analytiques sont des cartes intermédiaires ou de facteurs, qui concernent certains éléments jugés capitaux à la détermination de l'aléa : mouvements de terrain actifs ou fossiles, valeur de pente, lithologie sommaire, indices d'instabilité, etc.

L'évaluation du degré d'aléa dans une zone donnée, se fait en combinant ces éléments. Citons les trois cartes analytiques les plus déterminants :

- Carte de localisation des mouvements observés : On distinguera les phénomènes actifs et anciens ou les indices d'instabilité, on pourra mentionner les désordres constatés sur les routes, les bâtiments et ouvrages divers. Cette carte de localisation est en fait une carte de constat ;
- Carte de pentes : On choisira des classes de pente adoptées à la région étudiée. S'il existe un modèle numérique de terrain, la production par ordinateur de ce type de document est performante et rapide. Mais il est toujours possible de réaliser la carte des pentes à la main, à partir d'une bonne carte topographique en courbes de niveau ;
- Carte lithologique simplifiée : Elle comportera les faciès de même nature et de comportement identique, quel que soit l'étage stratigraphique. On focalisera l'attention sur quelques faciès sensibles (gypse pour les dissolutions karstiques, formation argileuse particulière pour les glissements, etc.).

## 6.3. La phase d'interprétation et de synthèse

Pour réaliser la synthèse dans la région cartographiée, l'auteur doit :

- Définir l'aléa et les niveaux d'aléa : En général, on peut différencier trois ou quatre niveaux ; vouloir subdiviser plus en détail les niveaux d'aléa est bien souvent illusoire ;
- Déterminer les différents types de phénomènes susceptibles de se produire dans la zone d'étude : Il faut surtout ne pas oublier un type d'instabilité qui peut engendrer une exposition inconsciente de personnes ou de bien à des risques. La typologie sera assez fine si possible (par exemple, on pourra souvent distinguer les parois rocheuses sources de pierres et de blocs, de celles qui sont sources d'éboulements ou encore les zones soumises à glissements superficiels des zones soumises à glissements profonds) ;
- Déterminer quels sont les facteurs prépondérants vis-à-vis des différents types de phénomènes susceptibles de le produire : Le tableau donné sur la figure 3.9 illustre le recensement des événements avec les facteurs les plus pertinents ;
- Délimiter des zones d'épandage (cas des éboulements rocheux ou des laves torrentielles) et des zones homogènes, à la fois par la présence de facteurs connus, et par leur exposition à des phénomènes donnés ;
- Définir un mode de combinaison des facteurs déterminants pour obtenir le niveau d'aléa dans chaque zone.

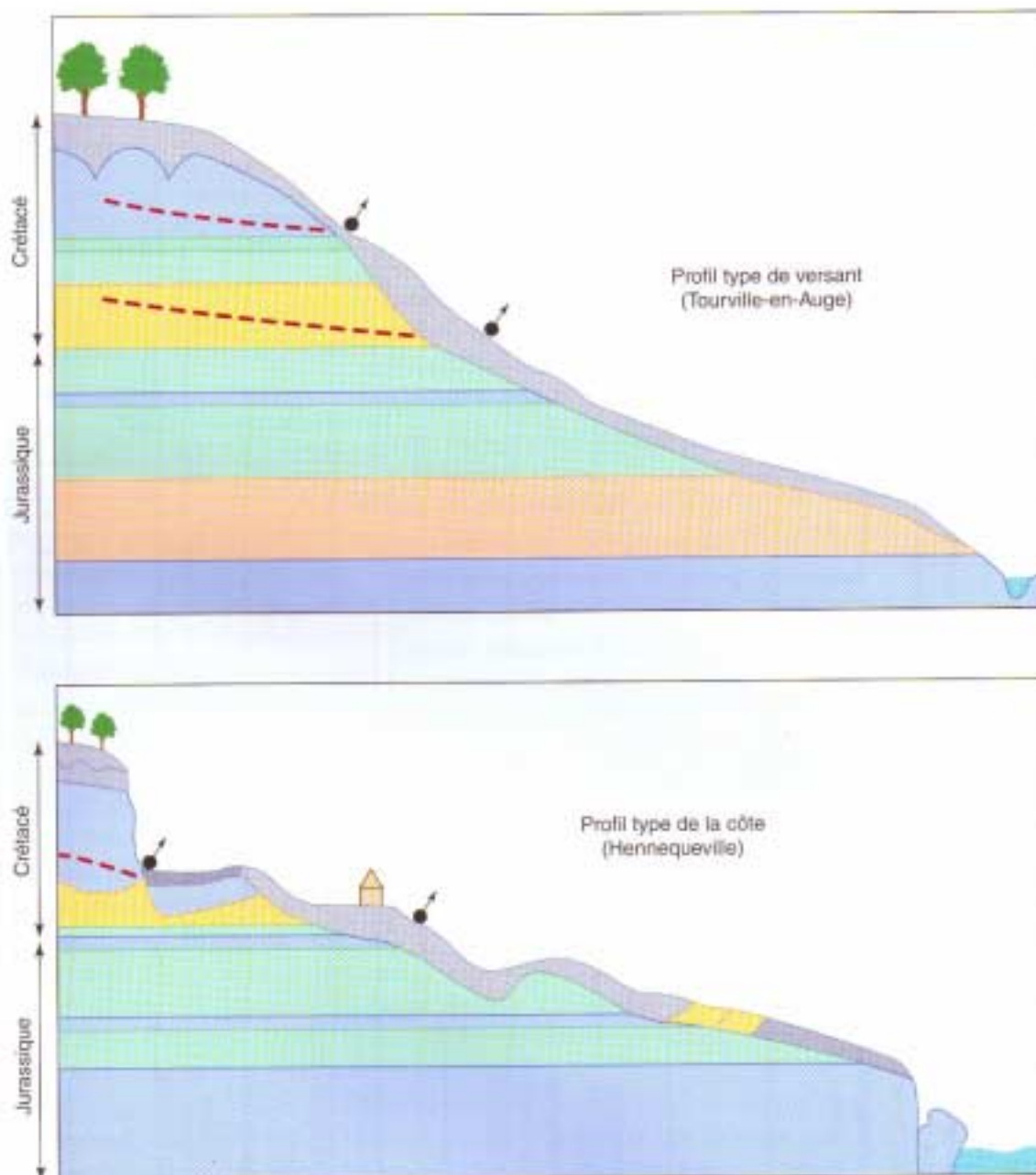
En plus de ces points, on peut ajouter quelques-uns de plus particuliers :

- L'analyse et l'évaluation de l'aléa peuvent se faire sur des profils types de versants (figure 3.10), dans des régions relativement simples du point de vue morphologique et géologique, et ceci dans le but de gagner du temps. Le zonage obtenu s'appliquera alors, sauf cas particulier, à toutes les zones possédant une configuration analogue ;
- Estimer l'aléa d'extension vers l'amont (rétrogression) des zones actuellement instables sur un versant. La probabilité d'extension diminue généralement avec l'éloignement de la zone aujourd'hui active ;
- A propos des ouvrages de stabilisation ou de protection existants, il est recommandé de faire très attention à ce sujet, et de ne tenir compte de ces ouvrages (pour diminuer

le niveau d'aléa affecté à la zone protégée) que si l'on est assuré de leur efficacité, de leur entretien et de leur pérennité.

Zone présumée stable		Symboles du zonage	Principaux facteurs d'instabilité répertoriés dans la région d'étude (morphologie, lithologie, structure, pentes, observation de terrain)
Typologie des mouvements potentiels prévisibles (zonage résultant de la comparaison et de la confrontation des facteurs d'instabilité ci-contre)			
Deformations plastiques, lentes, de faible ampleur	SI		
Glissements superficiels	GI		
Glissements en masse	Gm		
Écroulements de falaises	Ec		
Éboulements de talus	Eb		
Ravissements	R		
Ébroulements	EI		
Affaissements	AI		
Mouvements complexes	C		
			Morphologie
			Ravines, couloirs d'érosion
			Niches d'arrachement, cônes de déjection
			Zones humides, marécageuses, sources
			Dolines, entonnoirs, gouffres
			Surplombs rocheux, sous-cavages
			Falaises fracturées instables
			Paquets glissés
			Ondulations des pentes argileuses, bourrelets
			Mouvements déclarés répertoriés
			Indices d'instabilité observés
			Éboulis vifs
			Éboulis anciens consolidés
			Argiles, limons et tourbes (alluvions récentes)
			Limons, sables et cailloutis (alluvions anciennes)
			Argiles de décalcif. (dépôts superficiels)
			Moraines, dépôts varvés (glaciaire)
			Cailloutis calibrés (dépôts périglaciaires)
			Argiles, marnes
			Marnes sableuses
			Calcaires, marno-calcaires
			Schistes
			Grès, conglomérats
			Alternances marnes-calcaires
			Couches horizontales (plateau)
			Surface struct. rocheuse peu inclinée
			Avai-pendage important
			Amont-pendage
			Fracturation faible ou nulle
			Fracturation moyenne
			Fracturation importante (fract. ouvertes)
			Pente du TN de 0 à 10 %
			Pente du TN de 10 à 20 %
			Pente du TN supérieure à 20 %
			Talus imp. non revêtu (voies rout., ferr.)
			Remblais sur versant.
			Structure
			Pentes TN
			Tissus

Figure 3.9 Exemple de recherche des facteurs influents : Document préparatoire à la carte ZERMOS de Pontarlier, Jura (France) (d'après Laudry, 1980)



**Figure 3.10** Profils-types accompagnant la carte ZERMOS de Trouville - Pont l'Evêque (Calvados). En haut, versant avec glissement dans les formations de pentes argileuses ; en bas, versant plus complexe avec paquet glissé de craie à l'amont, glissement à mi-versant et ébouléments de la falaise côtière (document du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen, France, 1976) (P. ANTOINE et al. 2000)

### 6.3.1. La méthodologie de base

Plusieurs méthodes sont utilisables pour l'évaluation et le zonage de l'aléa, que nous présentons en détail dans le chapitre précédent. Dans ce paragraphe, nous allons voir leur principe d'une façon générale.

Les méthodes d'élaboration de cartes d'aléa sont très diverses dans le détail. Cependant, on peut faire des regroupements sur le fondement qu'elles reposent sur l'évaluation des différents facteurs d'instabilité des versants. Elles ont évolué dans le sens d'une recherche de l'objectivité dans l'évaluation du rôle respectif de chacun de ces

facteurs d'instabilité retenus, et ceci sans entraîner un alourdissement des moyens et des coûts de confection des cartes.

Dans la majorité des méthodes, le zonage est établi un peu empiriquement, par une évaluation de l'importance de chaque facteur jugé subjectivement défavorable, gradué de manière élémentaire, arithmétique, puis classé dans des échelles numériques. Enfin, le degré est déterminé par simple addition des coefficients ou par calcul, manuel ou par ordinateur, à l'aide d'une formule simple.

D'autres méthodes sont théoriquement simples, l'auteur de la carte, après avoir déterminé les phénomènes à considérer dans une zone donnée, estime le degré d'aléa en fonction de critères qualitatifs, en tenant compte essentiellement de son expérience sur terrain.

Pour d'autres auteurs, l'évaluation du degré d'aléa est établie par une étude statistique. L'occurrence des instabilités est mise en relation avec la présence ou non des différents facteurs, et une analyse statistique permet d'établir le degré de causalité entre chaque facteur et chaque type de phénomène.

L'estimation du degré d'aléa peut se faire aussi par calculs systématiques de stabilités. L'aléa est alors relié directement au coefficient de sécurité  $F_s$  calculé par ordinateur, sur des parcelles appartenant aux zones de glissements potentiels, à partir de paramètres mécaniques ( $c, \varphi$ ) attribués à chaque formation.

### 6.3.2. Mode de réalisation pratique

La réalisation de la synthèse cartographique est effectuée soit manuellement, soit par ordinateur dans le cadre d'un système d'informations géographiques.

Concernant la méthode manuelle, le report de l'ensemble des données (cartes de facteurs) sur un fond de plan unique implique les opérations suivantes :

- Etablissement des cartes de facteurs, de même échelle, sur fonds transparents superposables ;
- Report de ces données sur un même fond, définissant par intersection des zones homogènes ;
- Regroupement des zones ne présentant pas de différences déterminantes, de façon à améliorer la lisibilité, puis affectation d'un degré d'aléa à chaque zone.

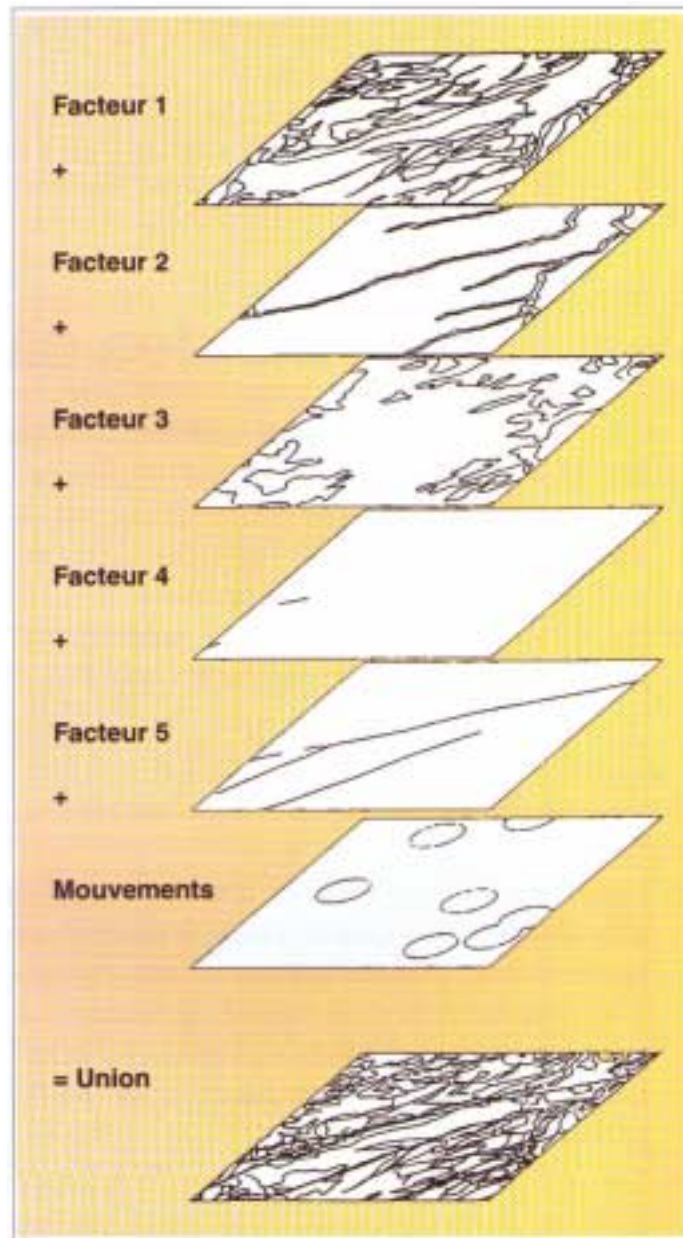
Pour la méthode informatique, on utilise les propriétés des Systèmes d'Information Géographique (SIG), à savoir leur capacité à gérer la topologie et à créer physiquement des polygones unitaires homogènes vis-à-vis de leur contenu thématique.

La combinaison sous SIG de cartes thématiques élémentaires, définies par un attribut unique (un facteur de causalité par exemple), permet d'obtenir une carte multi-thématique contenant l'ensemble des informations relatives à chaque carte élémentaire. Chaque polygone ainsi créé est défini de façon unique par une combinaison de facteurs (figure 3.11).

Deux approches peuvent être utilisées suivant le type de SIG :

- Soit par pixels (mode raster ou maillé) : Les objets spatiaux sont décrits par des entités surfaciques élémentaires nommées pixels, de forme généralement carrée (parfois triangulaire ou hexagonale) dont la somme forme un réseau de mailles. Une image raster est constituée par balayage, lignes après lignes ;
- Soit par contours de zones (mode vecteur) : La géométrie de l'image cartographique est décrite par des points reliés, qui composent le contour de chaque objet (ponctuel, linéaire ou zonale). Les liaisons sont souvent des segments de droites.

Remarquons que chaque couche thématique est élaborée à une échelle donnée : il faut donc s'assurer que tous les niveaux thématiques (facteurs permettant par combinaison l'estimation de l'aléa, par exemple) sont cohérents les uns avec les autres ; même échelle, même système de projection géographique.



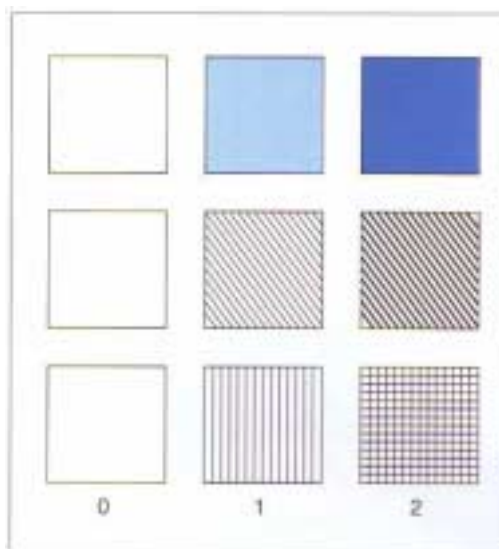
**Figure 3.11** Schéma illustrant la combinaison des facteurs (superposition de couches d'informations) dans un système d'information géographique (d'après LEROI, 1996)

#### 6.4. Le rendu : les documents finaux

Considérant la cartographie comme un moyen d'expression de l'information, une carte d'aléa doit être un outil de communication dont la lisibilité et le caractère pédagogique sont essentiels, en particulier dans le cas des documents consultables par le public.

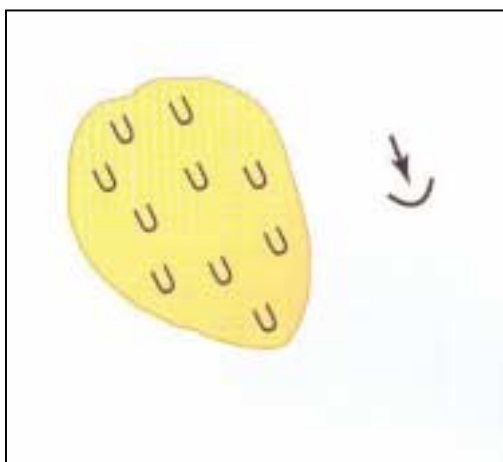
Dans la carte d'aléa, il est recommandé de porter deux types d'informations dans chaque zone, de façon suivante :

- Le degré d'aléa est traduit par des valeurs croissantes de la même couleur, avec éventuellement en surimpression le chiffre du degré d'aléa (0, 1, 2 ou 3 par exemple) ; en noir et blanc, on utilisera des gris de plus en plus foncés ou des hachures de plus en plus épaisses ou serrées, etc. (figure 3.12) ; le triplet vert, orange, rouge peut aussi être utilisé, compte tenu de sa signification bien connue ;



**Figure 3.12** Exemple de représentation de trois degrés d'aléa (couleur, noir et blanc)  
(P. ANTOINE et al. 2000)

- La nature des phénomènes, exprimée soit par des lettres (G pour les glissements, P pour les chutes de pierres, B pour les chutes de blocs et de gros blocs, etc.), soit par des poncifs (U pour les glissements, V pour les chutes de blocs, etc.). Il est préférable d'orienter ces derniers dans le sens de la pente et donc du mouvement. Deux cas sont à prévoir (figure 3.13)



**Figure 3.13** Deux modes de représentation des glissements, suivant leur dimension à l'échelle de la carte (P. Antoine et al. 2000)

- Ou bien les phénomènes sont de taille cartographiable (représentation du contour, avec remplissage) ou bien ils sont trop petits à l'échelle (représentation par symbole). Il peut être utile de distinguer les mouvements actifs, par exemple par des figurés plus épais ou de taille plus grande.

On peut aussi faire figurer sur la carte d'aléa quelques éléments significatifs, de nature géologique ou hydrogéologique par exemple, dans la mesure où cela est pertinent et pédagogique, et où cela ne surcharge pas la carte, mais il est souvent préférable d'avoir recours à une carte spécifique.

L'utilisation des couleurs rend les cartes plus lisibles, mais la reproduction est plus coûteuse. Ainsi, l'éventualité d'avoir à photographier une carte conduit à des choix de représentations graphiques conservant une bonne lisibilité après reproduction.



La qualité des dessins à l'ordinateur est un élément apprécié des utilisateurs. Les outils de types SIG permettent de superposer l'information « aléa » avec d'autres données telles que les biens exposés pour aboutir à des documents d'aide à la décision d'aménagement. Leur utilisation permet également une meilleure conservation des données de base et faciliter la mise à jour des cartes.

La légende de la carte comprend au minimum :

- Un titre ;
- Les phénomènes considérés ;
- L'échelle ;
- La signification des couleurs et des symboles ;
- Le nom du ou des auteur (s) ou tout au moins de leur organisme ;
- Le nom du maître d'ouvrage et la date des levés ;
- Si nécessaire, la méthode utilisée ou de l'interprétation donnée au zonage, sous forme d'un avertissement de quelques lignes, par exemple : Le zonage d'aléa ne tient pas compte des constructions et aménagements existantes.

Enfin, il y a des documents d'accompagnement à la carte d'aléa :

- La notice explicative : Elle est sous forme d'un livret indépendant, tout en faisant partie intégrante de la carte. Elle a un langage clair (éviter d'utiliser des termes trop techniques) pour qu'elle reste accessible à des utilisateurs très divers, souvent non-spécialistes ;
- Les cartes analytiques : Celles les plus pertinentes dans la détermination de l'aléa. Elles seront présentées, en général à plus petite échelle que la carte d'aléa ;
- Le dossier cartographique original : C'est l'ensemble des documents manuscrits, en particulier levés originaux de terrain, qui doivent être conservés, du fait que l'on peut en avoir besoin, par exemple à l'occasion d'une mise à jour ou en cas de contestation.

## 7. LA FIABILITE DES CARTES D'ALEA

Concernant la fiabilité des cartes d'aléa, celles-ci peuvent révéler principalement deux types d'insuffisance :

- L'excès d'optimisme qui conduit à classer en zone d'aléa faible ou nul une zone en réalité plus « active ». Le signe révélateur de l'erreur de jugement dans ce cas est qu'un événement se produira dans une telle zone ;
- L'excès de pessimisme qui fait surclasser l'aléa d'une zone en réalité peu menacée par des instabilités. Dans ce cas le zonage inadéquat est plus difficile à mettre en évidence, puisque seule l'absence d'événements pendant trente, cinquante ou cent ans peut confirmer la stabilité satisfaisante du site.

En général, la satisfaisance de la fiabilité sera, tout d'abord, une cartographie de bonne qualité. Pour cela :

- Les levés sont effectués et traduits sous forme cartographique, par un expert. La qualité de sa formation et son expérience sont, en conséquence, fondamentales ;
- Les observations des phénomènes naturels actuels ou récents doivent être quasi-permanentes pour appréhender les évolutions de certains phénomènes. Elles sont correctement effectuées que s'il existe sur terrain des structures permettant de les signaler et de les consigner. On peut signaler qu'en France ces structures, sont les organismes techniques tels que le BRGM (Bureau de Recherche Géologiques et Minières) ou les Laboratoires des Ponts et Chaussées ;
- La recherche d'informations permettant le recensement des phénomènes au-delà de la mémoire de la population actuelle pour pouvoir affiner la connaissance de l'aléa ;
- L'échelle et le fond cartographique doivent être de qualité, surtout lorsque la carte d'aléa est ensuite intégrée dans une carte de type réglementaire.

Seulement les points les plus délicats résident dans :

- L'appréciation, fût-elle sommaire, du délai avant rupture, autrement dit du niveau de probabilité d'occurrence, qui module le degré d'aléa attribué ;
- La délimitation des zones d'épandage des éboulements rocheux ou des laves torrentielles, même si les points de départ sont correctement identifiés ;
- La délimitation de zones d'aléa lié à un substratum de nature donnée, lorsqu'une couverture meuble, d'éboulis par exemple, masque la limite géologique sous-jacente.

Ainsi la fiabilité des cartes d'aléa peut être déterminée postérieurement par une analyse de ces cartographies. Comme par exemple, celle réalisée en Nouvelle-Zélande par GEE (1992), sur une cartographie effectuée par superposition de cartes de facteurs pondérés selon le jugement du spécialiste. Le contrôle a été effectué en utilisant plus de trois cents glissements (en général petits glissements superficiels) provoqués par une tempête pluvieuse exceptionnelle survenue peu de temps après la réalisation de la carte. Pour évaluer la fiabilité de cette dernière, l'auteur a utilisé les indices DR(i) définis pour chacune des cinq classes d'aléa de la carte :

$$DR(i) = \frac{\% \text{ glissements classés en I par rapport à l'ensemble des glissements}}{\% \text{ en superficie de la classe I par rapport au total de la région traitée}}$$

(la valeur DR=1 correspond donc à une classe pour laquelle la densité de glissements est la moyenne de celle de la région tout entière).

Les résultats suivants ont été obtenus :

Classe d'aléa	très élevé	élevé	modéré	faible	très faible
DR	1.89	1.28	0.76	0.49	0

Ce qui confirme la gradation d'aléa effectuée par l'auteur.

On peut envisager ainsi de réaliser des études spécifiques (utilisant des moyens d'investigation par sondages ou par géophysique, des calculs de stabilité) pour réduire les incertitudes du zonage, en particulier dans les cartographies à grande échelle, mais elles ne sont en général pas compatibles avec les financements et les détails imposés à la cartographie.

En revanche, une carte réglementaire peut imposer au constructeur (des particuliers, des groupements des particuliers ou de collectivités locales) dans les secteurs de stabilité douteuse, la réalisation d'études destinée à préciser les niveaux d'aléa et les limites de zones.

Enfin, une révision périodique des cartes d'aléa est nécessaire, par exemple tous les dix ou quinze ans, car des évolutions naturelles ou causées par l'homme peuvent conduire à des modifications de l'aléa : érosions importantes lors d'une crue, incendie de forêt, déboisement ou reboisement, etc.

## 8. CONCLUSION

La cartographie de l'aléa des mouvements de pente est devenue un outil indispensable et simple de prévention contre les risques naturels. Elle est considérée comme la première étape dans cette démarche.

Généralement, elle se fera suivant trois étapes principales :

- Un inventaire des phénomènes passés ou visibles concernant le secteur d'étude ;
- Une prospective pour établir une carte des aléas ;
- Une réflexion d'aménagement, produisant un zonage sur fond cadastral et un règlement associé.

Seulement, une bonne carte repose sur la prise en compte d'éléments simples tels que la sélection de l'information, la lisibilité, la présentation, et s'appuie sur des systèmes de représentation logiques (sémiologie graphique), cohérents avec l'information émise, qui doivent être adoptés aux objectifs fixés.

## CHAPITRE 4

# CARTOGRAPHIE DE L'ALEA NATUREL DES ZONES A URBANISER SITUEES A HAMMAM BOU HANIFIA (Wilaya de Mascara)

---

### 1. INTRODUCTION

La délimitation des zones exposées à des risques naturels liés aux mouvements de pente est une préoccupation de plus en plus importante pour les responsables administratifs locaux et les aménageurs. Des approches cartographiques des secteurs à risques ont été déjà réalisés et nous avons appliqué quelques méthodologies aux secteurs à urbaniser dans la ville de Hammam Bou Hanifia (wilaya de Mascara), dont l'expansion est comprise par l'instabilité des terrains.

Dans notre pays, le domaine de la cartographie d'aléa naturel propre aux mouvements de terrain est tout à fait nouveau. Nous avons essayé dans ce qui suit, d'établir des cartes d'aléa naturel des mouvements de pente, pour trois parcelles appartenant à la localité de Hammam Bou Hanifia, et ceci en suivant deux méthodes. Ces méthodes (méthode utilisée par A. FARES et la méthode utilisée par GUPTA et ANBALAGAN) citées au chapitre précédent ont été déjà utilisées, et nous essayons de les adapter à nos cas. Enfin, l'approche directe du coefficient de sécurité a été utilisée aussi pour obtenir ce type de cartes pour nos parcelles.

### 2. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE – TOPOGRAPHIQUE

#### 2.1. Localisation géographique

Les zones d'études font partie de la localité de Hammam Bou Hanifia, chef lieu de la commune du même nom.

La ville de Hammam Bou Hanifia, partie intégrante de la wilaya de Mascara, est située à l'ouest de la ville de Mascara, à une vingtaines de kilomètres, sur le chemin de wilaya n°1 (figure 4.1). Elle est en plein dans les monts des Béni Chougrane. Malheureusement, sa situation est en retrait par rapport aux principaux axes de développement.

Les trois parcelles à étudier sont distinctes, une située sur la rive gauche de l'oued, pas très loin du centre ville, et est dénommée parcelle 1. La deuxième zone est située à l'entrée de la ville en arrivant de Sidi Bel Abbés, de part et d'autre de l'oued. La troisième est située dans la sortie Nord de la ville, sur l'axe principal, mitoyenne du palais de justice et d'un établissement scolaire.



Figure 4.1 Situation géographique de Hammam Bou Hanifia (M.A. ALLAL, 2003)

## 2.2. Données topographiques

La ville de Hammam Bou Hanifia est caractérisée par un relief très accidenté. Certains versants, à l'entrée nord de la localité, présentent des terrains avec des pentes égales et/ou légèrement supérieures à 20%.

Ainsi, et en ce qui concerne les parcelles à étudier, la parcelle 1 et une grande partie de la parcelle 2 sont très accidentées (Figure 4.2 et 4.3), contrairement à la parcelle 3 qui n'est que légèrement accidentée (Figure 4.4). Par conséquent, et en vue d'urbaniser ces parcelles, une évaluation de l'aléa de mouvements de terrain s'impose.

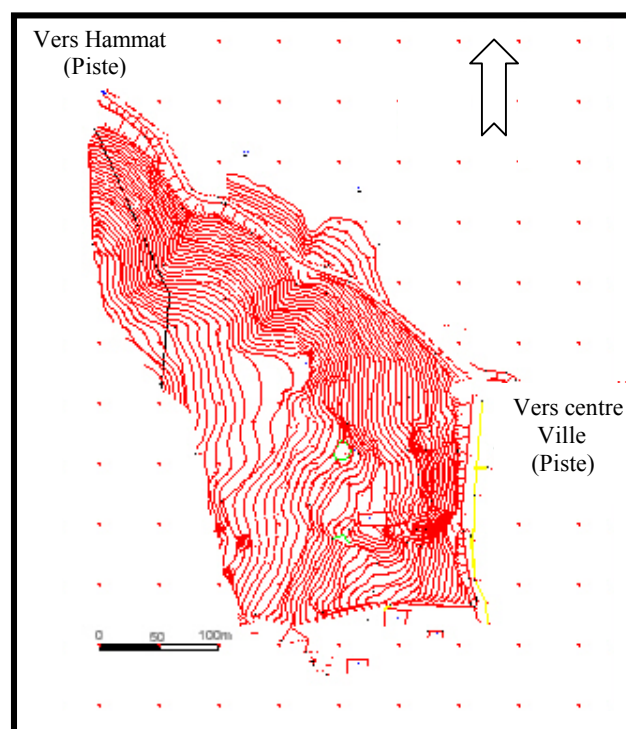


Figure 4.2 Carte topographique de la parcelle 1 (M.A. ALLAL, 2003)

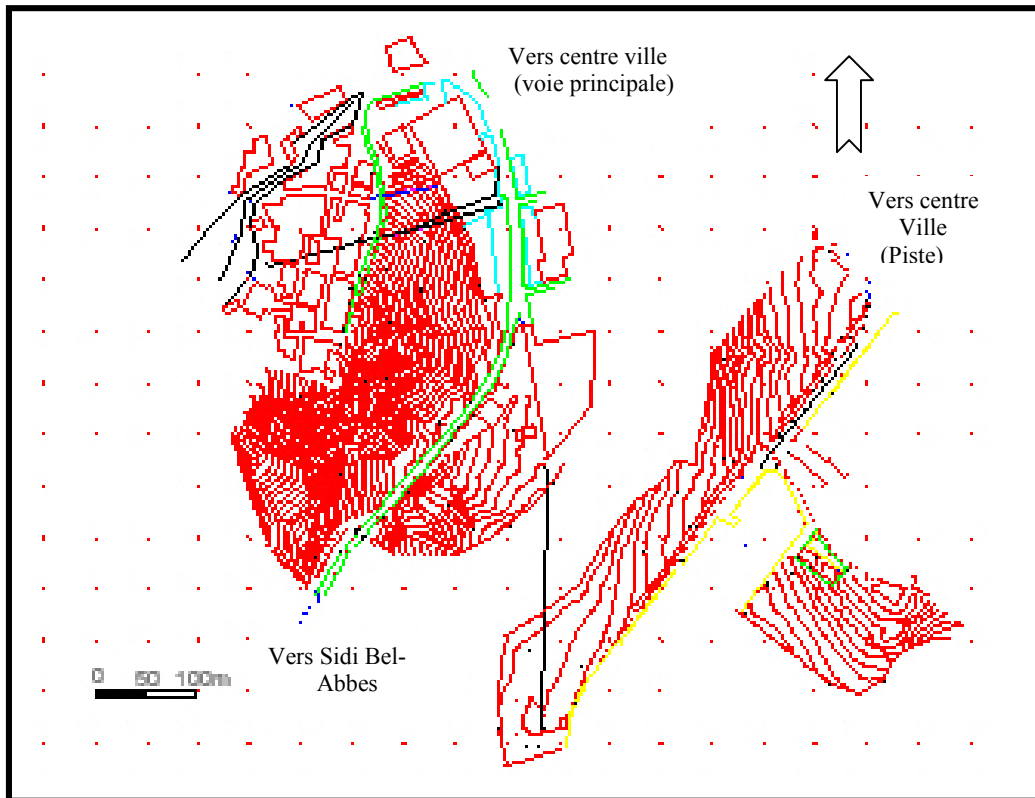


Figure 4.3 Carte topographique de la parcelle 2 (M.A. ALLAL, 2003)

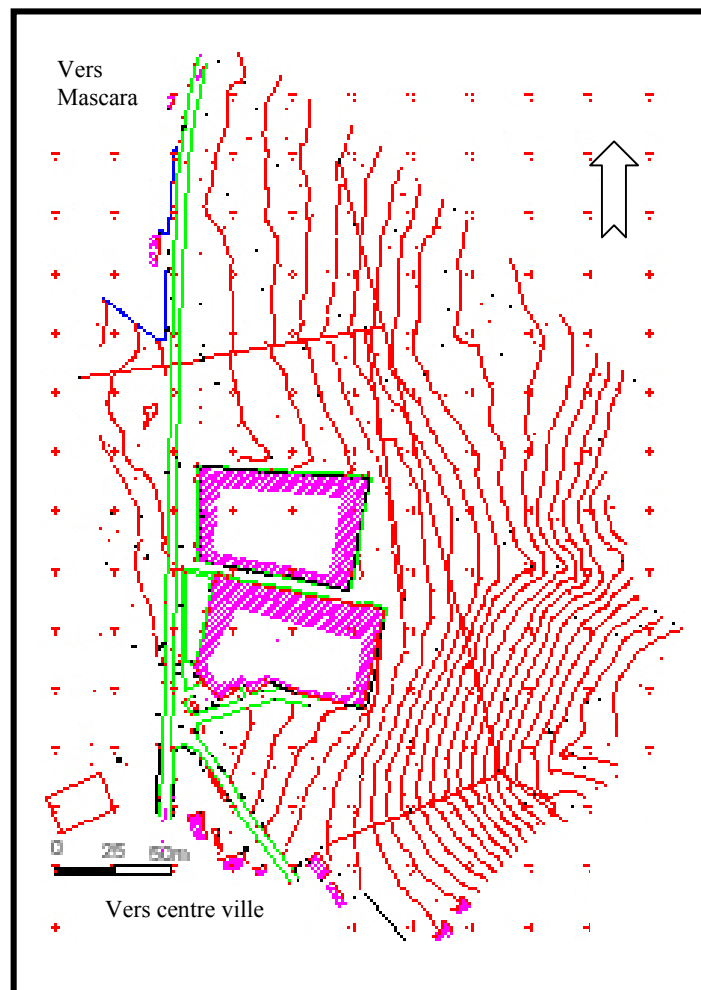


Figure 4.4 Carte topographique de la parcelle 3 (M.A. ALLAL, 2003)

### 3. GEOLOGIE GENERALE DU SITE

Le secteur étudié appartient au bassin du bas Chéelif, et plus précisément aux monts des Béni Chougrane. Cette chaîne, armée de terrains post-nappes, synchro-nappes et allochtones, est caractérisée par des reliefs assez accentués.

#### 3.1. L'allochtone ou substratum

Le substratum anté-Néogène comprend principalement des terrains crétacés (secondaire), associés au complexe triasique (secondaire). Au niveau du secteur étudié, il est constitué généralement de faciès marneux avec intercalations gréseuses.

- *Trias* : Il est composé essentiellement de marnes bariolées rouges ou violacées ; on y rencontre aussi des calcaires dolomitiques généralement très durs à patine gris clair avec d'importantes formations bréchiques.
- *Le Crétacé inférieur* : La base est constituée par une brèche d'éléments empruntés du Trias sous jacent, surmontée par une série de marnes grises alternant avec des calcaires, ces marnes deviennent ensuite bleuâtres avec intercalation de bancs de grès rougeâtres.
- *Le Crétacé supérieur* : Il débute par des marnes à intercalations de bancs calcaires marneux ou noduleux et de lits de silex noirs et craquelés. Le Crétacé supérieur se poursuit avec le même faciès marneux qui devient gris foncé avec des bancs de calcaires de teinte sombre.

#### 3.2. 1er cycle Miocène inférieur post-nappes (tertiaire)

Il est représenté lorsqu'il existe par des dépôts continentaux reposant sur l'allochtone crétacé. Ce sont des alternances de grès et de conglomérats, et de marnes parfois gypseuses de teintes vertes à ocre. Les affleurements du 1er cycle sont réduits et les seuls secteurs où il apparaît, sont le sommet du djebel Bouziri et au voisinage du village de Hacine sur la vallée de l'oued El Hammam.

#### 3.3. 2ème cycle Miocène supérieur post-nappes (tertiaire)

Le 2ème cycle Miocène post-nappes est discordant et est constitué à la base par une formation détritique de teinte ocre ou rousse. La série peut atteindre 300 mètres d'épaisseur, elle passe latéralement ou verticalement à un deuxième ensemble les marnes bleues. Cette formation peut parfois reposer directement sur l'allochtone.

#### 3.4. Pliocène (tertiaire)

Il correspond au 3ème cycle post-nappes. Il est représenté par une succession de formation à dominante marneuse, débutant souvent par des niveaux détritiques (conglomérat, grès ou sables argileux) et des grès calcaires Astiens jaunes très fossilifères.

#### 3.5. Pléistocène (quaternaire)

Le Pléistocène inférieur correspond à une formation détritique grès coquilliers complété par des sables rouges briques à Hélix.

Le Pléistocène moyen est représenté par des sédiments fluviatiles à conglomérats polygéniques grossiers parfois de matériel limoneux rubéfié et encroûté.

Le Pléistocène supérieur est constitué de terrasses et de glacis d'accumulation.

## 4. GEOLOGIE DES DIFFERENTS SECTEURS ETUDIES DE LA LOCALITE DE HAMMAM BOU HANIFIA

### 4.1. Parcelle 1

Dans cette zone en contact par faille contre un substratum oligocène, on observe une épaisse série de marnes bleues du miocène inférieur, sur laquelle des dépôts de travertins forment localement des rochers (Figure 4.5).

C'est à la faveur de la faille qui se situe dans l'axe de l'oued que se sont installées les différents sources thermales de Hammam Bou Hanifia, très convoitées par les curistes et les habitants de l'ouest algérien en particulier.



**Figure 4.5** Marnes bleues et travertin / miocène inférieur [parcelle 1] (M.A. ALLAL, 2003)

### 4.2. Parcelle 2

Elle peut être divisée, géologiquement, en deux parties :

- La première est située sur la rive gauche de l'oued El Hammam, et est occupée par des formations du miocène inférieur. En effet, on observe une série de marnes bleues, entrecoupées de bancs gréseux plus ou moins bréchiques. On trouve à la base de ces marnes des conglomérats assez cohérents formés d'éléments du substratum (Figure 4.6).
- La deuxième partie, située sur la rive droite, change d'aspect et de nature géologique. En effet, on trouve un ensemble hétérogène de conglomérats, de grès, de sable et de limons rouges ou bruns du miocène supérieur. On constate une évolution générale des formations détritiques aux termes plus fins en montant dans la série (Figure 4.7).





**Figure 4.6** Marnes bleues entrecoupées de bancs gréseux / miocène inférieur [rive gauche / parcelle2] (M.A. ALLAL, 2003)



**Figure 4.7** Sable et limons rouges / miocène supérieur [vue d'en haut / rive droite / parcelle 2] (M.A. ALLAL, 2003)

### 4.3. Parcelle 3

Elle se situe du côté droit de l'oued, à la sortie nord de la ville, en allant vers Mascara. Concernant sa géologie, on trouve un ensemble hétérogène, de grès, de sable et de limons beiges ou brun, qui sont des alluvions récentes (Figure 4.8), surmontés par une couche de terre végétale. Ces sols renferment aussi de faibles quantités de marnes.



**Figure 4.8** Grés, sable et limons beiges ou brun [parcelle 3] (M.A. ALLAL, 2003)

## 5. HYDROGEOLOGIE

L'intérêt de la connaissance du cadre hydrogéologique s'impose pour l'étude du plan d'occupation des sols de la zone considérée, même si les niveaux des nappes aquifères, et autres sources et poches d'eau, peuvent être très variables, tant du fait de leur épuisement systématique, que du cycle climatique saisonnier.

Sur le plan hydrogéologique, c'est ses eaux thermo-minérales qui représentent la richesse économique et sociale de la localité de Hammam Bou Hanifia. Toutefois, ces eaux ne peuvent être utilisées directement pour l'alimentation en eau potable.

La région de Bou Hanifia, occupée essentiellement de marnes d'épaisseurs importantes, ne présente pas de bonnes potentialités hydriques souterraines peu profondes. L'action des eaux de pluies dans la zone en question est surtout érosive, aidé par le relief accidenté et un sol dénudé. Néanmoins, au niveau de la deuxième partie de la parcelle 2, les formations détritiques peuvent être aquifères. La présence de quelques puits aux alentours témoigne de la présence d'eau dans ces formations même si elle n'est pas importante.

Pour ce qui est des eaux superficielles, l'oued El Hammam draine des quantités appréciables d'eau qui proviennent du barrage de Bou Hanifia. Au passage au niveau de la ville de Bou Hanifia, ces eaux sont souillées par les eaux usées qui s'y déversent. Aussi, la présence de l'oued doit être prise en considération dans le cas de toute aménagement au niveau de la parcelle 2 dont une bonne partie se situe dans le lit majeur du cours d'eau.

## 6. GEOTECHNIQUE DES DIFFERENTS SECTEURS A ETUDIER

### 6.1. Description géotechnique des terrains

L'ensemble des résultats géotechniques qui sont en notre possession sont obtenus à partir d'une étude géotechnique effectuée par l'entreprise privée EURL E.E.T.I.

L'ensemble des reconnaissances visuelles et tactiles et les sondages carottés montrent que les sols rencontrés en surface sont assez homogènes et d'une grande épaisseur.

L'analyse des sols a été faite sur des échantillons remaniés pour l'identification, et non remaniés pour les essais mécaniques.

Pour la parcelle 1 et la partie gauche de la parcelle 2, elle sont constituées en grande majorité d'argiles marneuses ( $\% \text{CaCO}_3 < 30$ ). Dans la partie droite, on note la présence de conglomérats (Figure 4.9 et 4.10). Ces sols appartiennent à la famille des sables limoneux. Concernant la parcelle 3, elle est constituée en majorité par des sables limoneux (Figure 4.11).

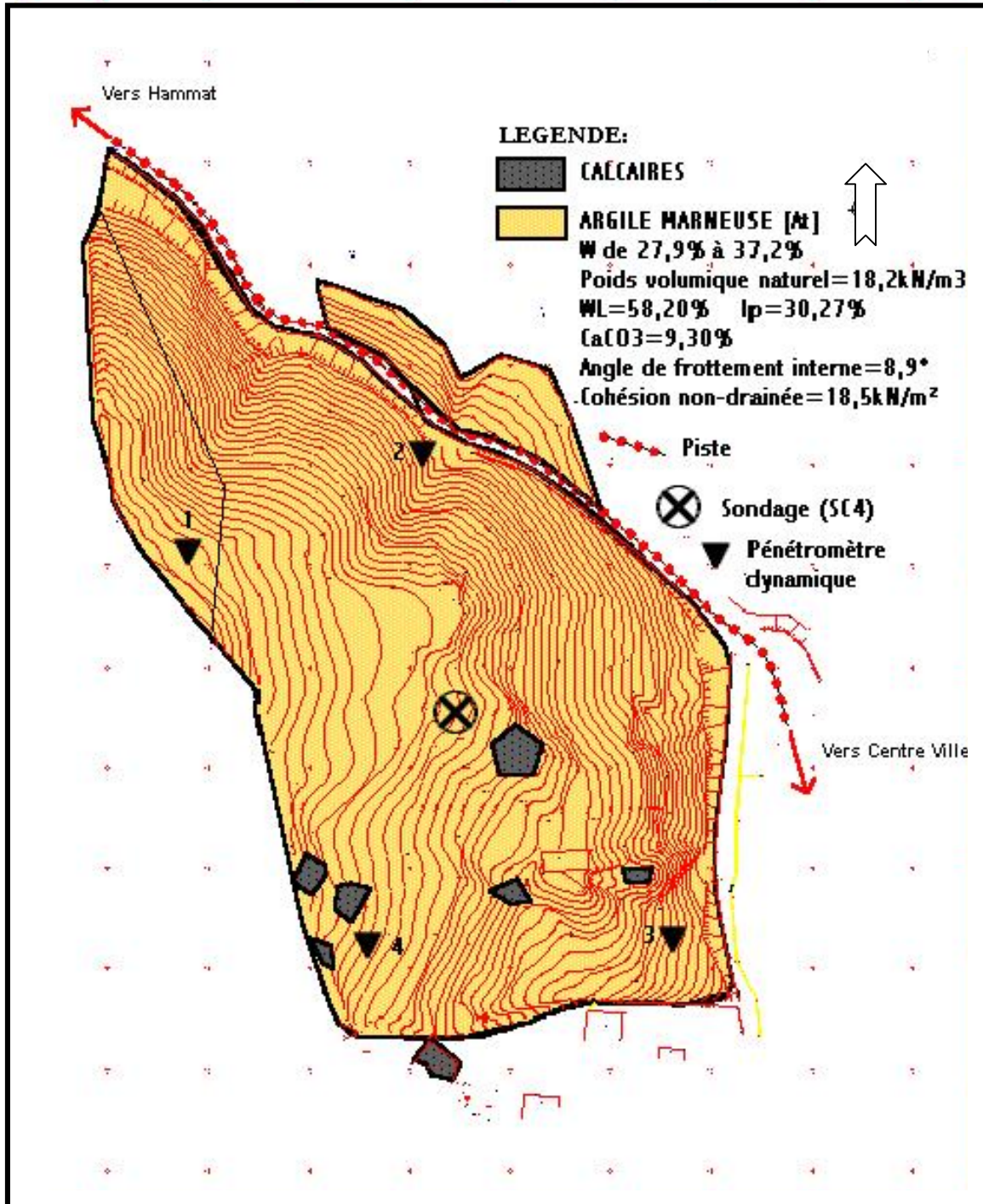


Figure 4.9 Carte géotechnique de la parcelle 1 (M.A. ALLAL, 2003)

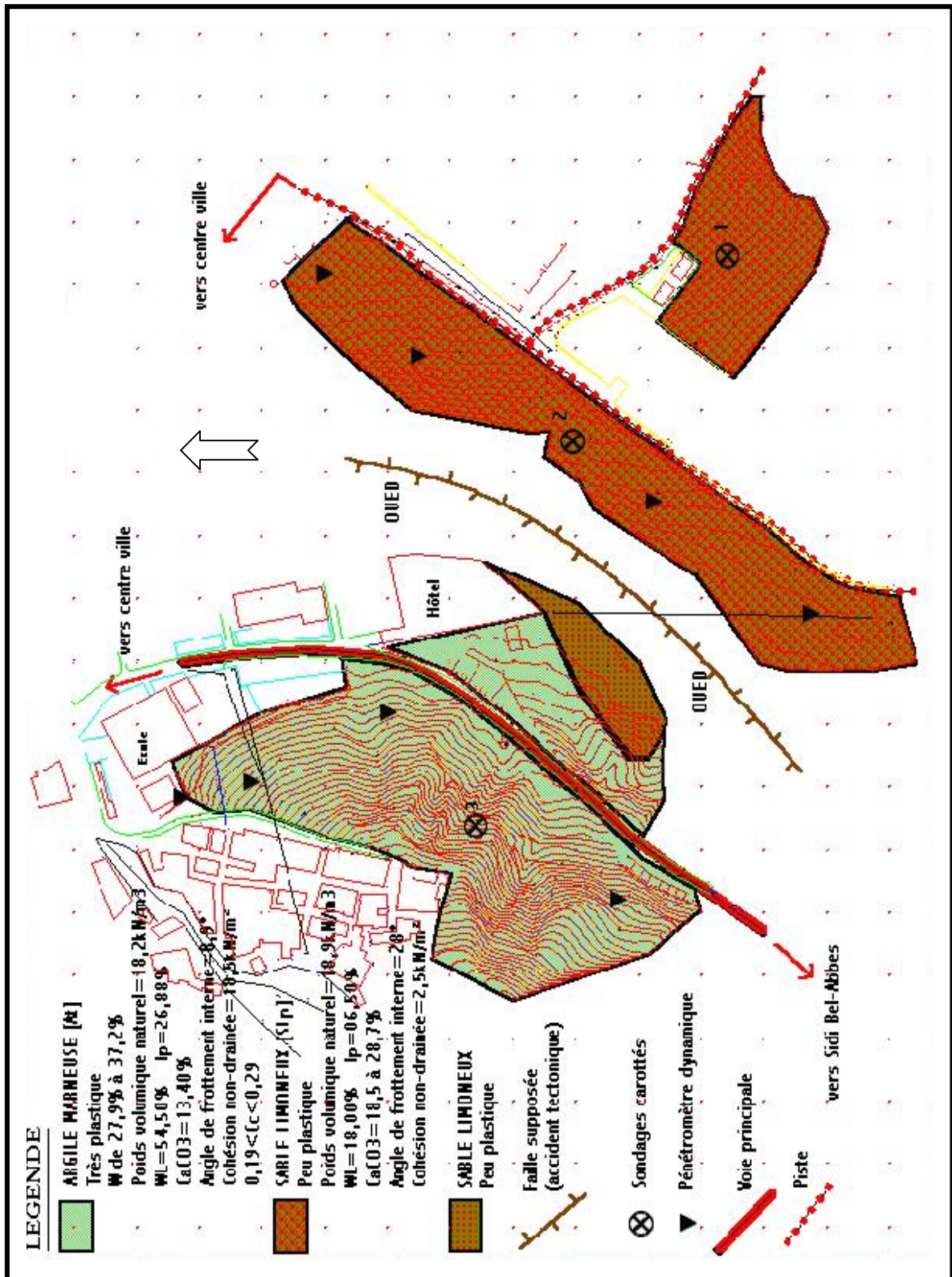


Figure 4.10 Carte géotechnique de la parcelle 2 (M.A. ALLAL, 2003)



Figure 4.11 Carte géotechnique de la parcelle 3 (M.A. ALLAL, 2003)

**6.2. Caractéristiques des sols rencontrés**

L'ensembles des résultats recensés sont représentés par le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Caractéristiques géotechniques des sols des parcelles étudiées (M.A. ALLAL, 2003)

	Parcelle 1		Parcelle 2		Parcelle 3	
Sondage Carottés	SC4	SC1	SC2	SC3	SC5	SC6
Nature des sols	Argile marneuse	Sable, grès et limons	Sable, grès et limons	Argile marneuse	Limons calcaires	Sable, grès et limons
Classification (USCS/LPC)	At	SLp	SLp	At	SLp	SLp
$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	27.30	26.42	26.15	27.29	26.30	26.25
$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	-	-	-	14.10	18.32	16.68
$\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	18.20	-	18.90	18.22	21.03	19.90
$W_L$ (%)	58.20	18.00	17.70	54.50	22.00	22.90
$W_P$ (%)	29.70	11.59	11.06	27.62	13.90	14.10
$I_P$ (%)	29.50	6.41	6.64	26.88	8.10	8.80
CaCO <sub>3</sub> (%)	9.30	18.50	28.70	13.40	81.50	46.30
$\Phi_u$ (°)	8.9	-	28	8.9	52.57	48.10
$C_u$ (KN/m <sup>2</sup> )	18.50	-	2.50	18.50	1.8	1.5

## 7. REALISATION DES CARTES D'ALEA DES MOUVEMENTS DE PENTE

### 7.1. Méthode utilisée par FARES

C'est une méthode indirecte, de pondération des facteurs qui sont à l'origine du déclenchement d'un mouvement de pentes. Elle se base sur l'identification et la conjonction, par une combinaison simple, de facteurs permanents qui forment le cadre propice créant les conditions indispensables aux mouvements de terrain. Tandis que les autres, dits facteurs dynamiques, agissent sous la dépendance des premiers et jouent le rôle de détonateur. Ils sont déclassés dans cette méthode à cause du caractère aléatoire de leur action et des moyens mis en œuvre pour les déterminer.

Cette considération nous permettra de délimiter les secteurs qui présentent les conditions fixes, favorables à ce type de phénomènes. Les facteurs de base retenus pour établir la carte d'aléa naturel sont :

- La topographie : Raideur des pentes ;
- La géologie : Nature du matériau ;
- La géomorphologie : Indices d'instabilités.

#### 7.1.1. Méthodologie

La méthodologie suivie consiste, dans un premier temps, à cartographier séparément les facteurs liés à la topographie, à la géologie et à la géomorphologie pour obtenir les cartes de facteurs d'aléa ou cartes de base (Figure 4.12).

Ensuite pour chaque facteur, nous avons attribué un indice ( $I_F$ ) dans une échelle numérique en rapport avec son importance relative dans la genèse des instabilités. Cette simulation nous permet de traduire les cartes de facteurs en cartes numériques appelées cartes de simulation d'aléa. Le mode de cartographie numérique facilite l'analyse et la synthèse de l'aléa en tout point de l'espace étudié.

Après et en combinant ces cartes de simulation, nous obtenons la carte de l'interprétation de l'aléa qui délimite des secteurs où figure le niveau d'aléa assigné à chaque facteur selon des triplets ( $I_F, I_G, I_I$ ).

Finalement, l'évaluation de l'aléa résultant de l'action conjointe des facteurs a été effectuée suivant deux méthodes : la méthode arithmétique et la méthode probabiliste, aboutissant à deux cartes d'aléa synthétiques.

#### 7.1.2. Les cartes de facteurs

##### 7.1.2.1. La pente

Nous avons établi une carte des pentes à partir de la carte topographique. Elle n'est pas directement utilisée comme facteur déterminant dans une cartographie prévisionnelle, à cause de la diversité des faciès. Alors, nous avons lié la pente au faciès en calculant le coefficient de sécurité ( $F_s$ ) avec le logiciel FLAC pour chaque pente appartenant à chaque parcelle (Equation 4.1).

C'est un calcul numérique bidimensionnel de la mécanique utilisant la méthode explicite des différences finies.

Pour caractériser le comportement du sol, on a employé le modèle de Mohr-Coulomb (associé au critère de rupture), qui repose sur l'hypothèse d'une rupture par plasticité.

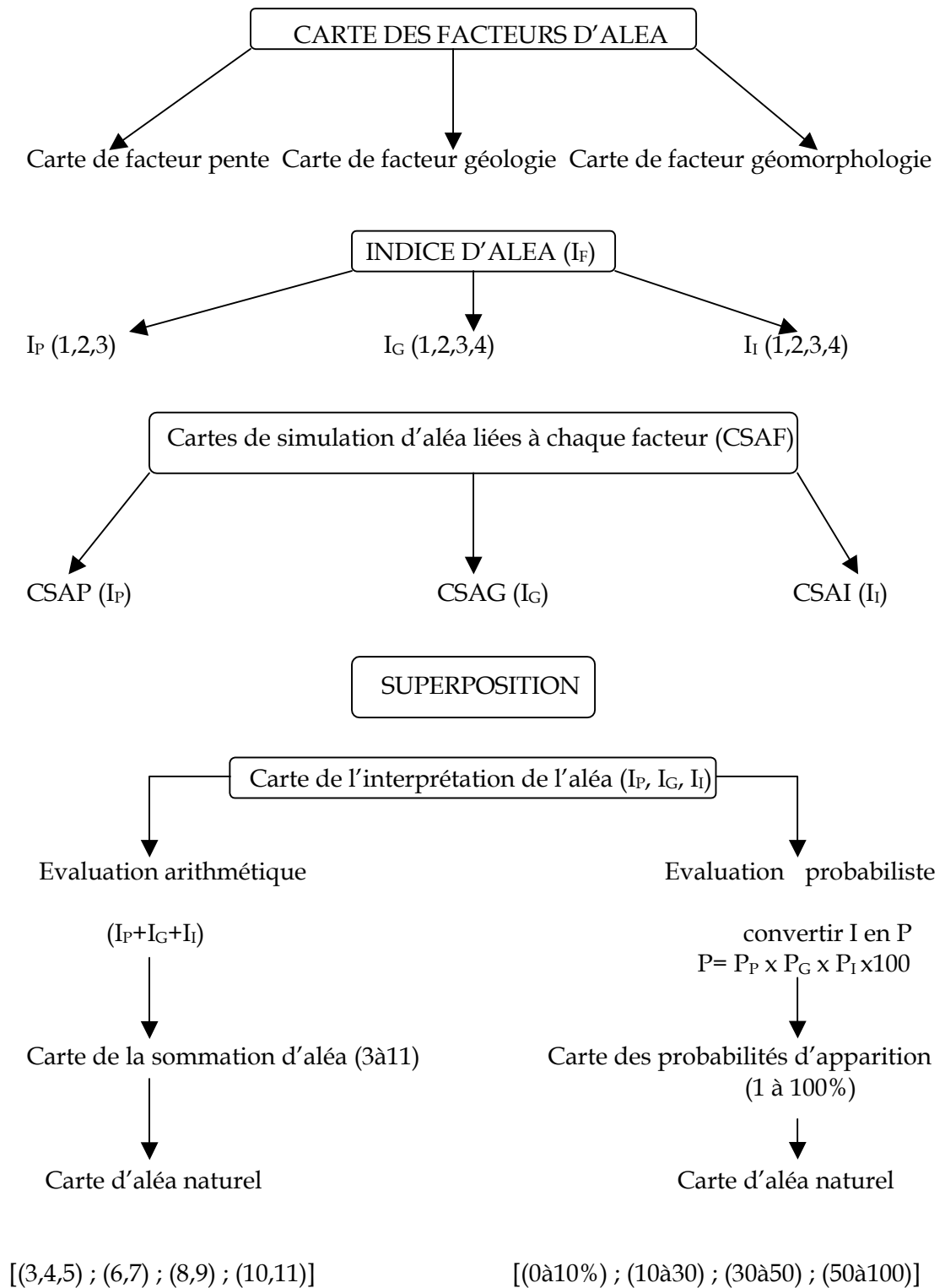


Figure 4.12 Méthodologie suivie pour l'établissement de la carte d'aléa naturel

Pour notre problème, nous réduisons la résistance au cisaillement du matériau jusqu'à ce que la rupture de la pente se produise. L'angle de frottement et la cohésion sont réduits simultanément par un coefficient constant, et des exécutions sont faites avec chaque nouvelle paire de paramètres de résistance. A un certain point, l'angle de frottement et la cohésion deviendront trop petits pour maintenir la pente en équilibre, et un mouvement d'instabilité pourrait se produire. C'est la définition de rupture dans FLAC et le coefficient de sécurité peut alors s'exprimer par :

$$F_s = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} \quad (4.1)$$

avec  $c$ ,  $c_r$  : respectivement cohésion du matériau réelle et à la rupture ;

$\Phi$ ,  $\Phi_r$  : respectivement angle de frottement du matériau réel et à la rupture.

On obtient donc une carte d'iso valeurs de  $F_s$  (Figure 4.13, 4.14 et 4.15) ; elle donne 3 classes de coefficient :

- $F_s \leq 1$  ;
- $1 < F_s < 1.5$  ;
- $F_s \geq 1.5$  .

Ainsi, pour la carte de simulation d'aléa liée à la pente (Figure 4.16 : exemple de la parcelle 1), nous avons affecté directement des indices ( $I_p$ ) comme suit:

- $F_s \geq 1.5$  ;  $I_p$  prend la valeur minimum de 1 ;
- $1 < F_s < 1.5$  ;  $I_p$  est égale à 2 ;
- $F_s \leq 1$  ;  $I_p$  prend la valeur maximum de 3.

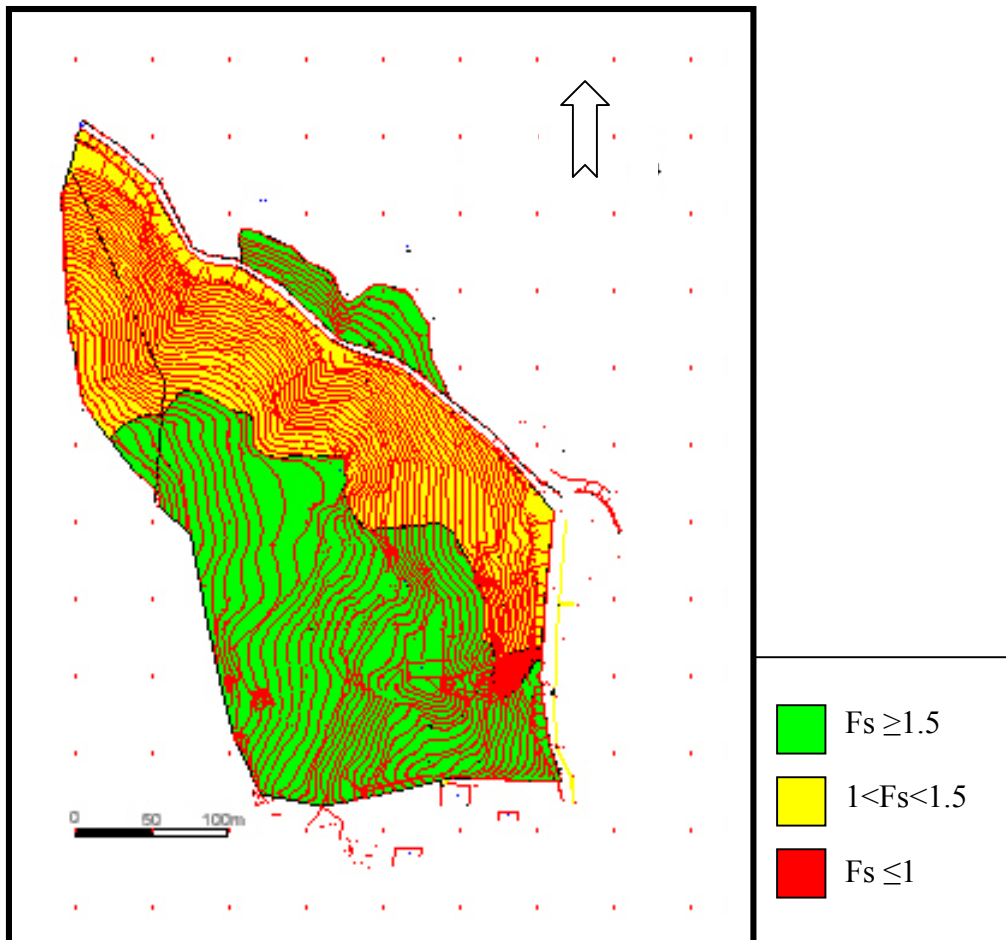


Figure 4.13 Carte d'iso valeur de  $F_s$  (parcelle 1)



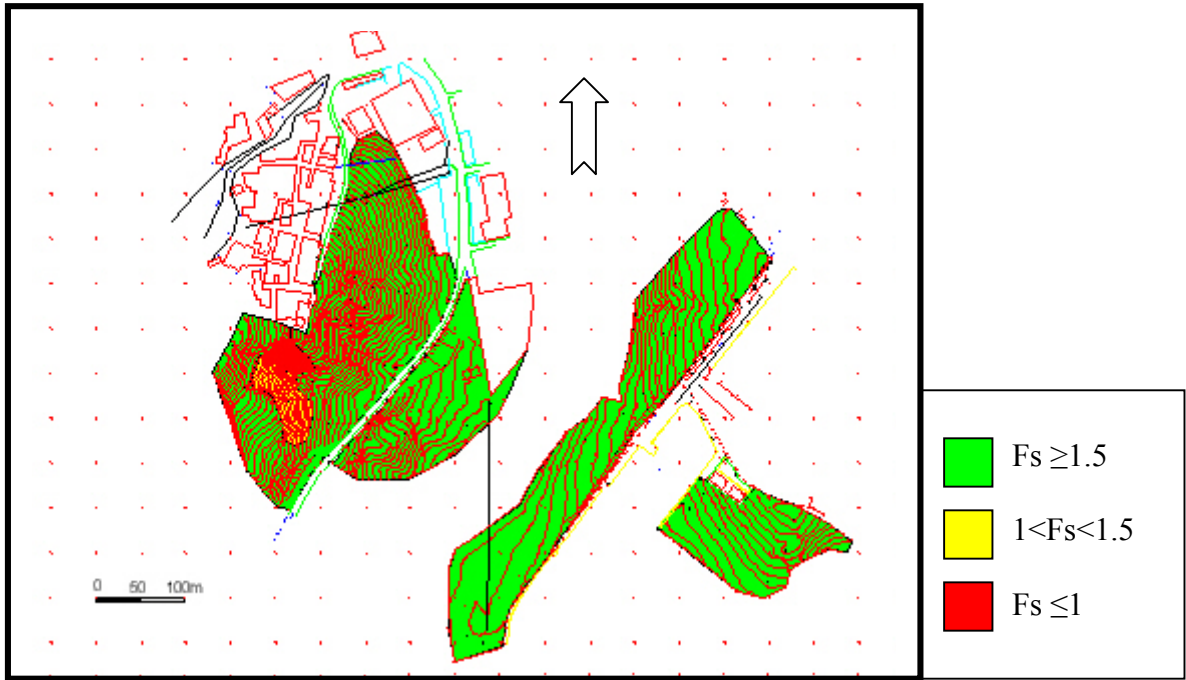


Figure 4.14 Carte d'iso valeurs de  $F_s$  (parcelle 2)

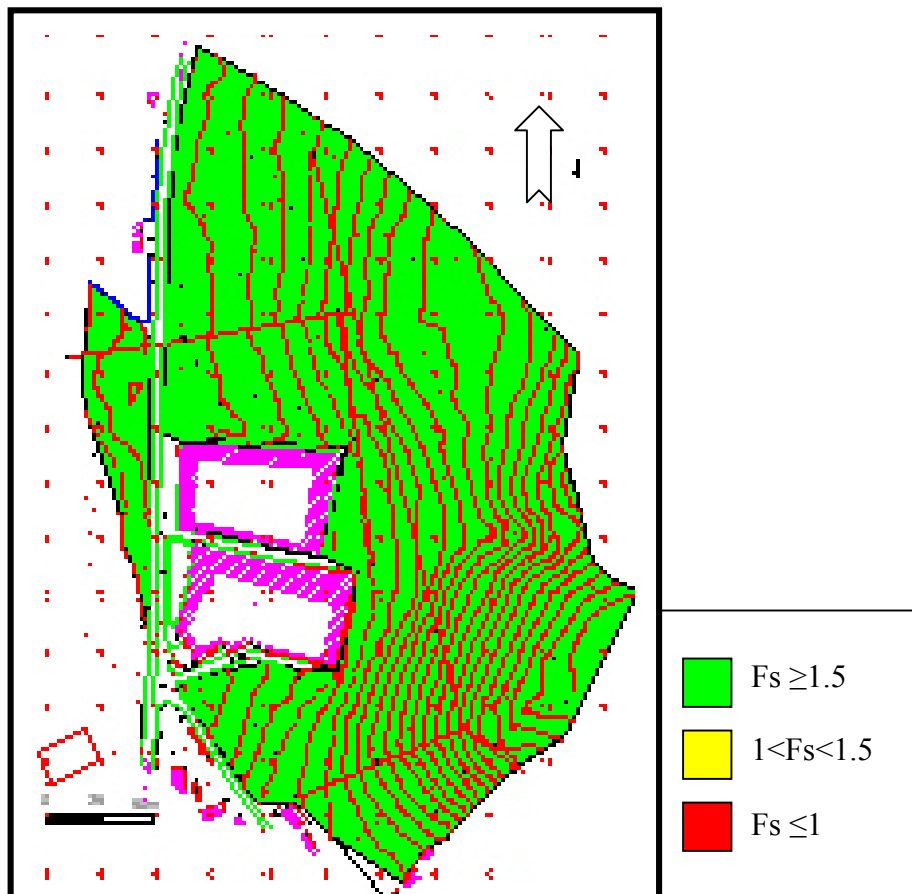
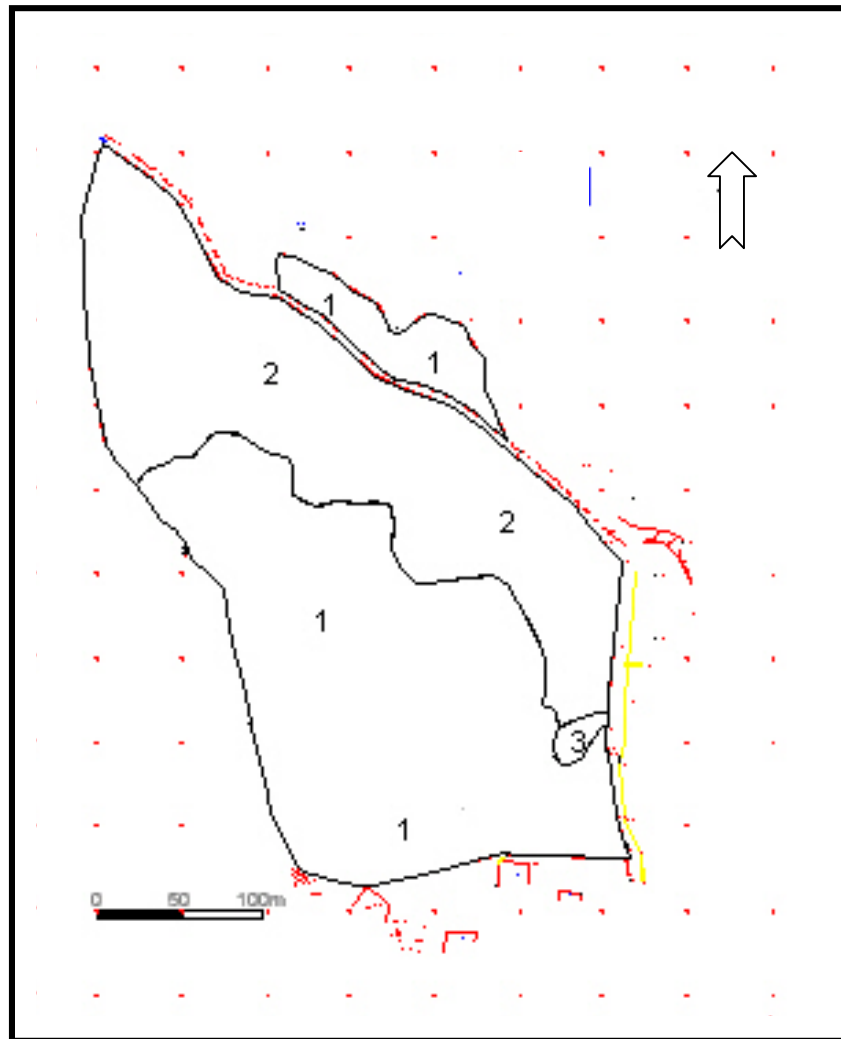


Figure 4.15 Carte d'iso valeurs de  $F_s$  (parcelle 3)



**Figure 4.16** Carte de simulation d'aléa lié à la pente (parcelle 1)

#### 7.1.2.2. La géologie

A partir des données recueillies dans le paragraphe 4, nous avons établi des cartes géologiques pour les trois parcelles (Figure 4.17, 4.18 et 4.19).

Pour la carte de simulation, la distribution des indices liés à la géologie, ( $I_G$ ), est réalisée en tenant compte du matériau le plus touché par des instabilités, et par récurrence, on en déduit les autres. C'est aussi le plus abondant sur notre site d'étude (Figure 4.20 : exemple de la parcelle 2).

Les indices ( $I_G$ ) sont attribués aux faciès suivants :

- Marnes bleues :  $I_G = 4$  ;
- Conglomérats, grès, sable et limons rouges :  $I_G = 3$  ;
- Conglomérats :  $I_G = 2$  ;
- Travertins :  $I_G = 1$ .

#### 7.1.2.3. La géomorphologie

Compte tenu du manque de données et de moyens (photos aériennes), la carte géomorphologique est réalisée à partir de simples visites et observations sur le terrain, ce qui reste une démarche suffisamment fiable à cause des surfaces relativement réduites à étudier (Figure 4.21, 4.22 et 4.23).

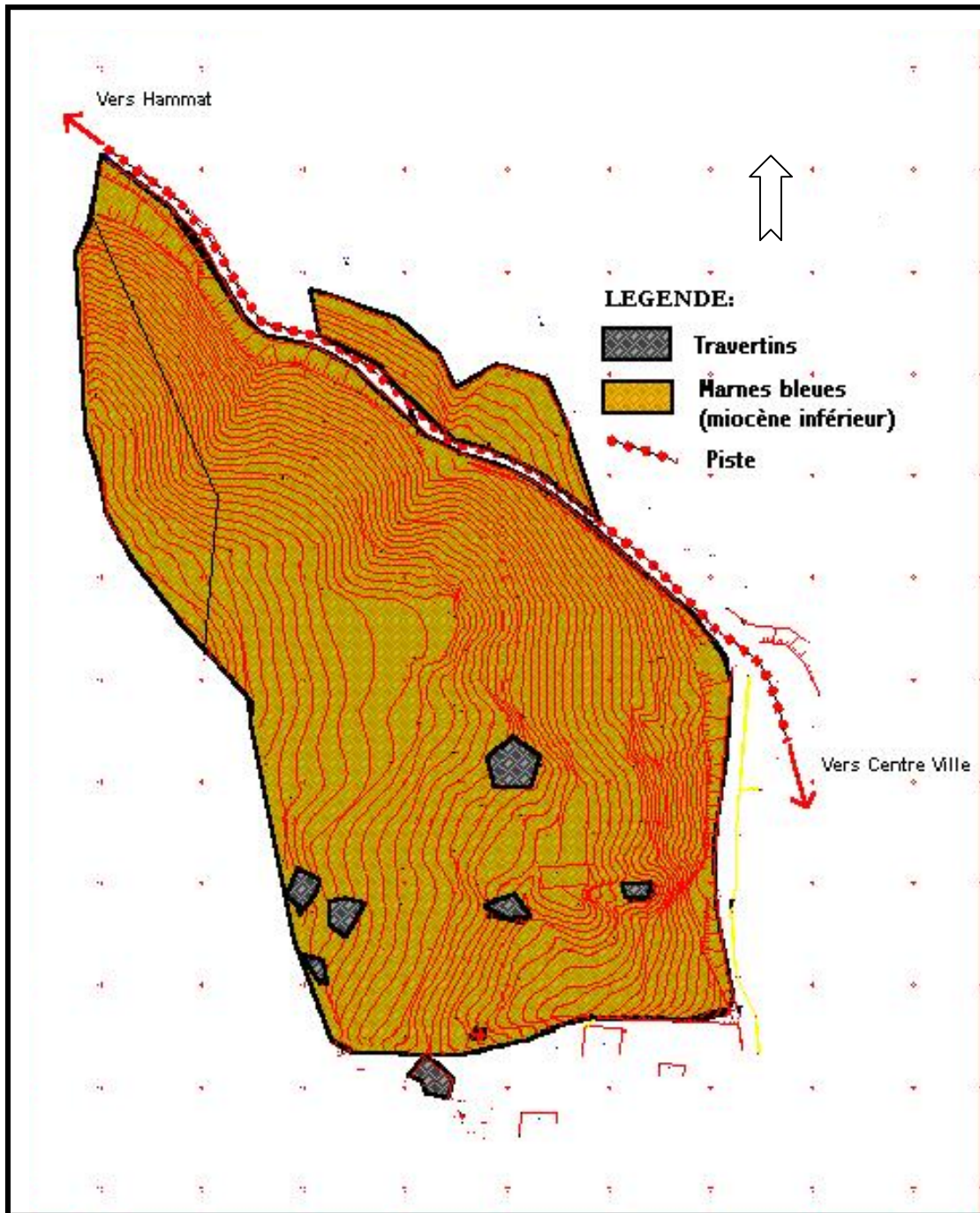


Figure 4.17 Carte géologique de la parcelle 1 (M.A. ALLAL, 2003)

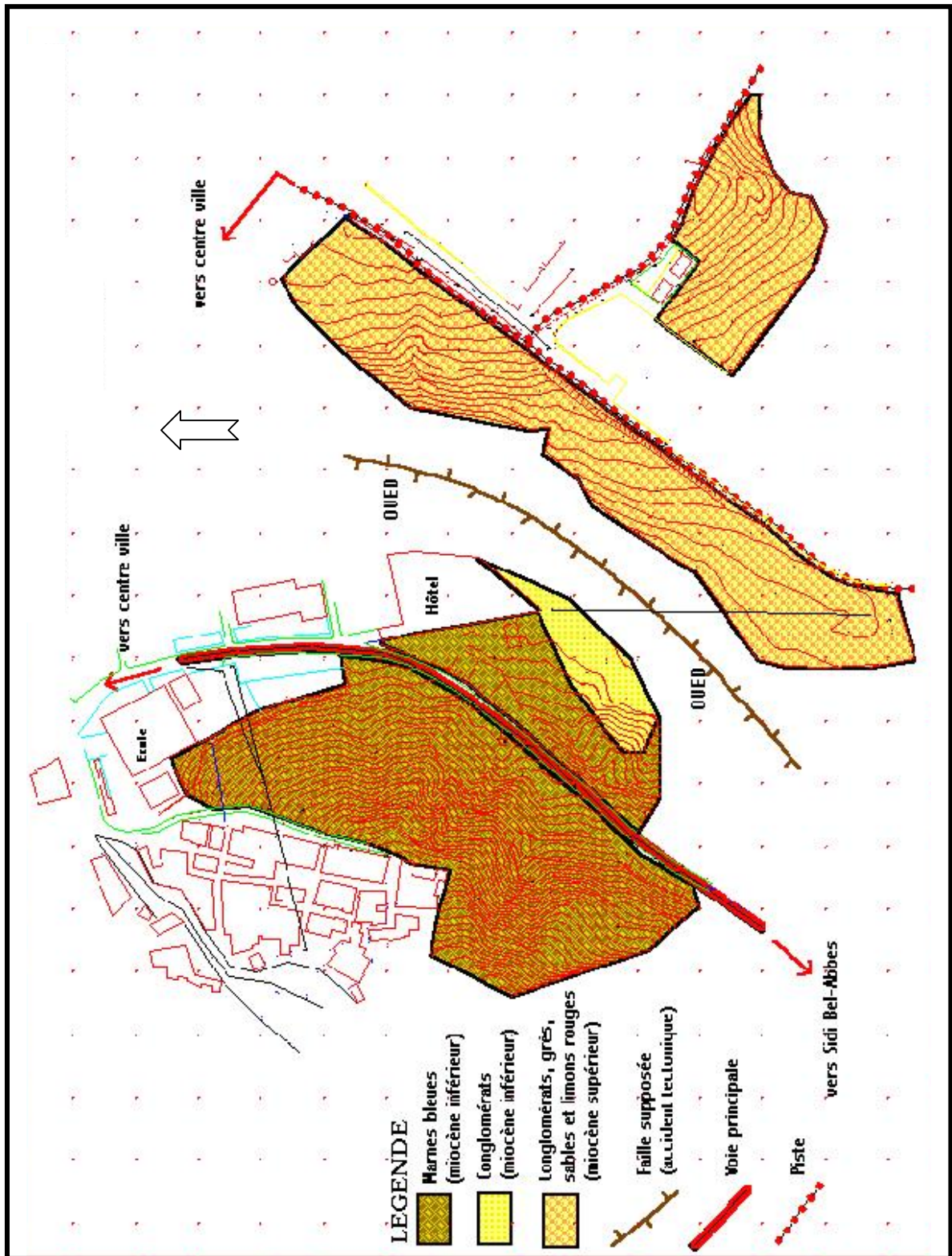


Figure 4.18 Carte géologique de la parcelle 2 (M.A. ALLAL, 2003)

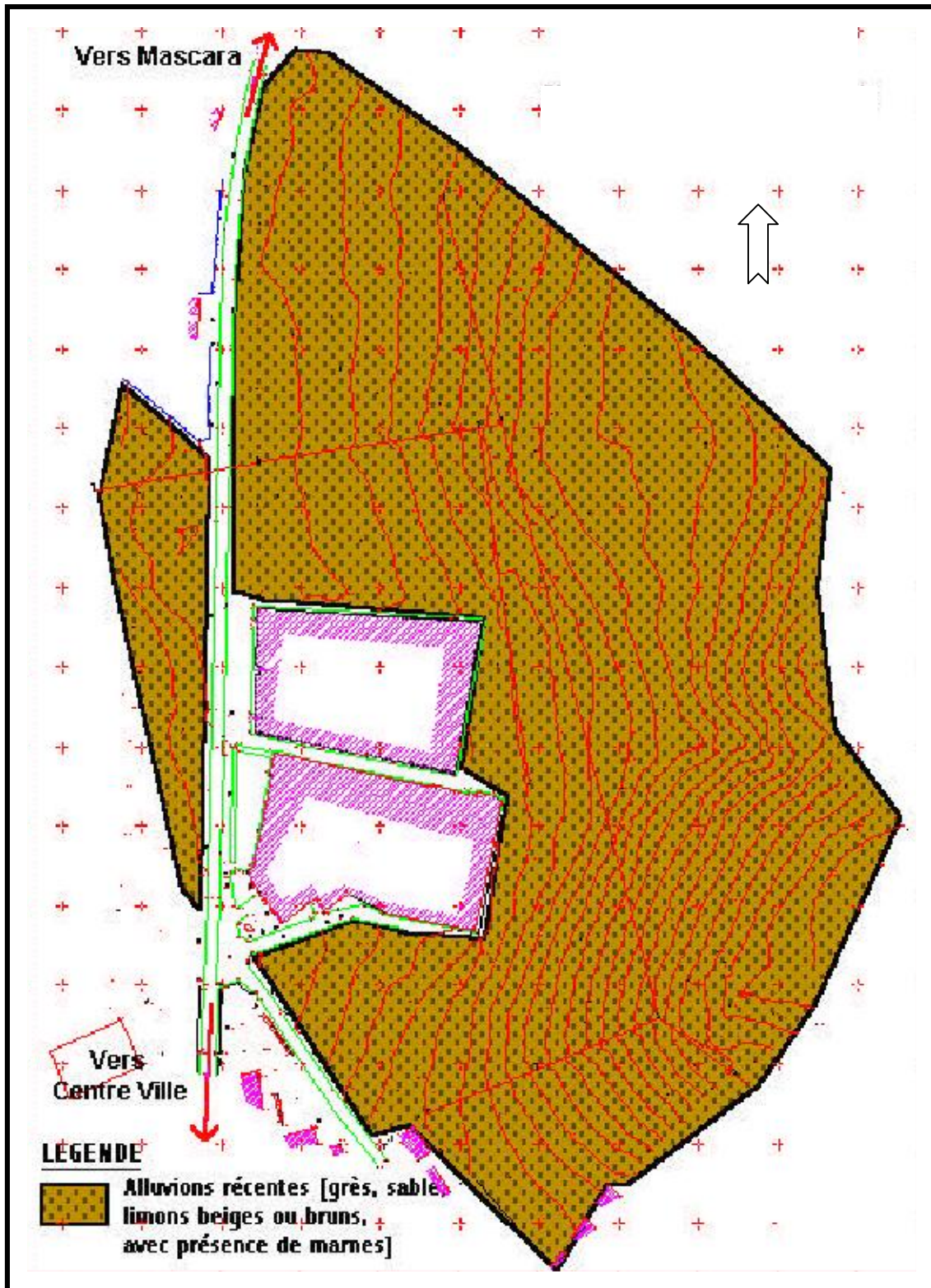


Figure 4.19 Carte géologique de la parcelle 3 (M.A. ALLAL, 2003)

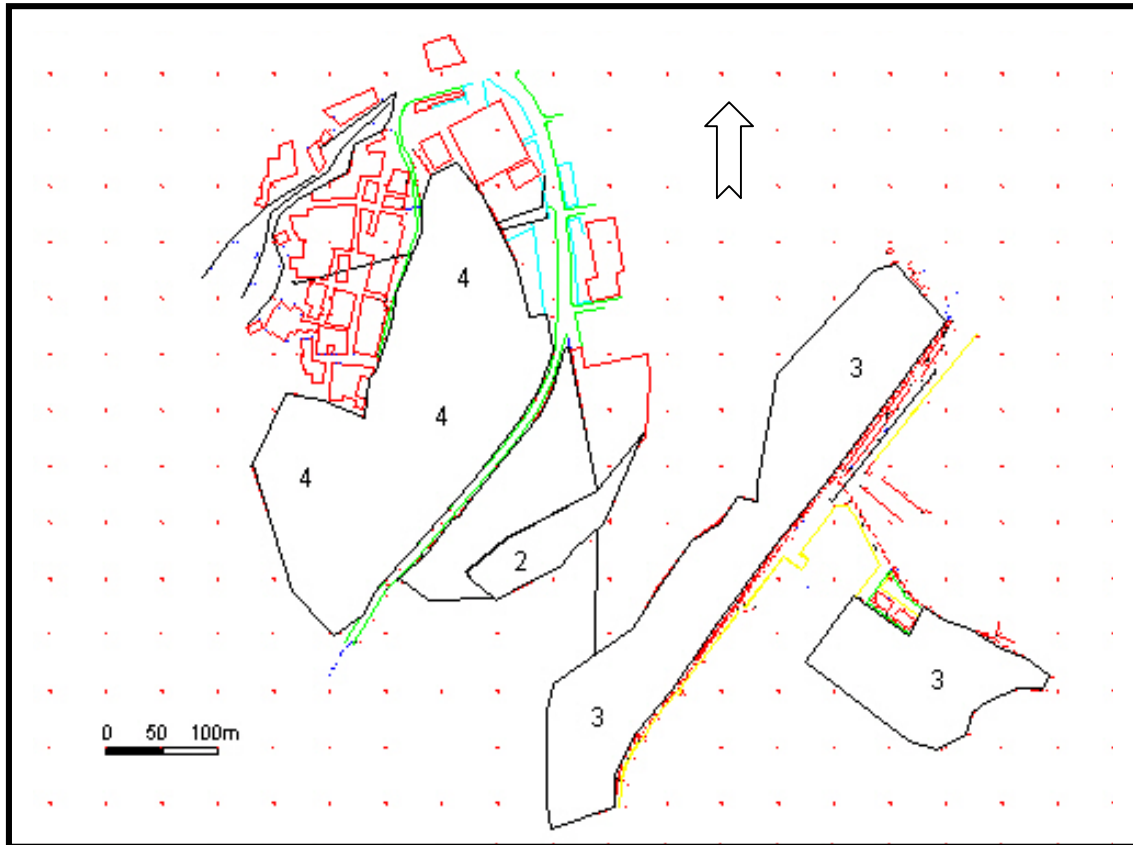


Figure 4.20 Carte de simulation d'aléa lié à la géologie (parcelle 2)

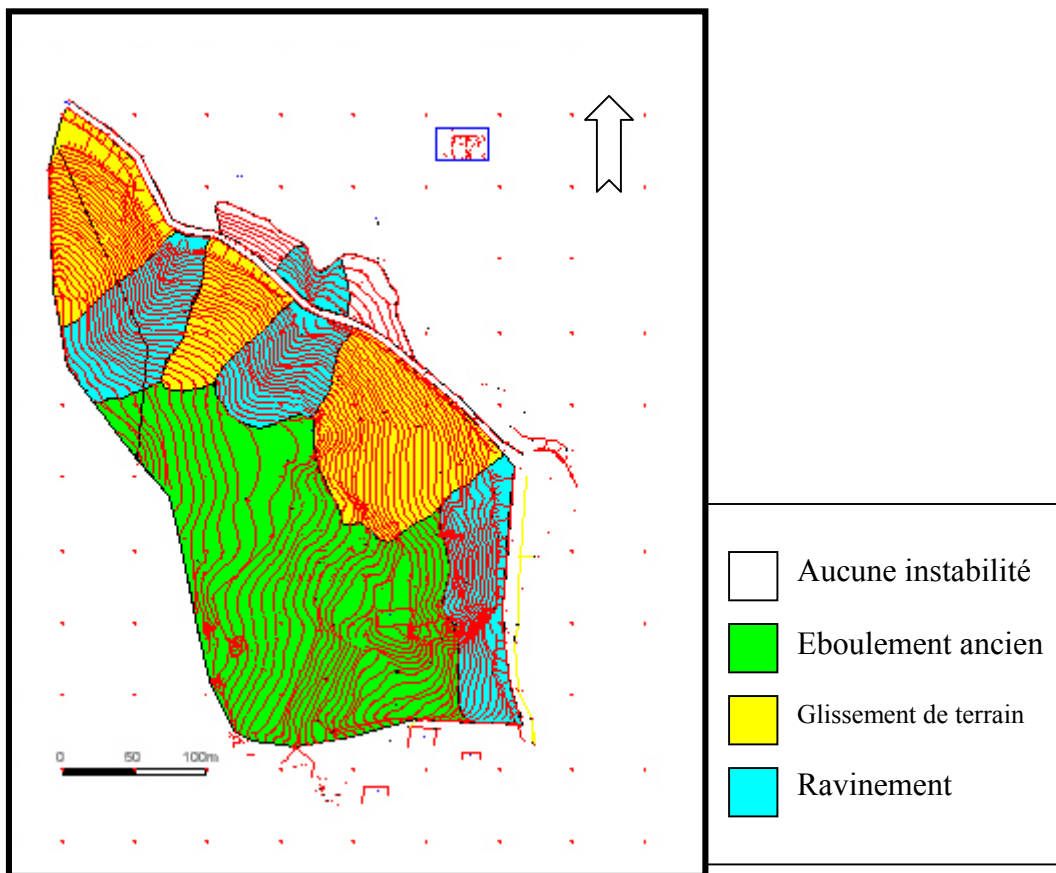


Figure 4.21 Carte géomorphologique de la parcelle 1

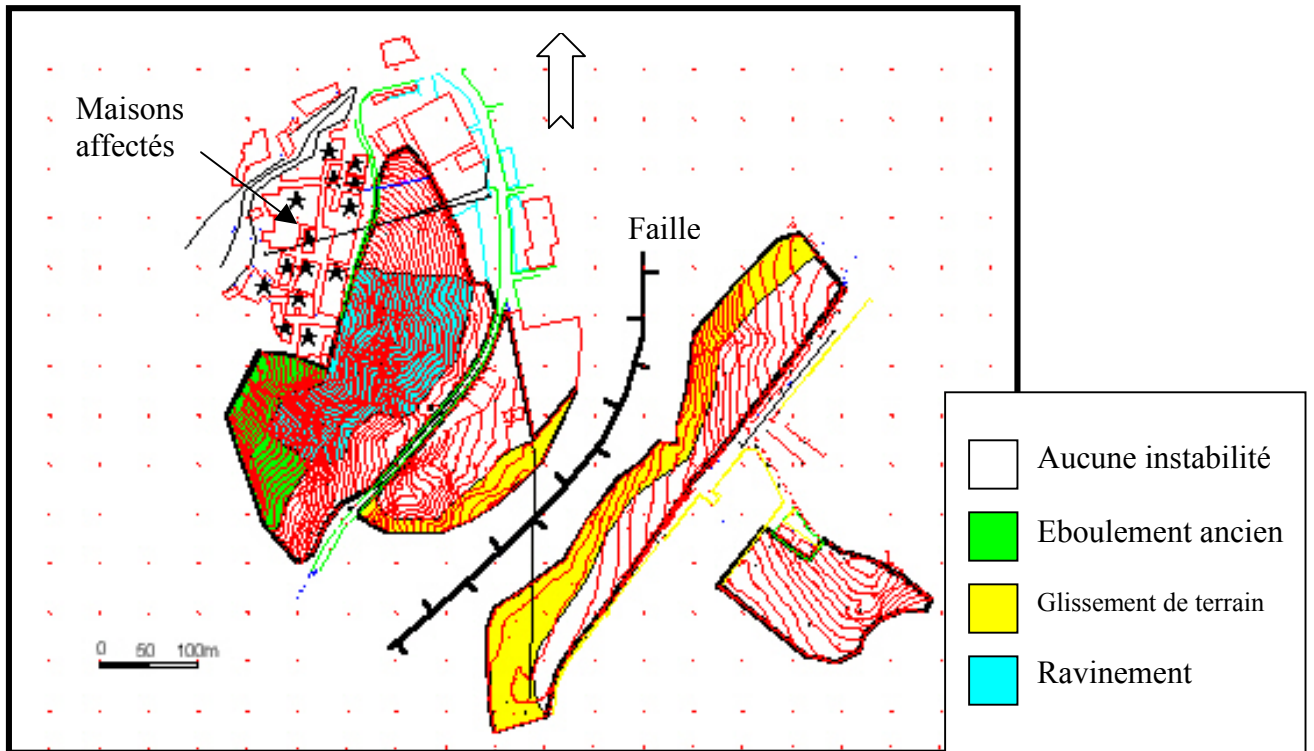


Figure 4.22 Carte géomorphologique de la parcelle 2

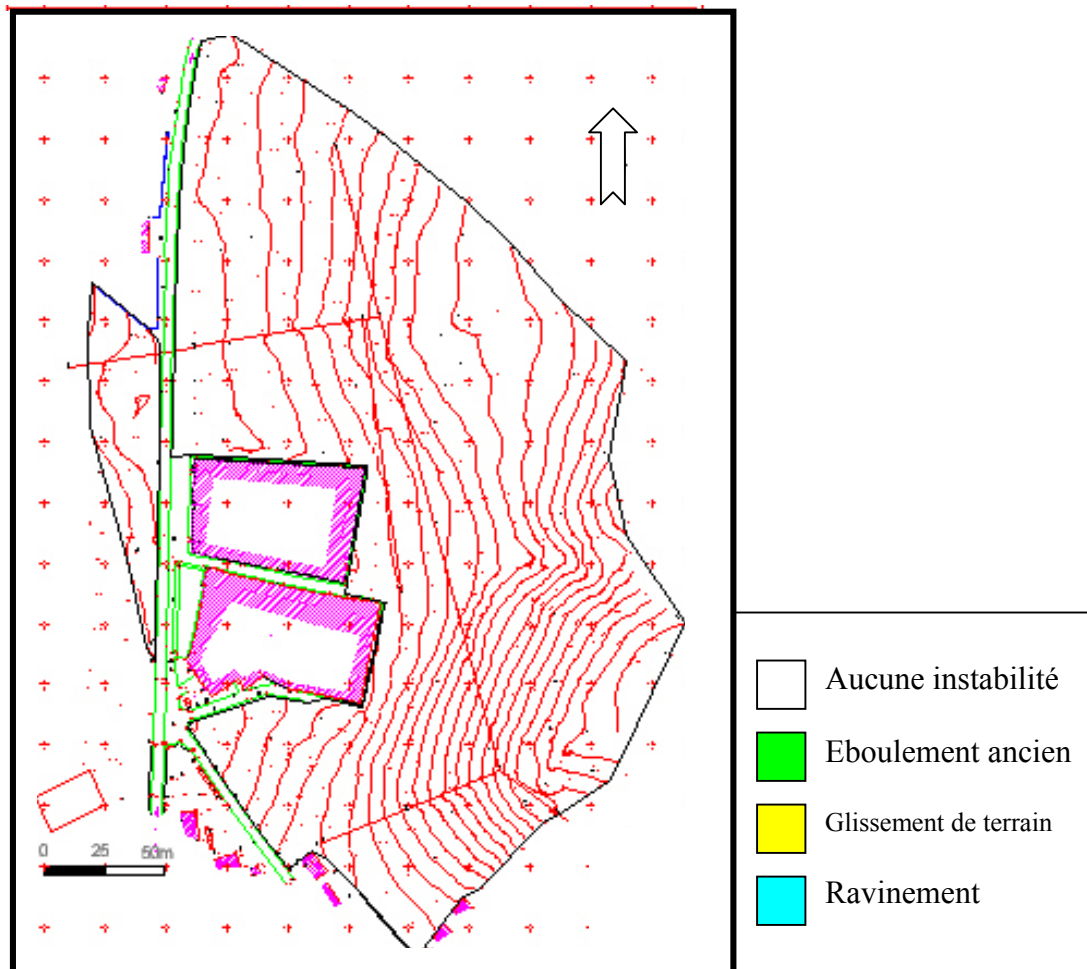


Figure 4.23 Carte géomorphologique de la parcelle 3

Pour les phénomènes détectés sur le terrain, le plus répandu est le ravinement, surtout pour les parcelles 1 et 2 (Figure 4.6 et 4.24). D'ailleurs d'après une étude synthétique de ROOSE et al (revue science et changements planétaires), ce phénomène mobilise des volumes considérables de terre dans les montagnes méditerranéennes du nord-ouest du Tell algérien, que notre zone d'étude fait partie.

Le glissement de terrain est observé en particulier sur les parcelles 1 et 2. La figure 4.25 montre la présence du phénomène pour la parcelle 1, et la figure 4.26 le montre pour la parcelle 2 sur les rives de l'oued.

Concernant l'éboulement rocheux, notre zone d'étude (seulement les parcelles 1 et 2) est une zone d'épandage de rochers venant d'une falaise se situant à l'ouest (Figure 4.27). Nous l'avons classifié comme un phénomène ancien, par suite des témoignages des habitants et des visites sur le terrain (Figure 4.28).

Il faut seulement signaler que la parcelle 3 est totalement vierge d'indice d'instabilité reconnus par simple visite sur le terrain.



**Figure 4.24** Phénomène du ravinement sur la parcelle 1



**Figure 4.25** Phénomène du glissement de terrain sur la parcelle 1





**Figure 4.26** Phénomène de glissement de terrain sur la parcelle 2



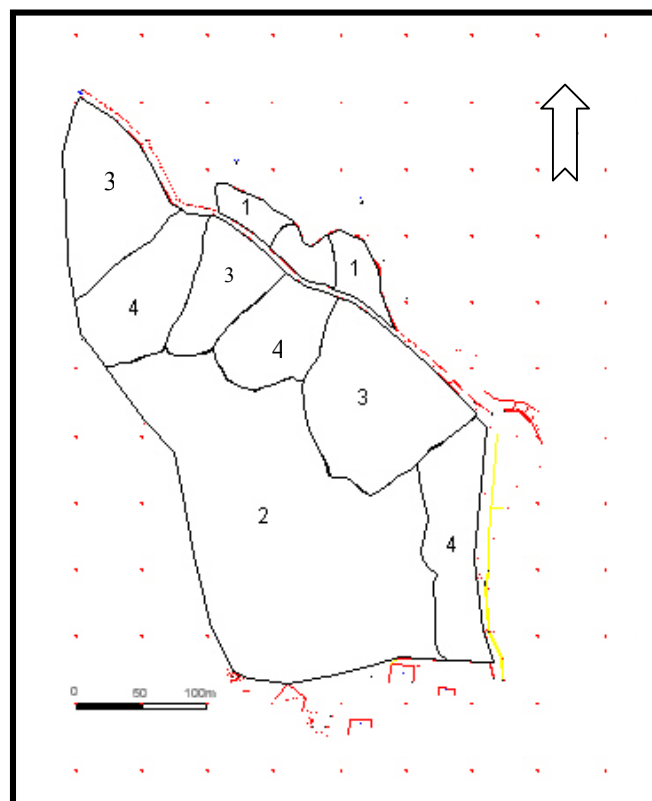
**Figure 4.27** La falaise rocheuse se situant à l'ouest de notre zone d'étude



**Figure 4.28** Eboulis ancien

Pour la carte de simulation d'aléa, nous avons affecté des indices ( $I_I$ ) en prenant en considération la nature des faciès géologiques et du degré d'instabilité (Figure 4.29 : exemple de la parcelle 1).

- Secteur à ravinement :  $I_I = 4$  ;
- Secteur à glissements de terrain :  $I_I = 3$  ;
- Secteur à éboulement ancien (zone d'épandage) :  $I_I = 2$  ;
- Secteur ne présentant aucune instabilité :  $I_I = 1$ .



**Figure 4.29** Carte de simulation d'aléa lié à la géomorphologie (parcelle 1)

### 7.1.3. Carte de l'interprétation de l'aléa

Elle résulte de la superposition des cartes de simulation d'aléa lié à la pente, à la géologie et à la géomorphologie, pour obtenir une carte où figure dans chaque secteur une combinaison à trois indices définis dans un ordre bien déterminé ( $I_P$ ,  $I_G$ ,  $I_t$ ) (Figure 4.30, 4.31 et 4.32). Ce triplet nous donne la part de l'aléa lié à chaque facteur.

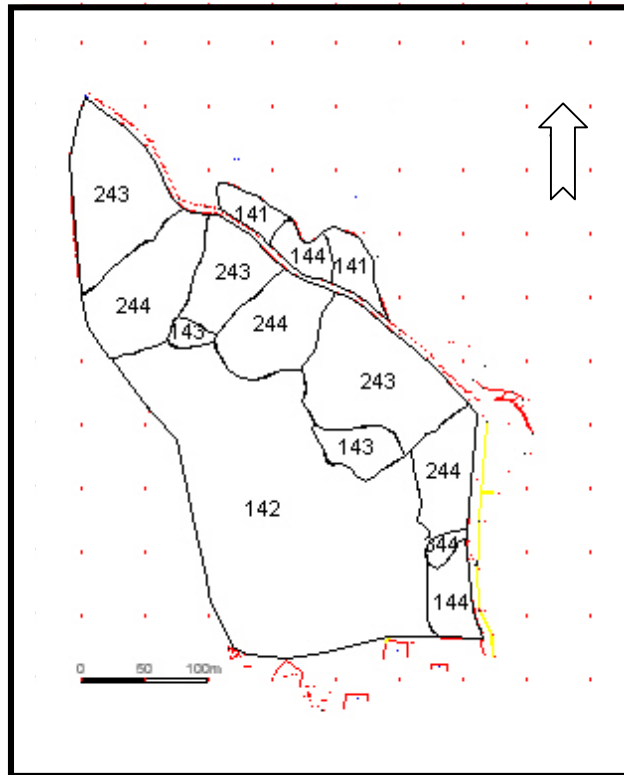


Figure 4.30 Carte de l'interprétation de l'aléa (parcelle 1)

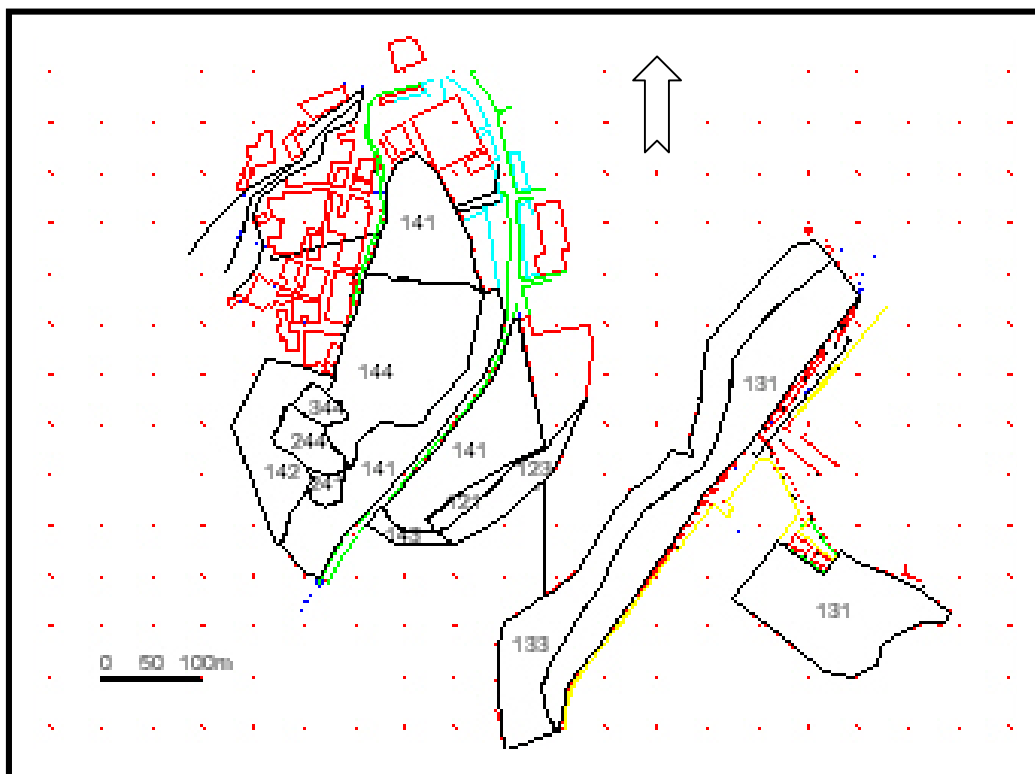


Figure 4.31 Carte de l'interprétation de l'aléa (parcelle 2)

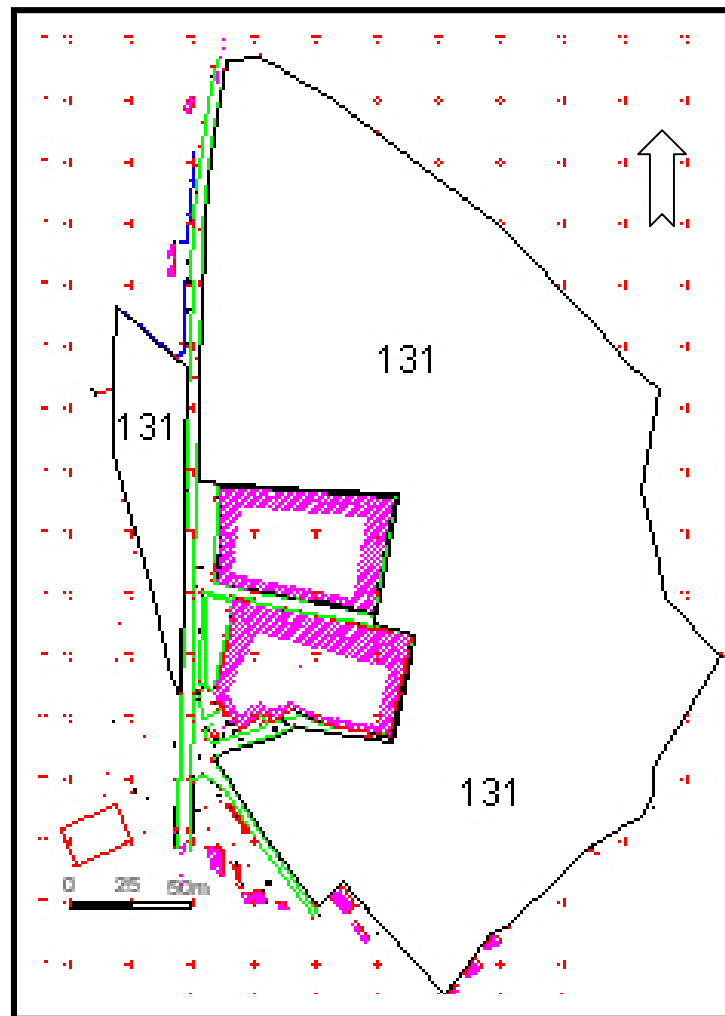


Figure 4.32 Carte de l'interprétation de l'aléa (parcelle 3)

#### 7.1.4 Cartes d'aléa global (cartes synthétiques)

L'aléa naturel est déterminé suivant deux méthodes : la méthode arithmétique (déterministe) et la méthode probabiliste.

##### 7.1.4.1. Méthode arithmétique

Elle consiste à faire la somme des trois indices des triplets par secteur, figurant dans la carte de l'interprétation de l'aléa ( $I_P + I_G + I_I$ ). Alors nous obtenons la carte de la sommation de l'aléa qui présente neuf zones, où la somme indiciaire donne un minimum de 3 et un maximum de 11. Ces neuf zones sont réduites à quatre classes exprimant des niveaux croissant dans la carte d'aléa naturel (Figure 4.33, 4.34 et 4.35).

Elles sont définies selon les fourchettes suivantes :

Classe 1, (3,4,5) : représentée par la couleur verte, aléa faible ou négligeable ;

Classe 2, (6,7) : représentée par la couleur jaune, aléa moyen ;

Classe 3, (8,9) : représentée par la couleur orange, aléa élevé ;

Classe 4, (10,11) : représentée par la couleur rouge, aléa très élevé.

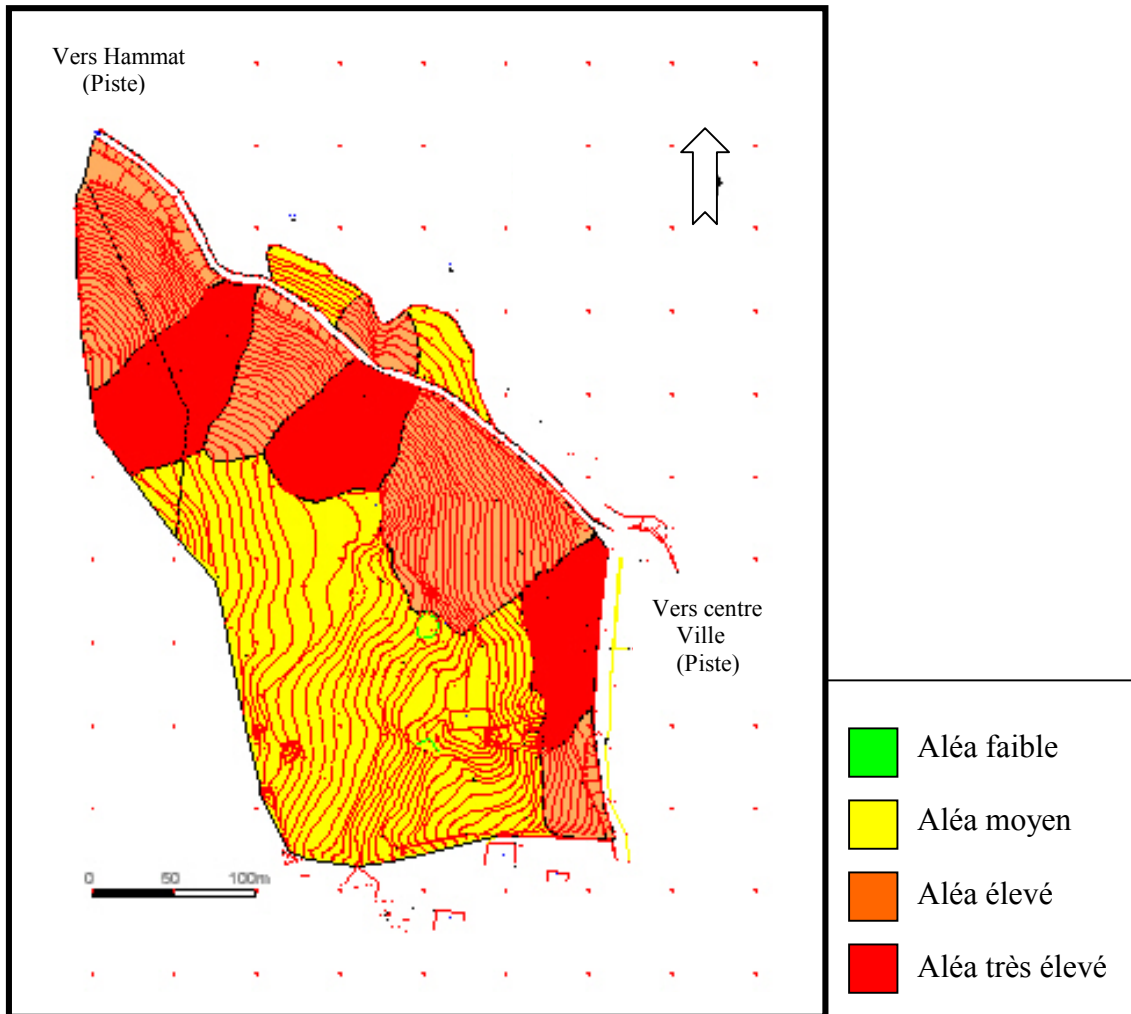


Figure 4.33 Carte d'aléa naturel pour la parcelle 1 (méthode arithmétique)

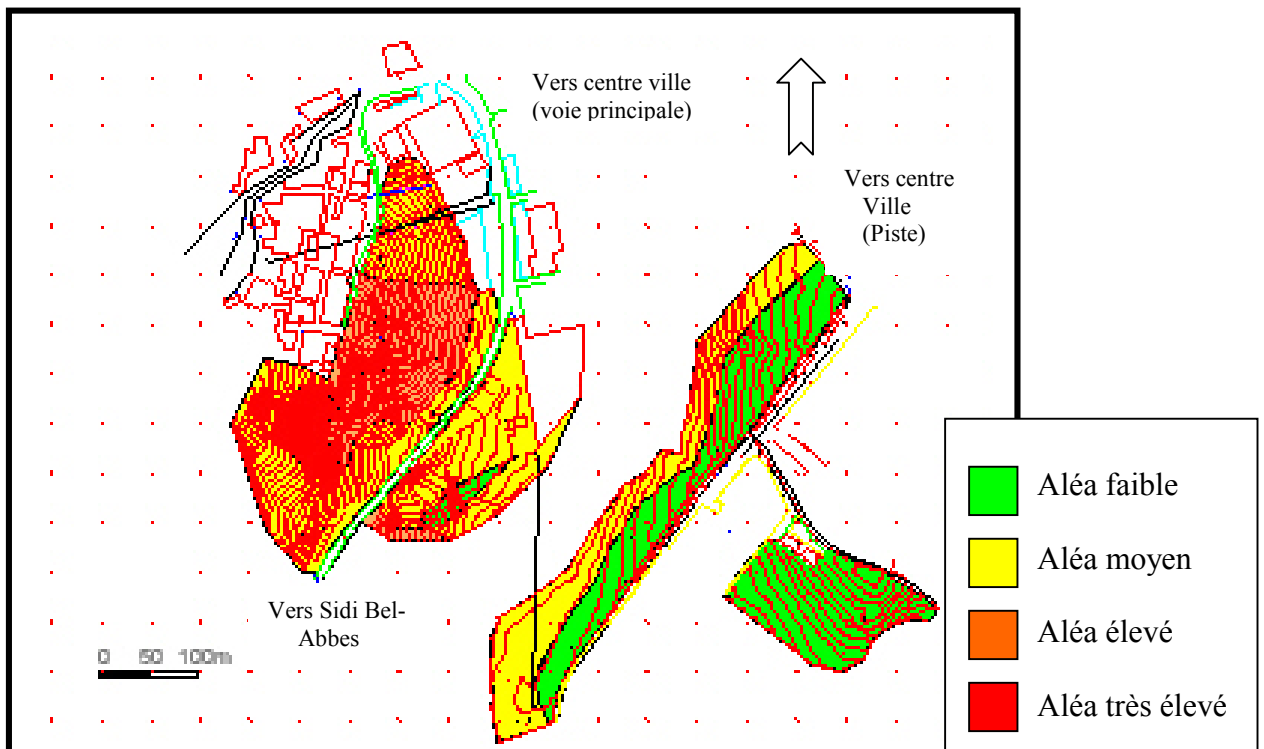


Figure 4.34 Carte d'aléa naturel pour la parcelle 2 (méthode arithmétique)

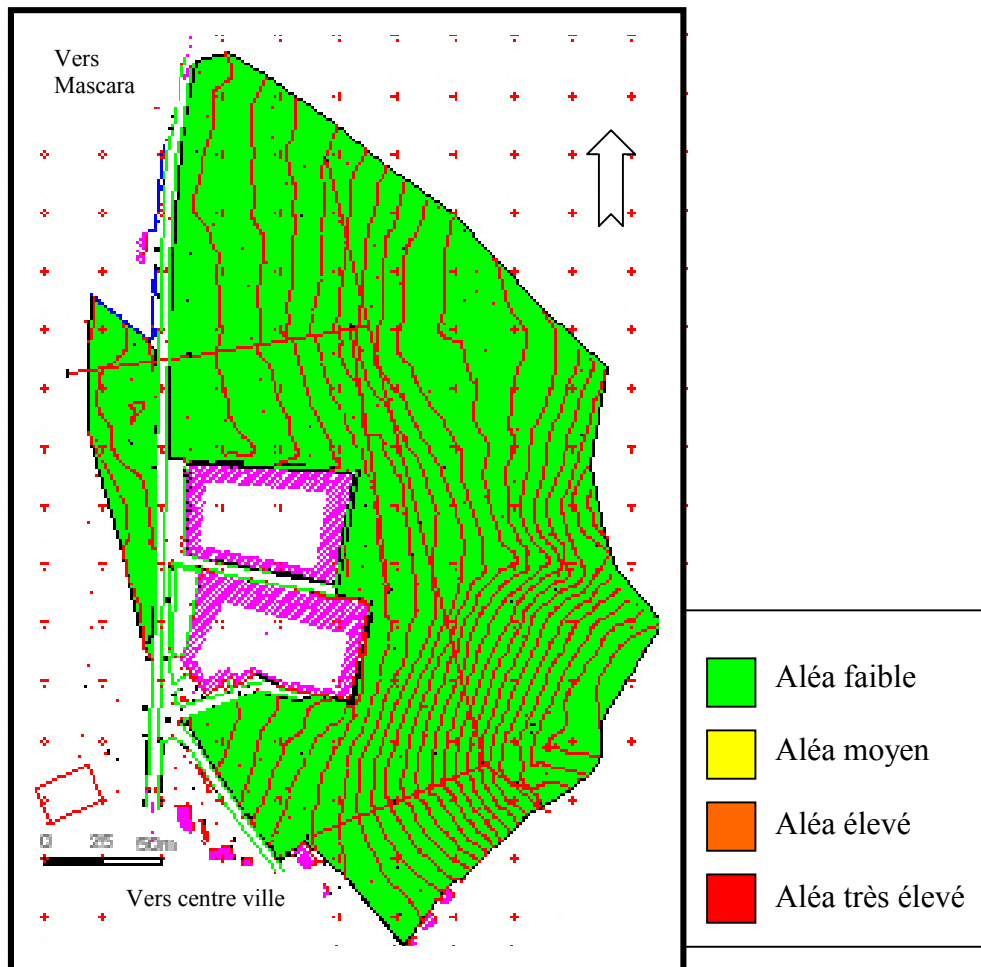


Figure 4.35 Carte d'aléa naturel pour la parcelle 3 (méthode arithmétique)

#### 7.1.4.2. Méthode probabiliste

A partir de la carte de l'interprétation de l'aléa, nous pouvons établir, par la méthode probabiliste, la carte d'aléa naturel (Figure 4.36, 4.37, 4.38) (carte de la probabilité d'apparition) en convertissant les indices ( $I_F$ ) pour chaque facteur en terme de probabilité partielle ( $P_P$ ) de 0 à 1. Ceci en divisant chaque indice ( $I_F$ ) par le nombre recensé de ces indices, bien sûr concernant chaque facteur. Pour comprendre cette phase, on prend l'exemple du facteur géologique (le même principe pour les autres facteurs) :

- Marnes bleues :  $I_G = 4$  ;  $P_P = 4/4 = 1$  ;
- Conglomérats, grés, sable et limons rouges :  $I_G = 3$  ;  $P_P = 3/4 = 0.75$  ;
- Conglomérats :  $I_G = 2$  ;  $P_P = 2/4 = 0.5$  ;
- Travertins :  $I_G = 1$  ;  $P_P = 1/4 = 0.25$ .

En conséquence, l'évaluation de l'aléa est égale au produit des probabilités des différents facteurs  $P_i$  dites probabilités partielles.

$P_R(\%) = P_P \times P_G \times P_I \times 100$  où  $P_R$  est la probabilité d'apparition spatiale.

Ensuite, nous avons classé les pourcentages trouvés en quatre niveaux d'aléa croissants :

Niveau 1, (1 à 10%) : représenté par la couleur verte, aléa faible ou négligeable ;

Niveau 2, (10 à 30%) : représenté par le jaune, aléa moyen ;

Niveau 3, (30 à 50%) : représenté par l'orange, aléa élevé ;

Niveau 4, (50 à 100%) : représenté par le rouge, aléa très élevé.

Nous avons considéré des facteurs qui ne varient que dans l'espace, et par conséquent la probabilité obtenue est une probabilité d'apparition spatiale.

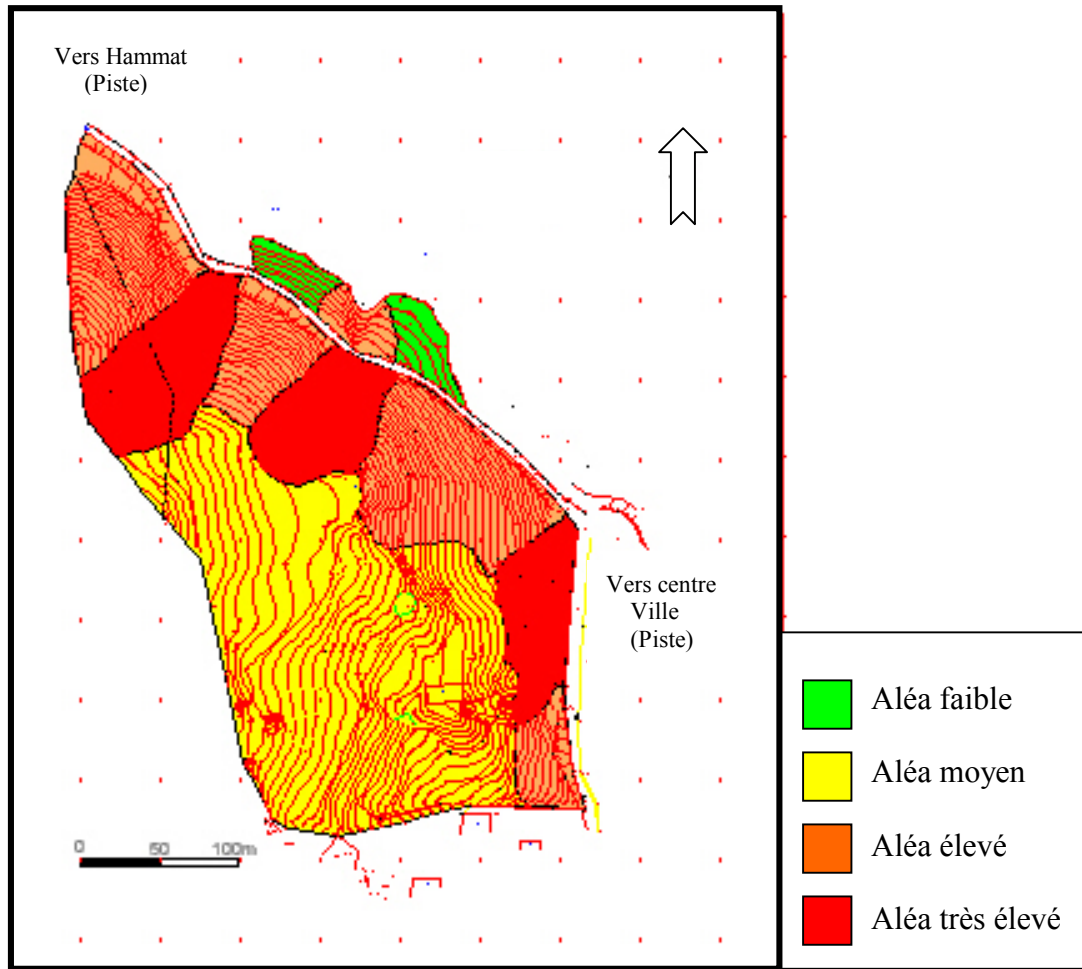


Figure 4.36 Carte d'aléa naturel pour la parcelle 1 (méthode probabiliste)

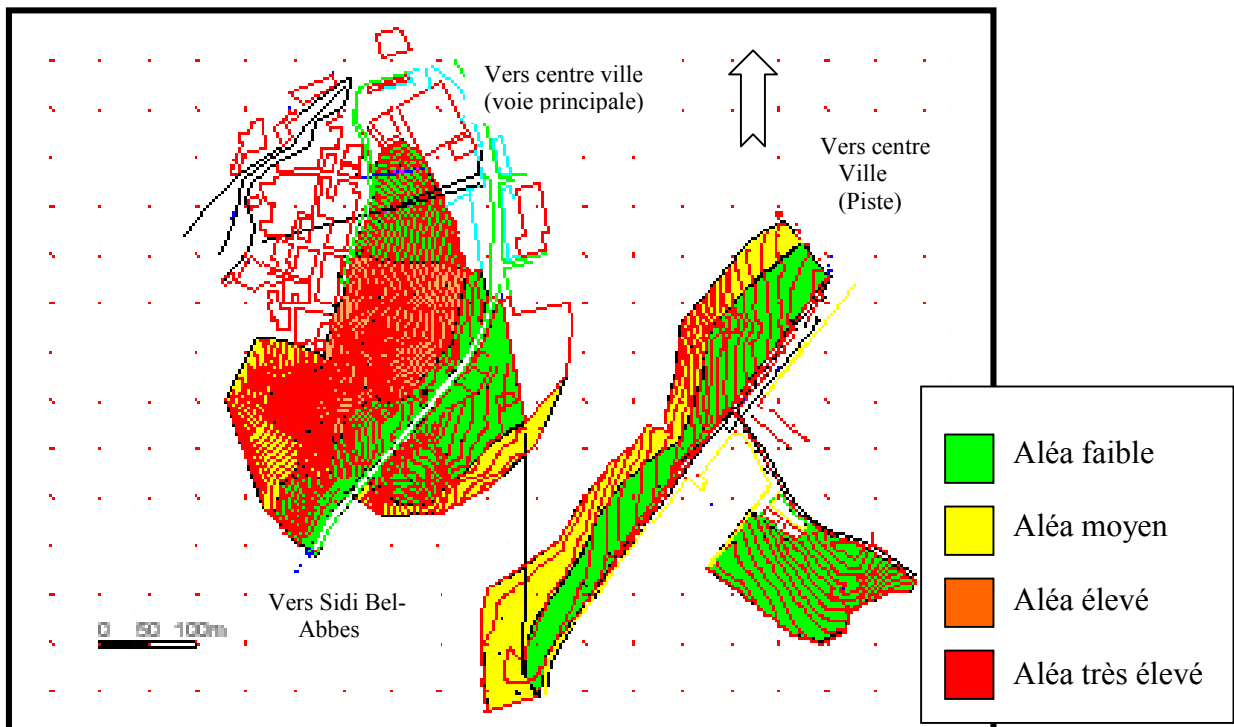
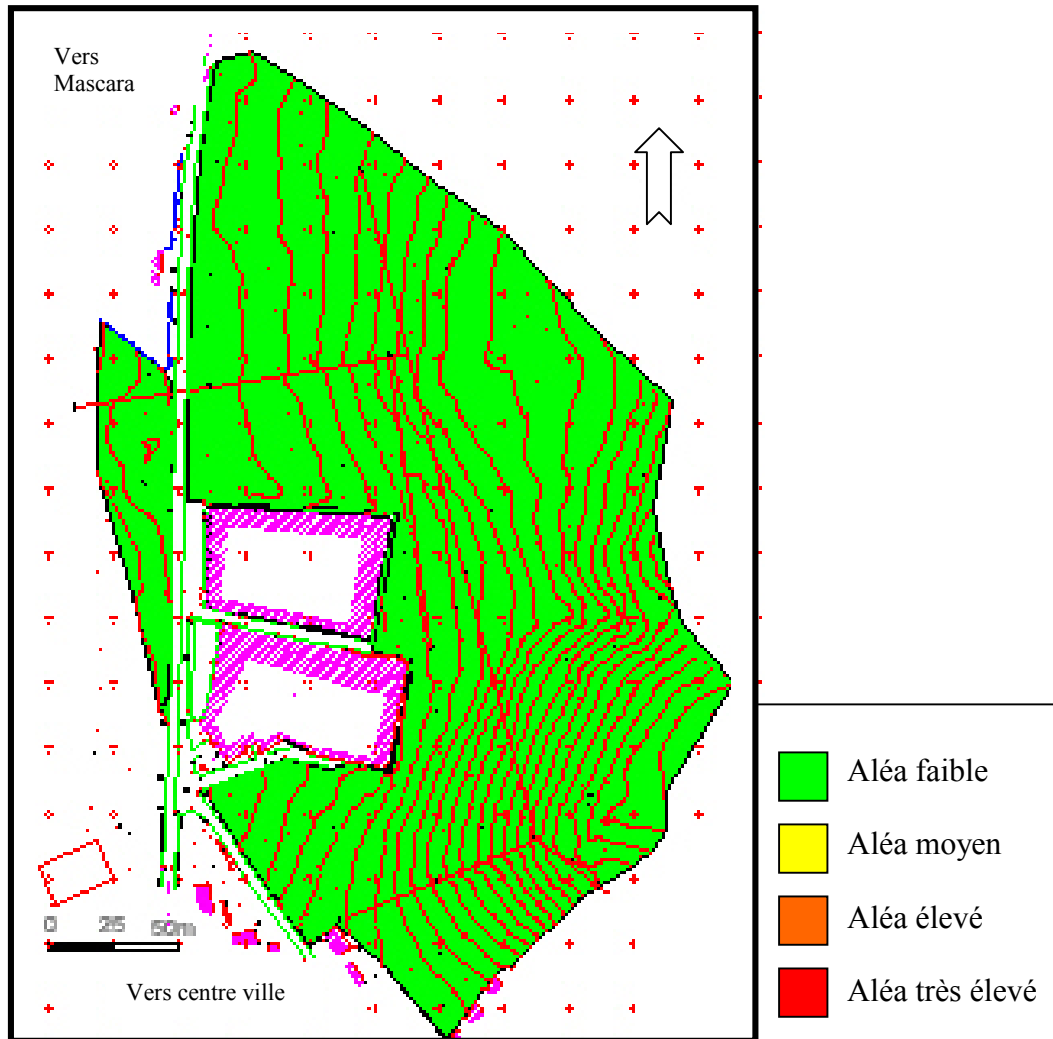


Figure 4.37 Carte d'aléa naturel pour la parcelle 2 (méthode probabiliste)



**Figure 4.38** Carte d'aléa pour la parcelle 3 (méthode probabiliste)

#### 7.1.4.3. Comparaison entre les deux méthodes

La comparaison entre les deux procédés, arithmétique et probabiliste, porte essentiellement sur l'action conjointe des facteurs. La méthode arithmétique conduit à un cumul des intensités des facteurs et aboutit donc à une appréciation pessimiste dans les zones d'aléa moyen et aléa faible ou négligeable. Tandis que la méthode probabiliste met en jeu l'interaction entre les différents facteurs, et ainsi nous avons une meilleure appréciation de l'aléa dans ces zones mêmes. En plus, la définition de l'aléa, qui est « la probabilité d'apparition en un lieu donné et à un moment donné d'un événement potentiellement dangereux susceptible de causer des dommages aux personnes et aux biens » (U.N.D.R.O., 1979) [FARES.1994] nous amène à préférer le moyen probabiliste au moyen arithmétique.

## 7.2. Méthode de GUPTA et ANBALAGAN

C'est une méthode basée sur une approche empirique où on combine des facteurs de causalité d'instabilité de pentes majorés (chapitre précédent). Seulement Ms. GUPTA et ANBALAGAN l'ont utilisé pour des phénomènes de type glissement dans des massifs rocheux plus ou moins altérés.

Nous avons utilisé cette méthode pour notre type de terrain qui est un sol meuble, en éliminant le facteur utilisé propre aux sols rocheux et qui concerne la relation entre orientations des discontinuités et du versant.



### 7.2.1. Méthodologie

Les facteurs utilisés et leur notation sont représentés par le tableau 4.2 :

**Tableau 4.2** Affectation des notes pour les facteurs utilisés

Facteurs	Désignation	Notes	Cartes	Remarques
Géologie	Marnes bleues	2.0		
	Conglomérats, sable, grés et limon	1.0	Figure 4.17 Figure 4.18	
	Conglomérats	0.8	Figure 4.19	
	Travertin	0.2		
Pente	> 45°	2.0		
	36 à 45°	1.7	Figure 4.39	
	26 à 35°	1.2	Figure 4.40	
	16 à 25°	0.8	Figure 4.41	
	<15°	0.5		
Dénivelée	Forte >300m	1.0		Pour toute la zone d'étude, on a une dénivelée faible (n = 0.3)
	Moyenne 101 à 300m	0.6	---	
	Faible <100m	0.3		
Couverture végétale	Terrain aride	2.0		
	Végétation rare avec des terrains moins couvert	1.5		
	Surface de végétation modérée	1.2	Figure 4.42 Figure 4.43 Figure 4.44	
	Végétation forestière dense	0.8		
Hydrogéologie	Terrain cultivé	0.6		
	Ecoulement	1.0		
	Ruissellement	0.8		
	Sol mouillé	0.5	---	Notre zone ne présente pas une bonne potentialités hydriques souterraines peu profonde (n =0)
	Sol humide	0.2		
	Sol sec	0.0		

Enfin la carte d'aléa naturel (figure 4.45, 46 et 47) est établie en classant la somme des notes affectées à chaque facteurs précédents dans des intervalles qui définissent le degré d'aléa :

- Aléa très faible  $S \leq 2.8$ ;
- Aléa faible  $2.8 < S \leq 4$ ;
- Aléa modéré  $4 < S \leq 4.8$ ;
- Aléa fort  $4.8 < S \leq 6$  ;
- Aléa très fort  $S > 6$ .

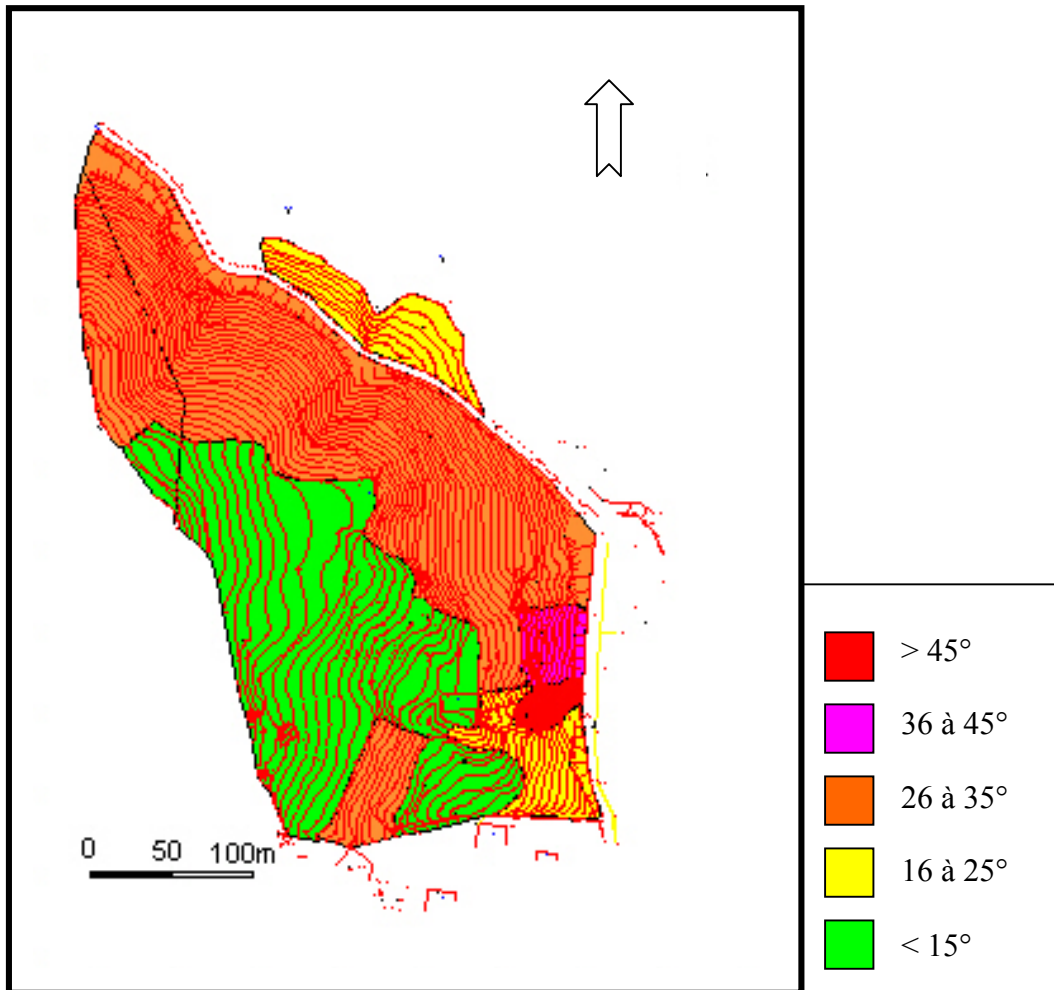


Figure 4.39 Carte de pente pour la parcelle 1

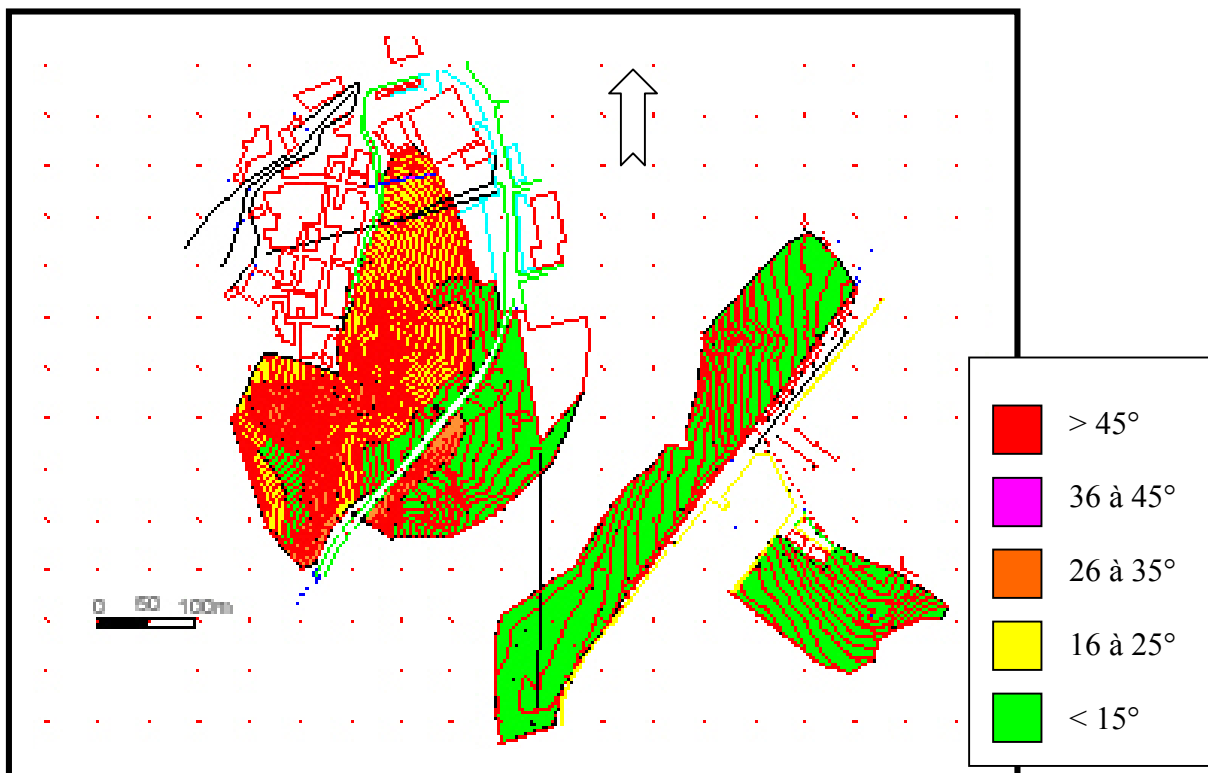


Figure 4.40 Carte de pente pour la parcelle 2

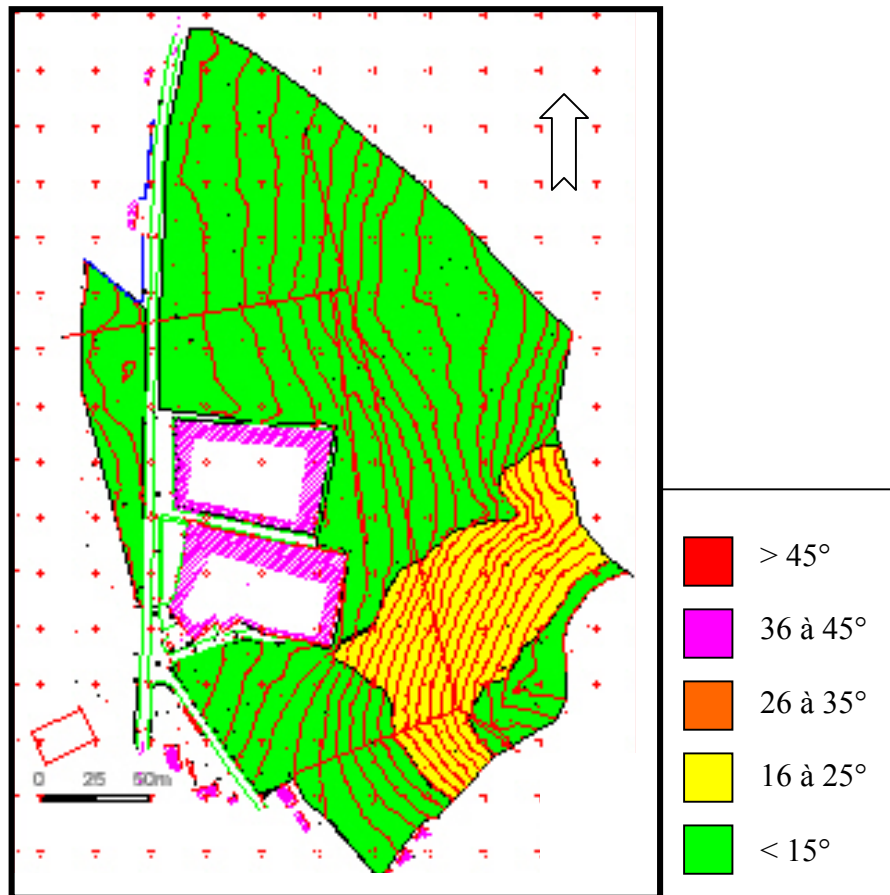


Figure 4.41 Carte de pente pour la parcelle 3

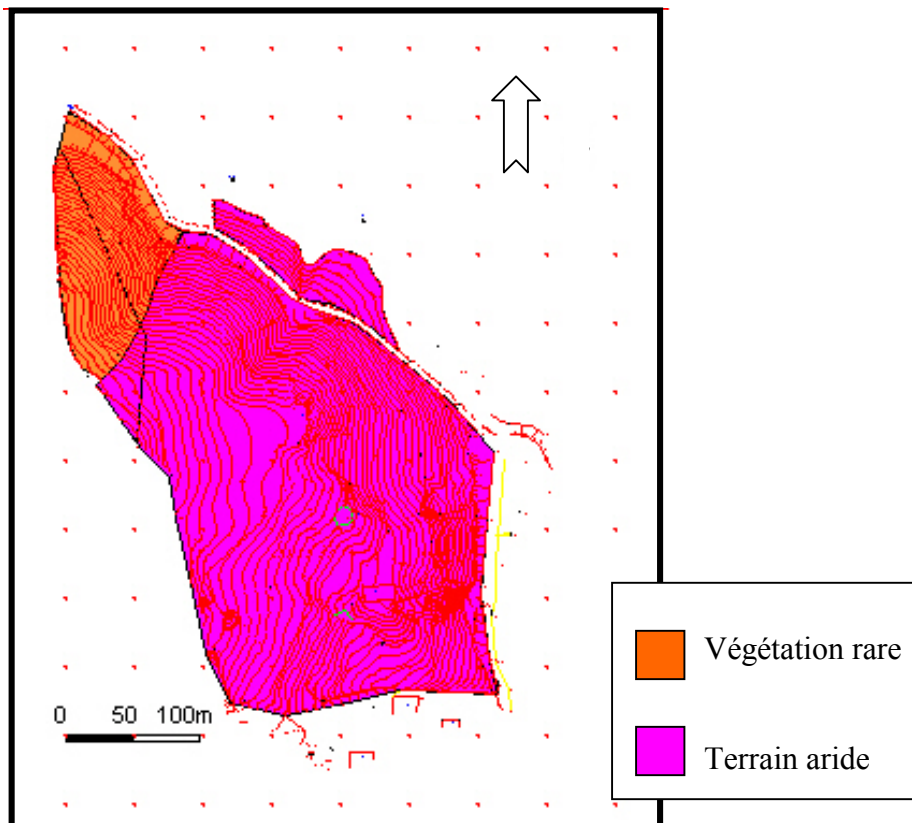


Figure 4.42 La couverture végétale pour la parcelle 1

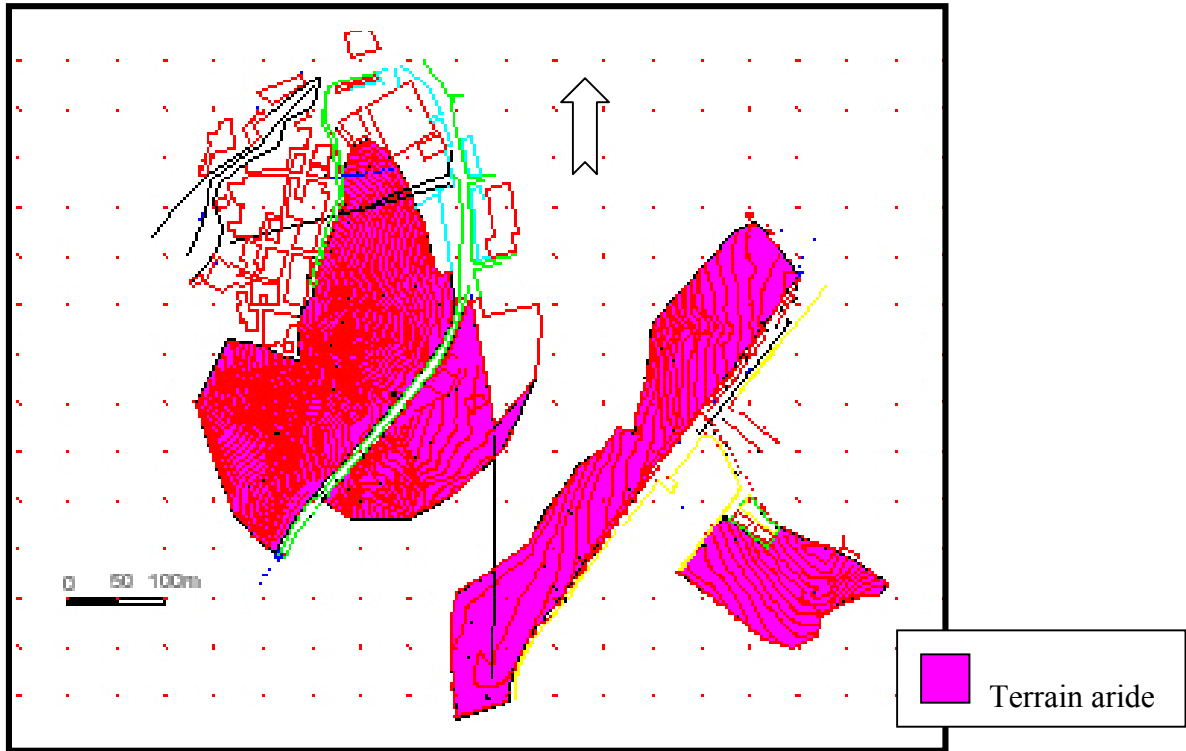


Figure 4.43 La couverture végétale pour la parcelle 2

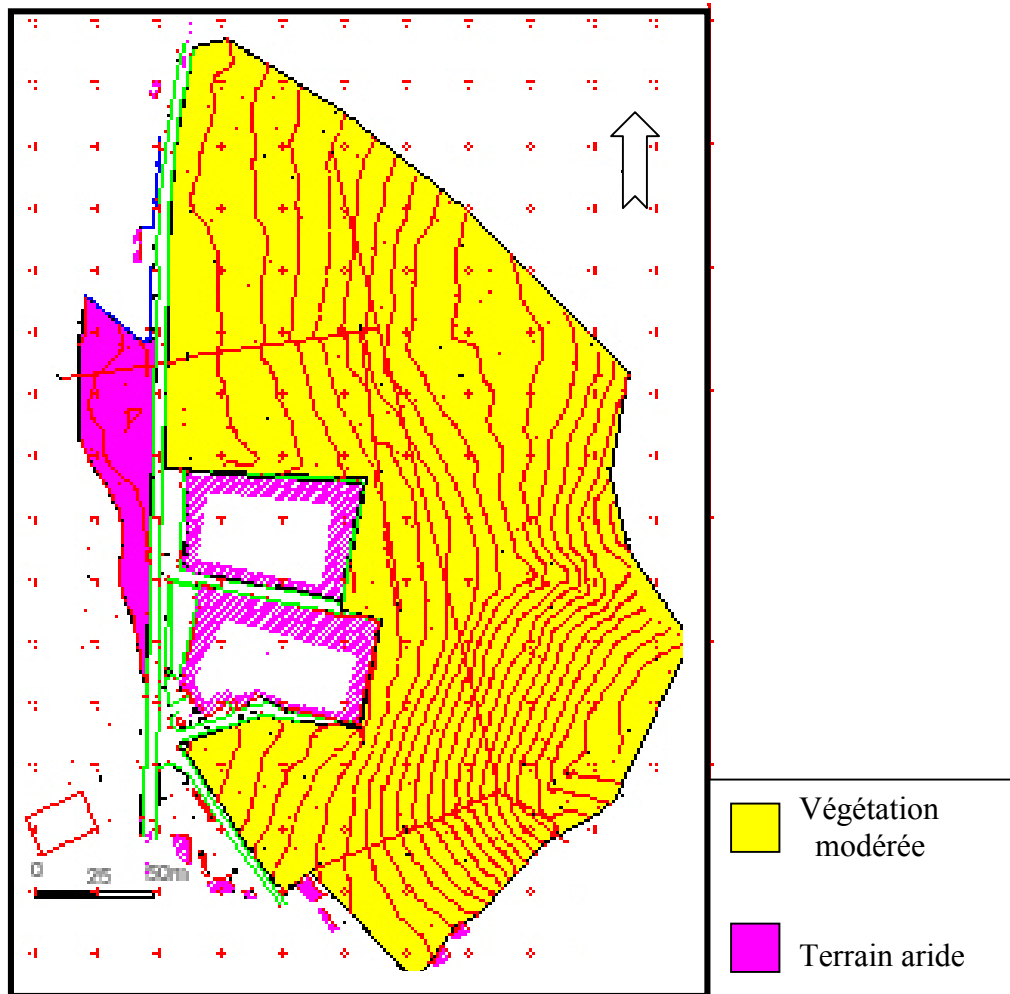


Figure 4.44 La couverture végétale pour la parcelle 3

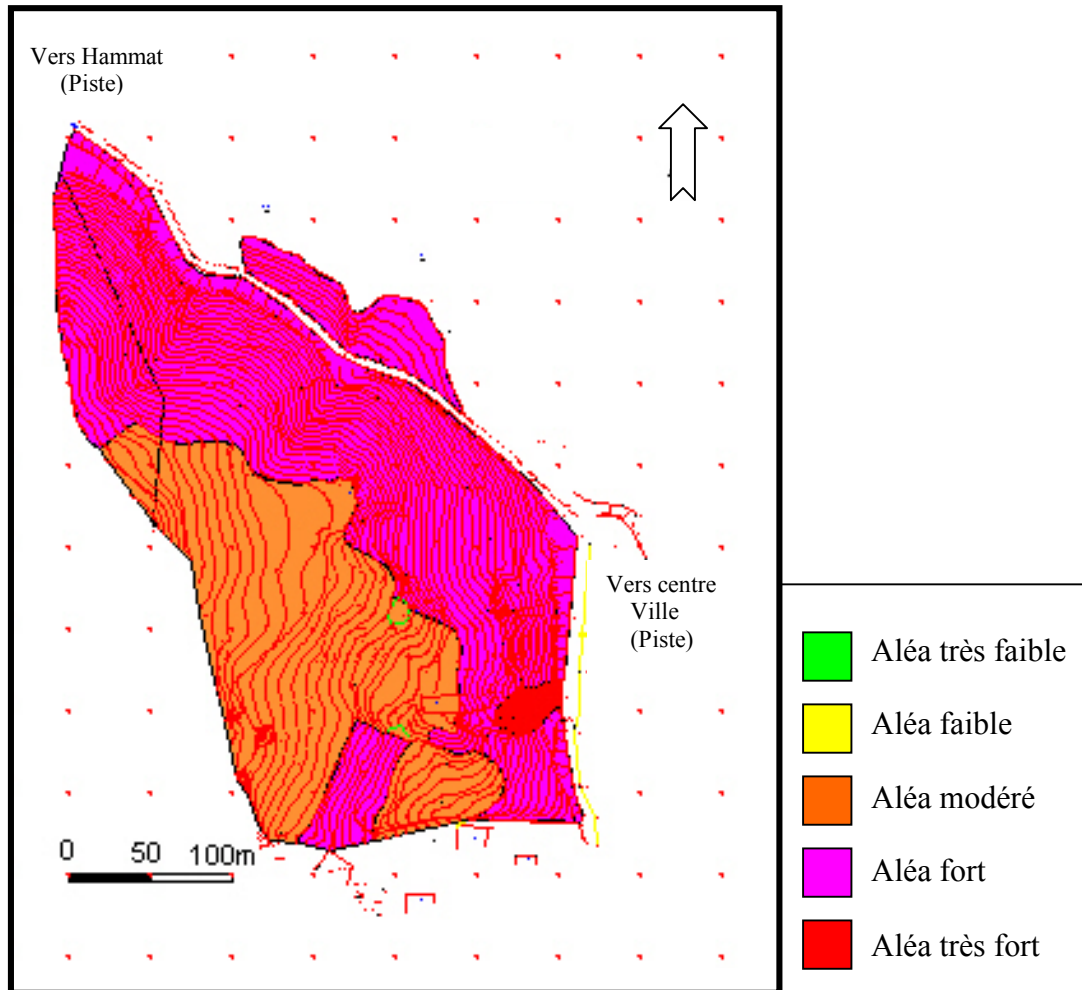


Figure 4.45 Carte d'aléa pour la parcelle 1 (méthode d'ANBALAGAN)

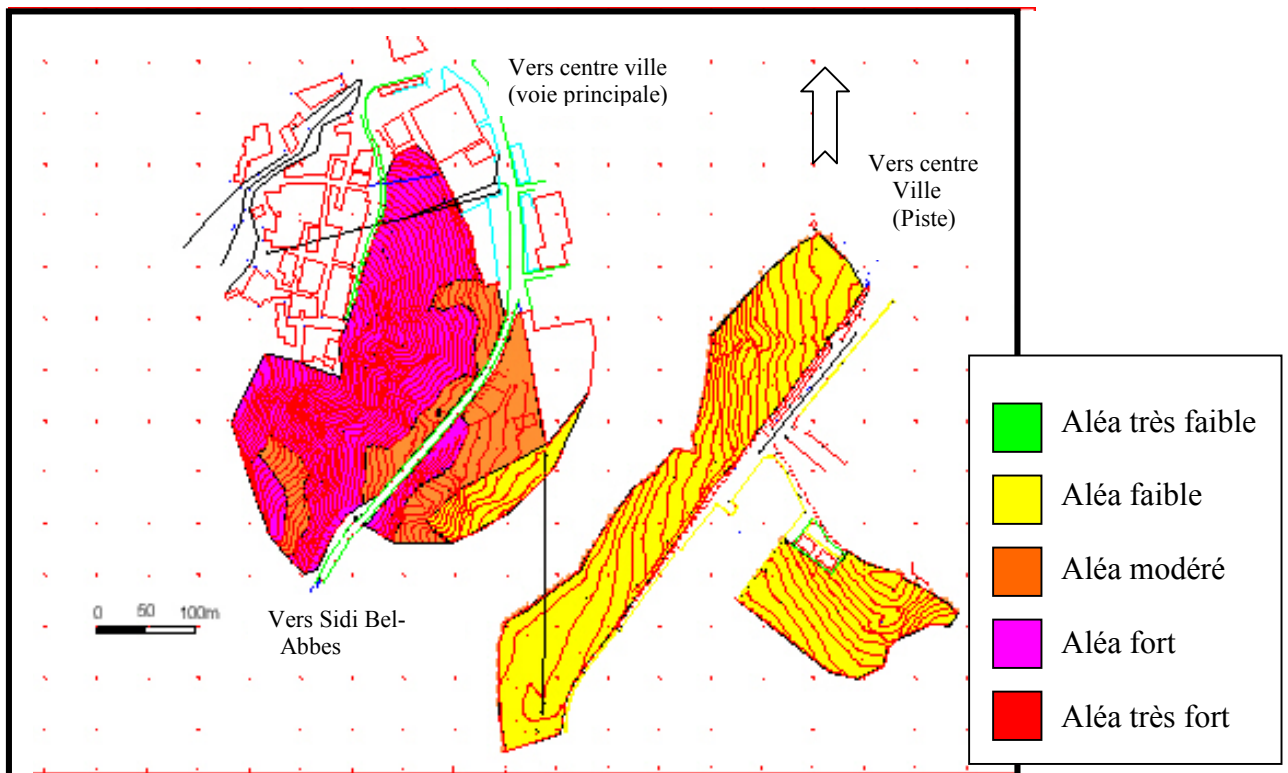


Figure 4.46 Carte d'aléa pour la parcelle 2 (méthode d'ANBALAGAN)

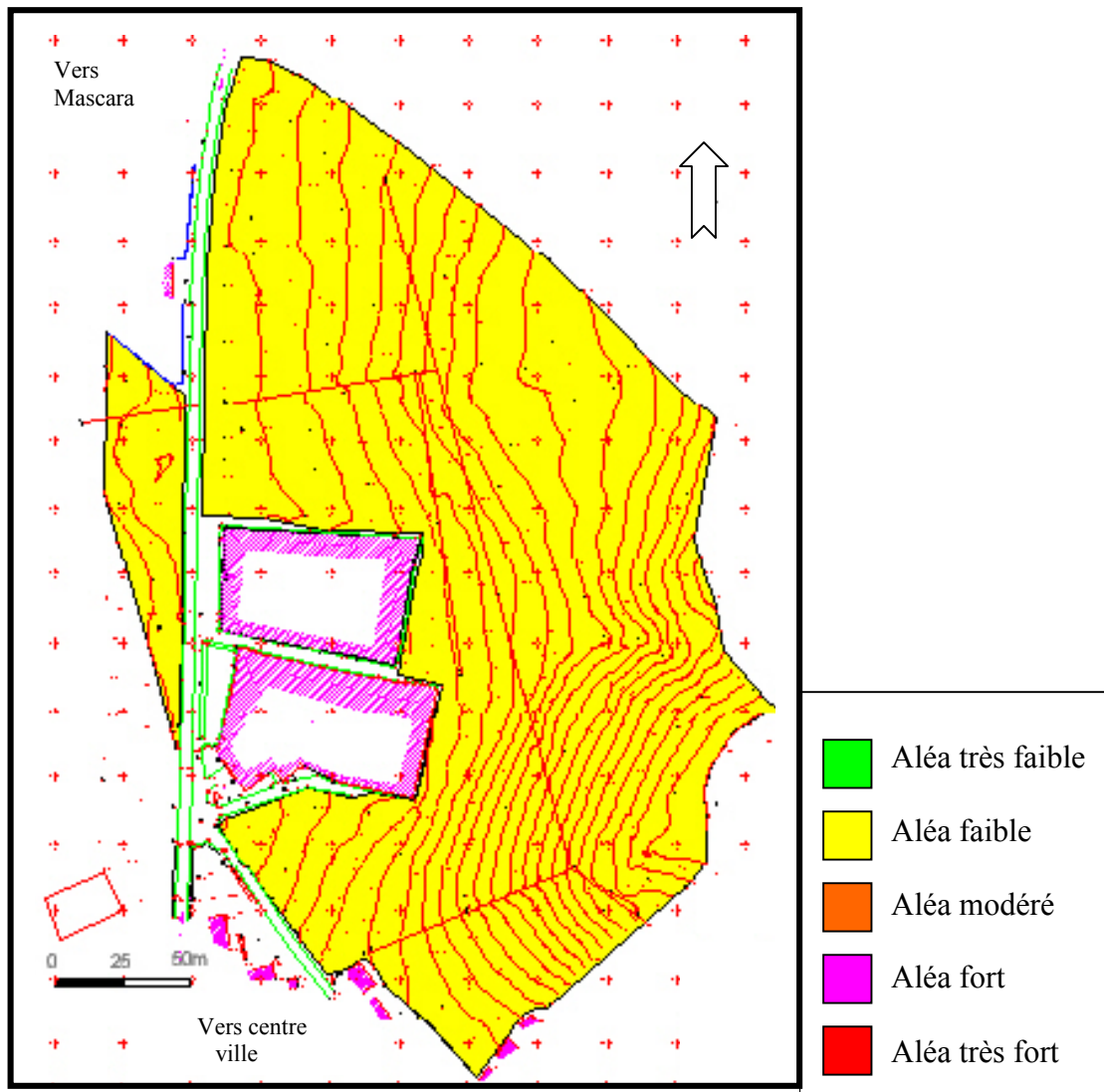


Figure 4.47 Carte d'aléa pour la parcelle 3 (méthode d'Anbalagan)

### 7.3. Méthode de calcul de stabilité

Dans cette partie on a effectué à l'aide de l'ordinateur (le logiciel FLAC élaboré par ITASCA) des calculs systématiques de stabilité (calcul du coefficient de sécurité  $F_s$ ), sur les parcelles à partir des caractéristiques de pente et de paramètres mécaniques ( $c$ ,  $\phi$ ) attribués à chaque formation et pour chaque pente.

Le degré d'aléa naturel est déterminé directement suivant les trois classes obtenues par ce calcul de  $F_s$  (figure 4.13, 4.14 et 4.15), ainsi on parvient aux cartes d'aléa (figure 4.48, 4.49 et 4.50) naturel avec les trois degrés suivants :

- Aléa faible  $F_s \geq 1.5$  ;
- Aléa moyen  $1 < F_s < 1.5$  ;
- Aléa fort  $F_s \leq 1$ .

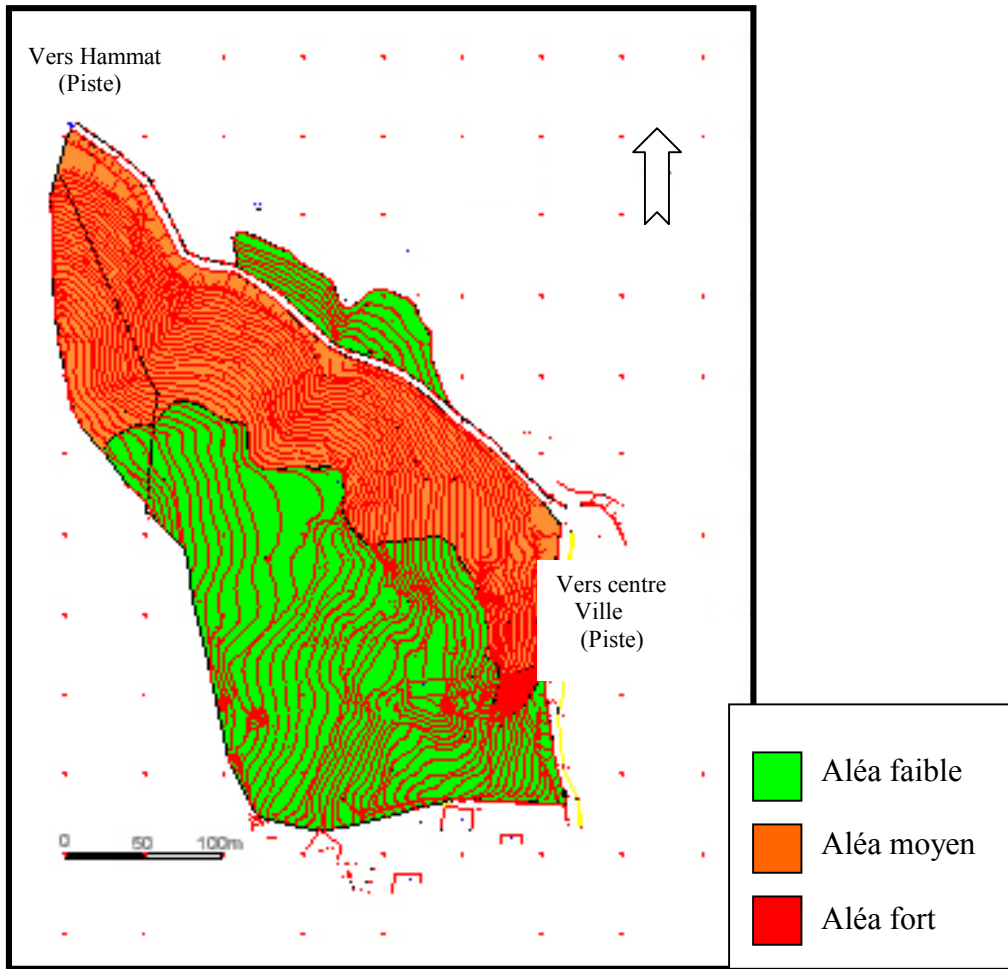


Figure 4.48 Carte d'aléa naturel pour la parcelle 1 (méthode de Fs)

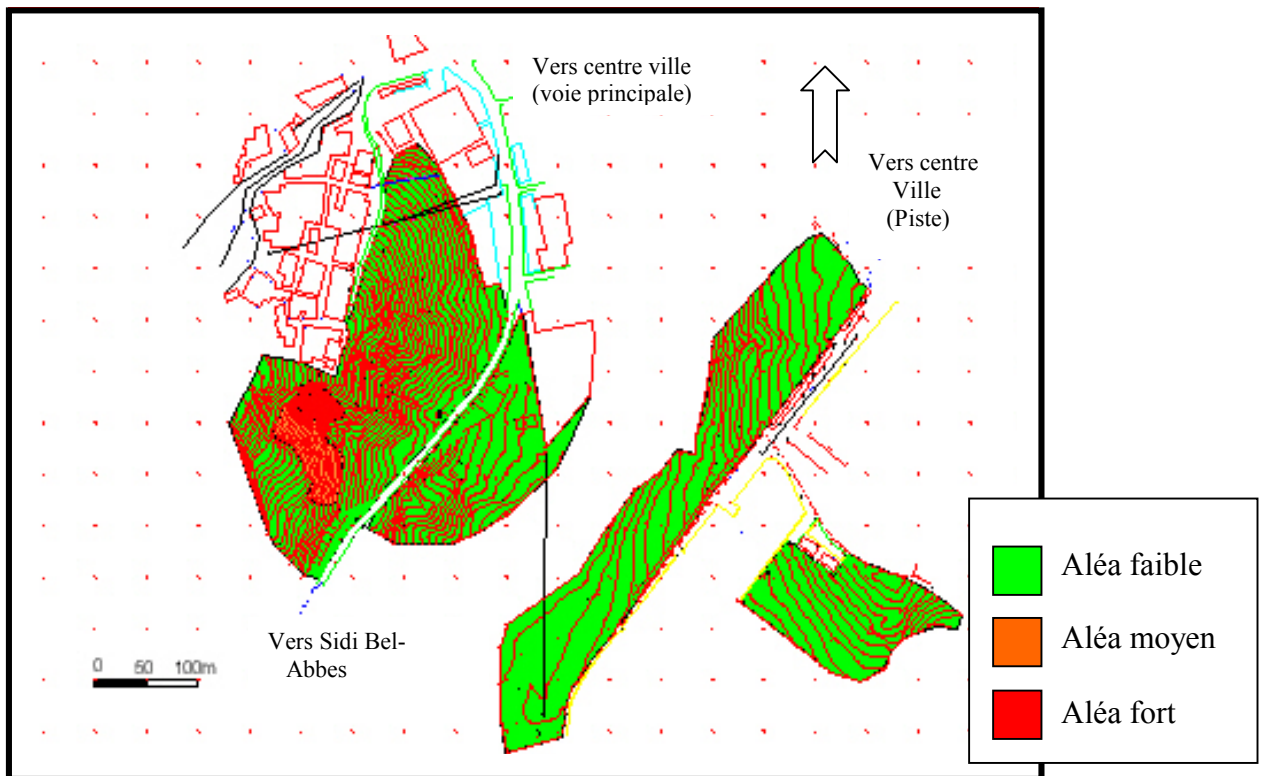


Figure 4.49 Carte d'aléa naturel pour la parcelle 2 (méthode de Fs)

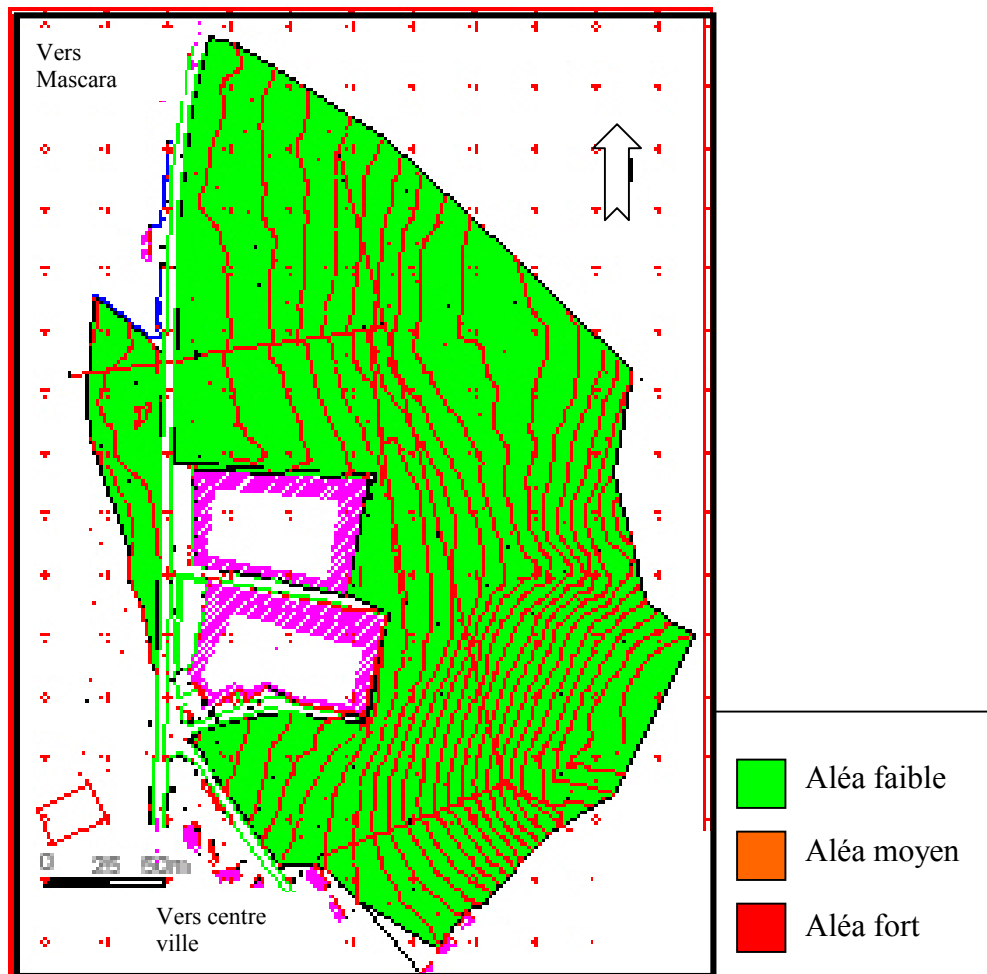


Figure 4.50 Carte d'aléa naturel pour la parcelle 3 (méthode de Fs)

#### 7.4. Comparaison entre les différentes méthodes de réalisation de carte d'aléa naturel

La première des choses et en observant les différentes cartes d'aléa naturel, une question se pose tout seule : est-ce que ces cartes sont fiables dans le sens où nous sommes dans une évaluation optimiste ou pessimiste de l'aléa ?

Malheureusement, la réponse à cette question est détenue par la nature et le temps. Pour avoir le premier cas, il suffit qu'un événement se déclenche dans une zone d'aléa qui est estimé faible ou nul. Tandis que pour avoir le deuxième cas, l'absence d'événements pendant des années confirme la stabilité satisfaisante d'une zone qui surclasse l'aléa.

Mais dans notre étude, nous essayons de répondre à cette question en comparant entre ces méthodes, puisque la satisfaction de la fiabilité sera, en général et tout d'abord, une cartographie de bonne qualité (chap.3, parag.7).

En premier lieu, la différence est représentée dans le nombre du niveau d'aléa. Nous avons 3, 4 et 5 niveaux pour les différentes méthodes, et la plus représentative pour nous, reste la méthode où on a 4 niveaux d'aléa. La carte à 3 niveaux est tout juste significative, surtout pour le degré d'aléa élevé. Tandis que pour la carte à 5 niveaux, nous avons surclassé ces derniers surtout pour le degré d'aléa faible.

Concernant l'évaluation de l'aléa, la méthode du coefficient de sécurité est optimiste par rapport aux autres. Ceci revient principalement à ce que le facteur le plus déterminant (la géomorphologie) n'est pas pris en compte dans l'évaluation de l'aléa, ainsi que le coefficient de sécurité, calculé pour toutes les pentes de notre zone d'étude, est rarement inférieur à 1, car tout les versants sont en équilibre naturel. Alors que la méthode d'ANBALAGAN surnote le facteur végétation et le facteur relief, ce qui nous conduit à une



évaluation pessimiste de l'aléa par rapport aux autres. Enfin la méthode probabiliste utilisée par FARES nous semble la plus fiable et la plus adaptée, concernant les facteurs pris en considération.

## **8. CONCLUSION**

D'après le dernier sous-paragraphe, le choix des facteurs à prendre en considération dans une évaluation de l'aléa naturel est très important pour obtenir de bons et objectifs résultats.

Alors, si on a un choix à faire concernant la carte d'aléa naturel des mouvements de pente, nous penchons pour la carte établie par le procédé probabiliste de la méthode de FARES. Elle met en interaction les trois facteurs les plus représentatifs à l'évaluation de l'aléa.

La représentation cartographique en couleurs conventionnelles d'aléa facilite la lecture et l'utilisation de ce type de carte, par un large public dans le domaine d'urbanisme et d'aménagement du territoire.

Concernant notre zone d'étude, ces cartes nous révèlent que les parcelles 1 et 2 présentent un aléa assez élevé de mouvement de pente contrairement à la parcelle 3. Ceci nous ramène à orienter l'expansion de la ville de Hammam Bou Hanifia vers le nord en sortant de cette dernière, en allant vers Mascara.

## CONCLUSION GENERALE

---

Parvenu au terme de ce travail, il est nécessaire de faire apparaître les principales conclusions, et ce qui reste à faire en vue d'envisager d'autres travaux ultérieures.

A travers l'exposé des différentes familles de mouvements de pente, nous concluons qu'elles jouent un rôle primordiale dans une perspective de gestion de l'aléa naturel. Ainsi il faut noter l'importance de la cinématique du développement de la rupture et du déplacement des masses rompues où l'eau joue très souvent un rôle majeur.

Concernant les méthodes d'évaluation de l'aléa des mouvements de pente, celles basées sur l'expérience de l'ingénieur restent les plus utilisées, car elles sont générales, simples et pratiques. Ceci malgré, la subjectivité de la démarche de ce type de méthodes, chose qu'on peut réduire par la nécessité de l'auteur à formuler par écrit sa façon d'approcher la question. Tandis que les méthodes statistiques et probabilistes, restent conditionnée par la qualité et la quantité des données dont on dispose et par des structurations informatisées élaborées.

La cartographie d'aléa des mouvements de pente est devenue la première étape dans la prévention contre les risques naturels. Elle est indispensable pour l'aménagement du territoire ; elle ouvre la voie à une meilleure prise en charge des catastrophes naturelles et elle porte, sans doute, une amélioration de la prévention de ces risques en Algérie. Elle présente, aussi, une utilité primordiale pour les services administratifs, tels que ceux de l'intérieur, l'équipement, l'agriculture, l'environnement, etc. afin d'éclairer leur choix en matière de sécurité et de choix de terrain.

Une bonne carte repose, essentiellement, sur la simplicité des éléments pris en considération, tels que la sélection de l'information, la lisibilité, la présentation. Elle s'appuie sur des systèmes de représentation logiques, cohérents avec l'information émise, qui doivent être adoptés aux objectifs fixés.

A propos de notre zone d'étude, les parcelles 1 et 2 présentent bien un aléa assez élevé de mouvements de pente, contrairement à la parcelle 3. Par conséquent, l'expansion de la ville de Hammam Bou Hanifia est moins risquée, vis-à-vis ces phénomènes, si elle se fait vers la sortie nord de la ville, c'est-à-dire sur la parcelle 3.

Ce type de carte ne doit pas être destiné seulement aux gens du domaine, autrement dit aux POS et aux dossiers techniques. A notre avis, le plus important c'est de sensibiliser un large public non initié à ce type d'étude. Ce qui aide, c'est que la représentation cartographique en couleurs conventionnelles d'aléa facilite la lecture et l'utilisation de ce type de carte.

Bref, compte tenu de la spécificité des risques de mouvements de pente dans l'ensemble du risques naturels, la poursuite et la développement de toutes ces recherches est nécessaire pour progresser dans le difficile problème de l'évaluation des ces risques et de leur délimitation sur le terrain.

Finalement, la carte de l'aléa des mouvements de pente n'est pas une fin en soi. Elles doivent toutefois répondre aux besoins des aménageurs et des constructeurs de disposer d'une documentation synthétique et aisément accessible, relative au sol et au sous sol d'une zone ou d'une région.

Les cartes réalisées ne prétendent pas à une précision absolue en raison des interpolations et extrapolations nécessaires à leur établissement. Les cartes géotechniques en générale, et les cartes d'aléa en particulier ne dispensent en aucune façon des recherches complémentaires et d'études de sol spécifiques en fonction de projets définis.

En ce qui concerne les travaux à venir, et pour des zones plus grandes, il serait souhaitable d'utiliser les photoaériennes ainsi que les images satellitaires, d'introduire des facteurs d'instabilité dynamiques tels que la sismicité, le climat, l'homme, etc.