

# I. Introduction

Vu l'importance des dégradations qu'occasionnent aux constructions et aux installations humaines les glissements de terrain, la reconnaissance des zones où peuvent apparaître ces phénomènes est de la plus grande importance pour l'aménagement du territoire. Il convient en effet de ne pas autoriser l'installation de constructions sur des terrains instables ou susceptibles de le devenir. En ces endroits les immeubles sont en effet en danger de destruction et, à la limite, la vie de leurs habitants pourrait être menacée. L'Administration de l'Aménagement du Territoire doit de ce fait connaître le plus précisément possible les zones menacées par les glissements, caractériser l'importance du risque et définir les précautions à prendre dans les zones dangereuses. En effet, l'article 136 du Code Wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et du Patrimoine (CWATUP) stipule: "Lorsque les actes et travaux [...] ou le permis [...] se rapportent à des biens immobiliers exposés à une contrainte physique majeure telle que l'inondation, l'éboulement d'une paroi rocheuse, le glissement de terrain, l'effondrement karstique ou minier, le risque sismique et la protection des eaux souterraines, l'exécution de ces actes et travaux peut être soit interdite, soit subordonnée à des conditions particulières de protection".

Par ailleurs, les articles 40, 46, 70 et 76 disposent:

Art. 40: "Le plan (de secteur) peut comporter en surimpression [...] les périmètres suivants dont le contenu est déterminé par le Gouvernement: [...]4. de risque naturel prévisible ou de contrainte géotechnique majeure [...]."

Art. 46: "l'inscription (au plan de secteur) d'une nouvelle zone destinée à l'urbanisation est incompatible avec le maintien d'un périmètre de risque naturel prévisible ou de contrainte géotechnique majeure."

Art. 70: "[...] Aucune indemnité (à charge de la Région ou de la Commune) n'est due dans les cas suivants: [...]8. pour les bâtiments détruits par une calamité naturelle, lorsque l'interdiction de leur reconstruction résulte de l'arrêté royal pris en exécution de l'article 12.§3. alinea 1<sup>er</sup> de la loi du 12 juillet 1976 relative à la réparation de certains dommages causés à des biens privés par des calamités naturelles; [...]10. interdiction de bâtir ou de lotir un terrain exposé à une contrainte physique majeure visée à l'article 136."

Art. 76: "Le Gouvernement peut édicter un ou des règlements régionaux d'urbanisme contenant toutes les dispositions destinées à assurer:

1. la salubrité, la conservation, la solidité et la beauté des constructions [...] ainsi que leur sécurité notamment leur protection contre l'incendie et les risques naturels prévisibles, en ce y compris les contraintes physiques majeures visées à l'article 136; [...]7. la protection d'un ou plusieurs périmètres visés à l'article 40."

De grands glissements de terrain affectant les versants de la crête du Pays de Herve à proximité de Battice et Thimister ont été découverts par télédétection à l'occasion de l'étude d'incidence du tronçon de la ligne à grande vitesse Herve - Forêt de Grunehaut. Les formes sont caractéristiques et de grande ampleur. Un de ces glissements est actuellement en mouvement et entraîne l'apparition de dégâts dans des immeubles situés à proximité. Une station de Distrigaz affectée par les déplacements a dû être abandonnée en raison des désordres produits par les mouvements actuels du sol. Un plan de lotissement d'une partie du terrain subissant ce glissement de terrain a été préparé par la Société Primabel et doit évidemment être abandonné.

Par ailleurs deux glissements de terrain avaient été reconnus dans le même secteur (près de Sérezé, commune de Thimister-Clermont) lorsque l'autoroute E40 fut construite. Monsieur J.M. Graulich, du Service Géologique de Belgique, qui suivait les travaux de reconnaissance géologique de l'autoroute a décrit les sondages qui ont été réalisés pour reconnaître l'importance et les limites de ces glissements (Graulich, 1969).

Une première étude des photos aériennes des communes de Herve et de Thimister a montré que des glissements de terrain semblables affectent des étendues considérables sur ces communes. Une estimation des surfaces touchées fait état de près de 100 ha. La majorité de ces glissements de terrain paraissent actuellement stabilisés; il faut cependant le vérifier et rechercher si des mouvements ne se produisent pas de nos jours. Par ailleurs, il faut se demander si de nouveaux mouvements ne peuvent

pas survenir, par exemple à la suite de fortes précipitations ou de modifications par l'homme des pentes des versants ou des niveaux des nappes aquifères. De toute manière, les zones qui sont affectées par ces glissements de terrain sont des zones potentiellement dangereuses qui doivent être considérées par l'Administration de l'Aménagement du Territoire comme inconstructibles ou qui ne pourront être construites qu'en prenant des précautions pour limiter les risques de mouvements du sol qui peuvent survenir.

Il a paru indispensable dans le cadre d'un bon aménagement du territoire, non seulement de réaliser la cartographie des zones à risque, mais aussi de distinguer les glissements de terrain qui se déplacent de nos jours et de déterminer le moment où les glissements plus anciens se sont produits. Toute estimation du risque doit évidemment tenir compte des causes de ces glissements et préciser les formations géologiques qui en sont affectées.

Le plan du présent rapport est donné ci-dessous:

1. Introduction. Le but de l'étude. Plan du rapport.
2. Quelques généralités théoriques sur les glissements de terrain.
3. La géologie de la région. Présentation des différentes formations géologiques et de leurs caractéristiques géotechniques.
4. La recherche des glissements de terrain. Etude des photos aériennes: les vols examinés, leurs caractéristiques. Les vérifications de terrain. La cartographie des glissements de terrain reconnus.
5. Les caractéristiques externes des grands glissements de terrain observés. Aspect extérieur, localisation dans la topographie, exposition.
6. Les caractéristiques internes des glissements. Assises géologiques concernées. Les fouilles réalisées. Les recherches géophysiques et leurs résultats.
7. L'âge des glissements de terrain. Les datations <sup>14</sup>C à Sérezé et à la Croix Polinard.
8. Les facteurs ayant déclenché les glissements de terrain. Evénements climatiques ou tremblements de terre? Rôle de la lithologie.
9. Les mouvements actuels. Le glissement de Manaihan: témoignages des riverains, suivi GPS, déplacements entre 1953 et 1999, cause des déplacements observés. Les mouvements reconnus dans d'autres glissements.
10. Cartographie des risques. La probabilité élevée de remise en mouvement des glissements reconnus. La carte de prédiction du risque de glissement de terrain dans la région étudiée.
11. Les mesures de prévention. Mesures à prendre en vue de limiter les interactions des glissements de terrain et de l'urbanisation: contrôle de l'eau, modifications de profil des versants.
12. Conclusion.
13. Bibliographie.
14. Résumé non technique.

## II. Quelques notions de base sur les glissements de terrain

### 1. Types de glissements

D'après Sharpe (1938), on distingue principalement 3 types de glissements de terrain (figure 2.1):

1) les phénomènes de glissement selon une surface plane comme par exemple le glissement d'une masse de roche selon un plan, sans que la masse déplacée ne subisse de déformation. On parle en français de glissement en bloc et de glissement en planche (en anglais, *block glide*),

2) les glissements rotationnels (*slump*) qui consistent en des mouvements selon une surface concave,

3) les phénomènes de fluage (*flow*) qui se produisent lorsque le matériel déplacé se comporte comme une masse visqueuse. Suivant la composition des matériaux, on parle de *rock fragment flow*, *earthflow*, *debris flow*, *mudflow*.

Tous ces mouvements peuvent être très rapides ou fort lents.

Il est rarement possible de classer un glissement de terrain dans une des catégories étroites mentionnées ci-dessus. Généralement plusieurs types de mouvements sont associés; ainsi la figure 2.2 montre un mouvement rotationnel (*slump*) complexe qui se prolonge à la partie inférieure par un mouvement de type fluage (*flow*).

### 2. Les facteurs favorisant l'apparition de glissements de terrain

De très nombreux facteurs peuvent intervenir dans le déclenchement des glissements de terrain. Les causes diverses susceptibles de jouer un rôle peuvent soit accroître l'effort qui tend à provoquer un cisaillement, soit diminuer la résistance à la rupture. Nous reproduisons ci-dessous un tableau de Selby (1970) passant en revue ces principaux facteurs.

#### 2.1. Facteurs susceptibles d'accroître l'effort de cisaillement.

1. Enlèvement de supports latéraux:

- a) érosion fluviale
- b) accroissement de la pente par les glissements de terrain
- c) excavations humaines

2. Surcharges:

- a) neige, eau
- b) **accumulation anthropique**

3. Efforts temporaires:

- a) **tremblement de terre**
- b) vibrations anthropiques

4. Enlèvement de supports sous-jacents:

- a) érosion souterraine par dissolution ou transfert des éléments fins
- b) activités minières

5. Pression latérale:

- a) eau pénétrant latéralement
- b) augmentation de volume d'une argile s'hydratant

Glissement en planche  
ou en bloc (*glide*)

Glissement rotationnel  
(*slump*)

Fluage (flow)

*Figure 2.1. Les différents types de glissement.*

*Figure 2.2. Nomenclature des différentes parties d'un glissement de terrain.*

## **2.2. Facteurs susceptibles de diminuer la résistance à la rupture.**

1. Composition et granulométrie des matériaux:

- a) faible cohérence des matériaux, pouvoir élevé de rétention de l'eau
- b) matériaux faiblement compactés
- c) grains de forme lisse, minéraux tendres aplatis, tels que mica, serpentine,...

**2. Pénétration de l'eau dans les argiles (pluies violentes, remontée de la nappe, etc.):**

- a) nature des argiles ( en relation avec leur hydratation potentielle)
- b) présence de cations échangeables
- c) séchage des argiles (ouvrant des fissures et permettant la pénétration d'eau)

**3. Effet de l'eau comprise dans les pores du matériau:**

- a) effet de la poussée d'Archimède
- b) réduction de la tension capillaire

**4. Structure générale:**

- a) discontinuités comme celles dues aux failles, à la stratification, aux joints,.. spécialement quand elles sont en pente vers la paroi
- b) alternance de couches perméables et imperméables.

Les glissements de terrain déclenchés à la suite de fortes précipitations apparaissent dans ce tableau comme résultant de la pénétration d'eau dans les argiles (point 2 du tableau ci-dessus) et surtout comme la conséquence d'une variation de la pression de l'eau comprise dans les pores du matériau (point 3 du tableau ci-dessus).

La figure 2.3 représente une coupe distinguant les trois principales zones à différencier en ce qui concerne l'eau du sol. Cette même figure exprime la pression interstitielle de l'eau mesurable sur le terrain: pression positive sous la nappe aquifère et pression négative au dessus de celle-ci (non seulement dans la zone capillaire saturée mais aussi dans la zone supérieure non saturée). Ces pressions négatives (succions) proviennent des forces de tension superficielle capillaire qui se développent entre l'eau localisée entre les grains du sol et ceux-ci. La contrainte effective est ainsi maintenue à des valeurs élevées au dessus de la nappe aquifère et permet (s'il ne se produit pas d'infiltration des eaux de pluie) de conserver des pentes naturelles raides.

L'eau de pluie qui s'infiltre dans le sol peut déterminer une élévation de la nappe aquifère et faire passer une partie du profil d'une pression interstitielle négative à une pression positive. Mais en outre et c'est de loin le phénomène le plus important, l'eau en s'infiltrant dans le sol peut effacer ou diminuer la pression négative de la zone située au dessus de la nappe aquifère (figure 2.4) . C'est ainsi que par l'intermédiaire de la variation de pression de l'eau de pore du sol, les fortes pluies ont un effet déterminant sur le déclenchement des glissements de terrain.

*Figure 2.3. Les trois principaux domaines de l'eau du sol (Gostelow, 1991a, p. 147). La pression interstitielle mesurée est positive dans la nappe aquifère et négative au-dessus de celle-ci.*

*Figure 2.4. Modification de la pression de l'eau du sol après une précipitation. En trait continu, répartition de la pression avant la précipitation. En tiretés, répartition après celle-ci. L'infiltration fait monter la nappe aquifère, mais surtout transforme la pression interstitielle négative de la zone située au-dessus de la nappe en pression positive, diminuant ainsi considérablement la résistance au cisaillement (Gostelow, 1991a, p. 149).*

*Figure 2.5. Courbe de la variation de la contrainte cisailante (shear stress) à exercer en fonction de la déformation progressive d'un matériau n'ayant pas encore subi de rupture (Gostelow, 1991a, p. 39). Une fois le cisaillement réalisé, la déformation est beaucoup plus facile.*

### **3. Précipitations exceptionnelles ou tremblements de terre?**

Nous avons fait apparaître en gras dans le tableau les facteurs principaux dont l'influence peut avoir joué dans l'apparition des glissements du Pays de Herve. Nous venons de souligner le rôle des précipitations dont un des effets est la variation de la pression de l'eau dans les pores du sol. Nous discuterons spécialement dans ce rapport du rôle possible des tremblements de terre qui accroissent temporairement l'effort de cisaillement. La distinction entre les deux mécanismes est importante car le risque de voir réapparaître des phénomènes semblables est étroitement lié à la fréquence d'occurrence soit des tremblements de terre, soit des précipitations.

#### **3.1. Premier glissement ou remise en marche d'un ancien glissement?**

Les deux cas sont différents car les remises en mouvement sont beaucoup plus faciles à déclencher. Il faut insister au départ sur le fait que, comme Gostelow (1991b) le montre, la première apparition d'un glissement ou sa remise en marche sont des phénomènes qui ne répondent pas de la

même manière à des sollicitations identiques et que, de ce fait, ces deux types de mouvement doivent être considérés séparément.

La courbe donnée à la figure 2.5 montrant la relation entre résistance au cisaillement et déformation permet d'en comprendre la raison. Dans un glissement de terrain qui commence, la résistance à la déformation s'accroît au départ avec le déplacement. Cette résistance atteint un maximum au moment où le glissement se déclenche et immédiatement après, pour une majorité des matériaux, la résistance diminue considérablement. Lorsque le mouvement s'arrête la résistance à un nouveau déplacement reste faible par rapport à la résistance de départ, tout simplement parce que dans la masse subsiste un ou des plans de cisaillement selon lesquels le glissement reste facile.

L'apparition du premier mouvement nécessite donc un effort beaucoup plus grand que celui nécessaire à une remise en mouvement ultérieure. Par ailleurs, lors du premier mouvement la diminution de la résistance au déplacement va entraîner immédiatement après la rupture un déplacement de plusieurs dizaines de mètres. Les glissements de terrain qui apparaissent pour la première fois sont de ce fait souvent catastrophiques et entraînent des pertes en vies humaines.

Par contre des remises en marche de glissements anciens peuvent se produire sur des pentes plus faibles (souvent entre 10 et 20 ° selon Gostelow) que celles sur lesquelles apparaissent les premiers mouvements. Les réactivations peuvent se produire pour de faibles augmentations de l'effort de cisaillement ou de faibles diminutions de la résistance au cisaillement. La progression est en moyenne inférieure à un mètre par an, ce qui est toutefois bien suffisant pour causer d'énormes problèmes aux ingénieurs.

Il faut aussi souligner que la rapidité de réponse aux précipitations dépend selon certains auteurs de la profondeur à laquelle se situe la zone de cisaillement et de la vitesse de circulation des eaux. Une réponse rapide à des précipitations de forte intensité se produit immédiatement pour les glissements superficiels, tandis que des glissements profonds se déclenchent souvent à la suite de périodes pluvieuses beaucoup plus longues, s'étendant éventuellement sur plusieurs semaines.

### **3.2. Relations empiriques entre la durée des précipitations et les glissements de terrain**

Gostelow (1991b) a rassemblé de nombreuses observations publiées sur la relation unissant précipitations et glissements de terrain. Il souligne que ces travaux ne fournissent pas de lien direct entre les deux phénomènes car c'est l'augmentation de la pression de l'eau dans les pores du sol qui déclenche le plus souvent les glissements. Ces études ne prennent pas en compte la géologie et la géomorphologie, toutefois elles se sont révélées être utiles pour l'aménagement du territoire et les travaux des ingénieurs, en permettant par exemple en Californie et à Hong-Kong d'utiliser un réseau de pluviographes comme système permettant d'annoncer les risques de glissement. Il n'y a toutefois pas d'accord sur la meilleure manière de mettre en relation précipitations et mouvements de masse d'autant plus qu'il est clair qu'il n'y a pas de relation simple et généralement applicable entre les deux phénomènes.

Les quatre conclusions générales que Gostelow (1991b) retient de ces études sont les suivantes:

1) Si le total mensuel des précipitations a dépassé auparavant 250 mm, n'importe quelle précipitation de haute intensité peut déclencher de nouveaux glissements peu profonds sur des pentes dangereuses

2) des précipitations de haute intensité (> 70 mm/heure) déclenchent l'apparition de nouveaux glissements

3) des totaux de précipitations tombées en 24 h peuvent être le plus efficacement utilisés pour les prévisions, en considérant le seuil dangereux à environ 100 mm

4) Les remises en marche de glissements anciens ont des seuils de déclenchement différents.

Plusieurs de ces notions seront évoquées dans les chapitres suivants et devaient être rappelées au début de ce travail.

### **III. Géologie et géotechnique**

#### **1. Géologie**

##### **1.1. Les sources de renseignements considérées**

Les glissements de terrain situés au sud de l'autoroute sont sur le territoire de la nouvelle carte géologique au 1/25.000, Fléron-Verviers (42/7-8) publiée en juin 1996. Au nord de l'autoroute, tous les glissements étudiés se trouvent sur la carte géologique Dalhem-Herve (42/3-4) qui est actuellement à l'impression. Les auteurs de cette dernière carte, Messieurs Marion et Barchy, ont assisté à tous les comités d'accompagnement, sont venus avec nous plusieurs fois sur le terrain et nous ont fourni tous les renseignements demandés. Nous avons d'autre part reçu de la Région Wallonne, grâce à Monsieur C. Delbecq, Directeur Général à la D.G.R.N.E. et à Monsieur L. Franssen, Premier Attaché, les tracés digitalisés des cartes géologiques, ce qui a facilité la réalisation des documents graphiques. Nous prions toutes ces personnes qui nous ont aidés de trouver ici l'expression de nos remerciements.

Par ailleurs nous avons eu accès à l'étude géologique réalisée en 1995 par les Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrologie et de Prospection géophysique de l'Université de Liège dans le cadre de la réalisation du tronçon T.G.V. Josée-Welkenraedt. De nombreuses données ont été rassemblées par les auteurs de cette étude. Elles consistent principalement dans les renseignements fournis par les cartes géologiques anciennes, les données accumulées dans les dossiers du Service Géologique (Bruxelles) mais aussi dans des publications qui se rapportent à la géologie de la région. Les renseignements contenus dans ce travail résultent aussi d'une importante campagne de reconnaissances géologique, géophysique et géotechnique qui a été menée pour l'essentiel au cours de l'année 1994 et pour laquelle 86 forages ont été réalisés.

Il faut encore signaler comme source de renseignements extrêmement précieuse pour notre travail la publication de J. M. Graulich (1969), qui rassemble les données obtenues par sondage lors de l'étude préalable à la réalisation de l'autoroute.

Ajoutons enfin que des renseignements concernant les anciennes exploitations minières nous ont été fournis par Monsieur Alain Marche, de la Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement de la Région Wallonne, Division de la gestion du sous-sol.

##### **1.2. La structure géologique et la stratigraphie**

La carte géologique d'ensemble (fig. 3.1), les cartes à plus grande échelle (fig. 3.2, 3.3 et 3.4) et le profil réalisé selon le tracé du futur TGV, c'est à dire immédiatement au sud de l'autoroute (fig. 3.5), permettent d'avoir une vue d'ensemble de la géologie de la région considérée. Le profil présenté, basé sur les nombreuses recherches réalisées pour la réalisation de l'autoroute et du futur TGV, est le profil le plus exact qui puisse être donné à ce jour. Tous les glissements importants se trouvent à moins d'un km de ce profil dont le tracé est donc excellent pour notre travail. Ce profil fait directement apparaître les formations de la région à savoir:

- 1) à la partie inférieure, des formations paléozoïques (Houiller) fortement plissées
- 2) reposant sur le Paléozoïque, les formations meubles du Crétacé, qui correspondent aux parties les plus élevées du relief et qui sont affectées par les glissements de terrain
- 3) au-dessus de ces formations, des dépôts quaternaires généralement limoneux mais toujours peu épais.

Les terrains crétacés sont subhorizontaux (pendage général de 1,5 % vers le NNO) et reposent en discordance sur une pénélaine ancienne qui a nivelé le socle primaire. Celui-ci est pour sa part constitué de roches carbonifères qui ont été plissées et charriées lors de l'orogénèse hercynienne. La majeure partie de la zone considérée se trouve sur des terrains houillers. Il n'existe à la Région wallonne (division de la gestion du sous-sol, qui a repris les documents du Corps des mines) aucun document mentionnant l'existence passée de travaux miniers sous les glissements de terrain observés.



Une bonne partie du territoire étudié se trouve d'ailleurs en dehors de toute concession minière. Il convient aussi d'insister sur le fait que le profil donné sur la figure 3.5 exagère 25 fois les hauteurs et que, en conséquence, l'image que donne cette figure, est fortement déformée.

*Figure 3.1. Carte géologique générale de la région étudiée.*

*Figure 3.2. Carte géologique détaillée de la zone comprise entre Battice et Clermont, où se trouvent presque tous les glissements observés.*

*Figure 3.3. Carte géologique détaillée de la région au nord de Herve, où se trouve le glissement de terrain de Bolland.*

*Figure 3.4. Carte géologique détaillée de la région d'Aubel, où se trouve un glissement de terrain possible isolé.*

*Figure 3.5. Profil géologique suivant le tracé du TGV (contigu ici à l'autoroute) dans la zone où se trouvent la majorité des glissements de terrain.*

**Tableau lithostratigraphique**

| <i>Groupe</i>      | <i>Système</i> | <i>Sous-système</i> | <i>Etage</i>  | <i>Formation</i> | <i>Lithologie</i>                                             |
|--------------------|----------------|---------------------|---------------|------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Quaternaire</b> |                |                     |               |                  | Limons, dépôts de pente, alluvions                            |
| <b>Tertiaire</b>   | Oligocène      |                     | Tongrien (?)  |                  | Sables moyens à fins et graviers                              |
| <b>Secondaire</b>  | Crétacé        | Sénonien            | Maastrichtien |                  | Argile à silex résiduelle (tuffeau de Maastricht)             |
|                    |                |                     | Campanien     | Gulpen           | Craie                                                         |
|                    |                |                     |               | Vaals            | Argile marneuse glauconifère (smectite de Herve)              |
|                    |                |                     | Santonien     | Aachen           | Sables jaunes et blancs souvent fins, silts, niveaux argileux |
| <b>Primaire</b>    | Carbonifère    | Silésien            | Westphalien   |                  | Shales et siltites à lits de grès et niveaux de houille       |
|                    |                |                     | Namurien      |                  | Shales et siltites avec bancs de grès et de quartzite         |

### 1.3. Description lithologique

#### 1.3.1. Les roches primaires

Les roches primaires de la zone concernée sont uniquement des roches du Groupe houiller. Répétons qu'elles sont formées à la partie inférieure (Namurien) de shales parfois schisteux avec des niveaux de grès et de minces couches de shale charbonneux et pyriteux non exploitables, tandis que la partie supérieure (Westphalien) est constituée principalement de roches argilo-silteuses avec des niveaux de grès et comprend des couches de charbon qui ont été exploitées. Les nouvelles cartes géologiques ne mentionnent pas la limite entre le Westphalien et le Namurien parce qu'il n'existe pas de différence lithologique significative à ce niveau.

Le sommet du Primaire est partout altéré. Cette altération existe directement sous le Crétacé car elle est antérieure au dépôt de ces dernières formations. Elle résulte de l'exondation de cette zone depuis le Permien jusqu'à l'arrivée de la mer au Crétacé supérieur (Santonien). Cette altération a souvent posé des problèmes lorsqu'il a fallu reconnaître dans les sondages et mesures géophysiques le contact entre les formations crétacées (mésozoïques) et les formations paléozoïques. La confrontation des données obtenues il y a 30 ans, lors des travaux de l'autoroute, avec la description des sondages réalisés pour la L.G.V., ainsi que les échanges que nous avons eus avec les auteurs des nouvelles cartes géologiques nous ont amenés à localiser ce contact plus bas (jusqu'à 8 m, rue Trou du Bois) que ne le donne l'étude géologique et à modifier des points de détail du profil. La figure 3.5 n'est donc pas la simple transposition des données proposées par les reconnaissances géologique, géophysique et géotechnique du TGV mais un profil corrigé.

#### Les exploitations minières

La concession de Herve - Wergifosse s'étend à l'ouest de l'échangeur de Battice. Des anciens puits miniers sont connus jusqu'au ruisseau du Hak, et uniquement à l'ouest de celui-ci. Seul le glissement 11 se trouve au-dessus de cette concession, mais à sa bordure, dans une zone qui n'a pas été exploitée.

A l'extrémité est de la zone considérée, une autre concession minière a été accordée en 1827. Cette concession connue sous le nom de "concession de Baelen" a été déchuée le 14 mars 1927. La limite de cette concession ne s'étend jusqu'à aucun glissement décrit et s'arrête à la ligne de crête

suivie par la route vers Henri-Chapelle entre Counhaie (à l'est de Clermont, km 120,7) et la Croix de Pierre (km 123).

Au sud une concession, dite de Houlteau, a été accordée en 1828 et révoquée en 1925. Cette concession localisée au sud de l'autoroute et à l'est de Chaineux, ne s'étendait nulle part sous les glissements de terrain que nous avons reconnus.

La concession de la Minerie dont le siège se trouvait à Battice ne dépassait pas vers l'est le méridien de Thimister. Les glissements que nous désignerons sous les numéros 1, 2, 3, et 4 dans le chapitre 4 sont localisés à la bordure nord de cette concession. Les travaux les plus proches connus ont été réalisés après que la concession de la Minerie ait été reprise par le Charbonnage de Battice. Dans les années 1950 à 1959, ces travaux sont venus jusqu'à 253.640 et 150.312 (coordonnées Lambert) à des niveaux assez proches de la surface puisque jusqu'à des altitudes de +54 m. On se trouve là-bas à environ 700 m du glissement de la Croix Polinard. Il subsiste cependant un certain doute à propos de la localisation des anciennes exploitations dans la zone située à proximité car tous les documents qui ont existé sur les travaux miniers n'ont pas été retrouvés.

### 1.3.2. Les terrains secondaires

De la base au sommet, les formations qui seront rencontrées au dessus du Primaire sont les formations d'Aachen, de Vaals, de Gulpen et des argiles à silex résiduelles, produit de la dissolution de la formation de Maastricht.

Bien représentée dans l'est du Pays de Herve, la formation d'Aachen se termine en biseau entre le Houiller et la formation de Vaals au sud-ouest de Battice, au lieu dit Heneumont, comme le montre bien le profil de la figure 2.

L'épaisseur de cette formation atteint rapidement 10 m sur le versant qui domine à l'ouest l'échangeur de Battice. Il s'agit de sables blancs à jaunes, fins, moyens et grossiers, parfois argileux, à stratification entrecroisée ou oblique. On y rencontre aussi des horizons oxydés et charbonneux ainsi que des niveaux indurés (grès de Moresnet).

La formation de Vaals, qui est souvent appelée "smectite de Herve" dans la région, est constituée d'argiles glauconifères marneuses, parfois sableuses avec des niveaux indurés. Son épaisseur maximum reconnue sous la ligne du T.G.V. est de 25 m au sud de Herve.

La base de la formation de Gulpen est composée de craies glauconifères auxquelles succèdent vers le haut des craies blanches avec ou sans silex. Des poches de dissolution existent au sommet. Leur remplissage peut être composé de sables, d'argiles ou de limons. Là où les craies ont été entièrement dissoutes subsiste un résidu de dissolution composé d'argiles à silex ainsi que de silts et de limons. On ne peut distinguer la formation de Gulpen altérée des résidus de la formation de Maastricht (tuffeau de Maastricht) qui a été également entièrement dissoute et dont il ne reste aussi qu'un conglomérat à silex dans une matrice argileuse, avec très localement des passées de sable. La formation de Gulpen n'apparaît pas sur notre profil 3.5 car le T.G.V. ne passe pas au sommet de la crête du pays de Herve. Elle peut être observée cependant près du fort de Battice en amont du glissement n° 3 que nous dénommons glissement de la Croix Polinard.

### 1.3.3. Les restes tertiaires

Des vestiges résiduels des transgressions tertiaires sont localisés dans des poches de dissolution de la craie. Il s'agit de sables mêlés de lentilles d'argile sableuse. Les sables moyens à fins sont bien classés et souvent micacés. Ces matériaux sont parfois accompagnés de dragées de quartz ou plus rarement par un gravier quartzitique. Ils sont considérés comme d'âge oligocène (Tongrien?). Il s'agit de placages ou de remplissages de poches de dissolution dont l'importance est négligeable pour la présente étude.

### 1.3.4. Les dépôts quaternaires

Pour être tout à fait complet, il faut citer les dépôts quaternaires qui existent principalement dans les fonds de vallon et sur les surfaces sommitales peu inclinées. Il s'agit principalement de limons éoliens qui ont été déposés pendant la dernière glaciation et ont été remaniés sur les pentes par des

processus de solifluxion et par le ruissellement, lesquels y ont incorporé des éléments du substratum. Dans les plus grands vallons existent quelques minces dépôts fluviatiles laissés par les ruisseaux. Au total, les dépôts quaternaires sont peu importants et ne dépassent guère, dans la zone étudiée, un ou deux mètres d'épaisseur.

Des remblais accumulés par l'homme sont signalés en plusieurs endroits.

#### **1.4. Tectonique**

La zone étudiée est parcourue par un réseau dense de failles radiales orientées NNO-SSE. D'origine varisque, les plus importantes d'entre elles ont encore connu une activité post-paléozoïque, voire actuelle, en relation avec le développement du segment bas-rhénan du rift ouest-européen. Dans la zone de Battice – Thimister, elles délimitent notamment le petit graben de La Minerie, bordé à l'est par les failles d'Ostende et de Mouhy et à l'ouest par celle de Monty (Ancion & Evrard, 1957). La faille d'Ostende constitue en réalité un segment de la zone faillée de Hockai (notée "HFZ" sur la figure 3.1), reconnue pour être sismogénique (Camelbeeck, 1993; Camelbeeck *et al.*, 1998).

Les données recueillies par prospection sur le tracé du futur TGV immédiatement au sud de l'autoroute montrent également une série de décrochements du bedrock paléozoïque avec des allures en petits horsts et en petits grabens.

## **2. Propriétés géotechniques des différentes formations**

Les formations géologiques du secteur étudié ont toutes, sauf la craie sommitale, de mauvaises caractéristiques géomécaniques.

Les échantillons prélevés dans le Houiller altéré ont montré des caractéristiques impropres à la réutilisation en matériaux de remblais et de couche de forme sans traitement à la chaux.

Les matériaux de la formation d'Aachen posent des problèmes très graves de stabilité qui ont été soulignés dans l'étude géologique de l'autoroute puis dans celle du TGV. Ils présentent des risques de boulanges qui ont été très sérieusement pris en compte et ont compliqué la construction de l'autoroute (installation de drains entre des rideaux de palplanches pour abaisser la nappe avant de dégager les talus). Les glissements de terrain qui se produisent actuellement dans ces formations sur les talus de l'échangeur d'Elsaute (figure 3.6, datant de mars 1999) illustrent bien les dangers liés à cette formation. En outre, les sables d'Aachen sont impropres à la réutilisation en remblais et en couche de forme, sauf traitement à la chaux. Ces matériaux ont d'ailleurs été accumulés au sud de l'autoroute, 500 m au sud de l'échangeur d'Elsaute, alors que de l'autre côté de l'autoroute le Houiller était excavé pour obtenir des matériaux aptes à être utilisés comme remblais (Graulich, 1969).

L'utilisation des matériaux de la formation de Vaals en remblais et en couche de forme est qualifiée dans l'étude géologique du TGV de délicate, voire d'impossible, tandis que les résidus de dissolution des formations de Maastricht et de Gulpen sont tout simplement qualifiés d'inutilisables pour ces usages. Leur portance est faible et il s'agit de matériaux gonflants. En outre ils sont susceptibles de glisser.

Les qualités géotechniques des dépôts quaternaires sont aussi mauvaises en partie parce qu'ils remanient les formations crétacées que nous avons décrites précédemment. Ils sont qualifiés dans l'étude géotechnique de "difficilement utilisables en remblais et en couche de forme".

Au total, les études géotechniques ont clairement mis en évidence l'instabilité des formations crétacées et quaternaires qui se trouvent au dessus du Houiller dans la région étudiée. C'est à partir de ces formations que se sont développés les glissements de terrain auquel est consacrée la présente étude.



*Figure 3.6. Glissement de terrain affectant les talus de l'échangeur d'Elsaute sur la commune de Thimister. Photo prise le 19 mars 1999.*

## **IV. Identification des glissements de terrain**

### **1. Les documents consultés**

Les glissements de terrain ont d'abord été reconnus par examen stéréoscopique de photos aériennes. Il est possible ainsi d'examiner l'ensemble du territoire et de reconnaître les endroits où des glissements sont probables car leur expression morphologique est presque toujours extrêmement apparente. Cet examen de photos aériennes nécessite cependant des vérifications de terrain. Celles-ci restent indispensables pour s'assurer de la validité de la photo-interprétation, c'est-à-dire de la réalité des phénomènes, de leur importance, et pour rechercher des indices de déplacements récents.

Nous avons examiné plusieurs couvertures aériennes du Pays de Herve. Les photos les meilleures sont les photos IGN prises en 1947 à l'échelle du 1/10000. Il s'agit d'une des premières missions photographiques, qui présente l'inconvénient d'un mauvais plan de vol. De petites zones du territoire n'ont pas été couvertes et les recouvrements des photos ne sont pas toujours suffisants, aussi la vision stéréoscopique de certaines zones n'est parfois pas possible. Par contre l'échelle est très favorable à une étude détaillée du territoire. D'autre part, ces photos de 1947 permettent de reconnaître quelle était la situation il y a plus de 50 ans, avant la construction de l'autoroute. Les cartes topographiques du Pays de Herve 34/7-8 et 42 sont couvertes par ces photos.

Par contre, l'est du Pays de Herve, à savoir la feuille 43, n'a pas de couverture semblable. Nous avons utilisé pour notre recherche le vol IGN du 30-4-1971 au 1/18500 qui est aussi de très bonne qualité quoique l'échelle soit moins favorable. Comme ce vol s'étend aussi sur l'ouest du pays de Herve, nous avons pu observer sur celui-ci les zones qui n'étaient pas stéréoscopiquement observables sur le vol de 1947.

Le glissement de Manaihan (du nom du carrefour proche qui se trouve sur la route Verviers - Battice), actuellement actif, n'était pas couvert par les photos de 1947. Vu l'intérêt que présente ce glissement, nous avons recherché une autre couverture aérienne détaillée, la plus ancienne possible. Cette zone a été couverte par un vol local datant du 9-10-1953 (identification 114/10G-11A) et réalisé par le Ministère des Travaux Publics (figure 4.1). Ce vol à l'échelle d'environ 1/10000 a permis de bien reconnaître la topographie et l'occupation humaine à cette époque. Comme nous le verrons plus loin, une carte du relief extrêmement détaillée du glissement a été réalisée à partir de ces photos et a été comparée avec la situation actuelle. Des photos du même glissement prises le 21-4-1960 existent également au Ministère des Travaux Publics (identification: mission 122E; photos 68058-59-60). Bien que ces photos soient au 1/7500, le relief est moins apparent car l'éclairage est moins favorable.

### **2. Description sommaire des glissements observés**

La topographie des glissements de terrain que nous avons reconnus est caractérisée par quatre éléments principaux: 1) à l'amont, un abrupt marqué qui correspond à la zone de départ du glissement; en plan, cet abrupt présente un tracé courbe, 2) une alternance de rides et gouttières dans la partie supérieure du glissement, relief grossièrement parallèle à l'abrupt sommital qui détermine localement des contre-pentes, 3) une topographie irrégulière marquant la moitié inférieure du glissement, 4) enfin le plus souvent, un abrupt net marquant l'extrémité aval du glissement.

Les cartes 4.2, 4.3 et 4.4 donnent la localisation des glissements qui ont été reconnus dans le Pays de Herve. Il est remarquable que tous les grands glissements soient groupés dans une zone étroite s'étendant entre Battice et Clermont.

Nous considérerons d'abord les glissements situés au nord de la crête du Pays de Herve en allant de l'ouest vers l'est puis nous passerons en revue les glissements répartis sur le versant méridional de la même crête, avant d'examiner ceux qui sont localisés le long du pédoncule méridional de la crête, que suit la route de Battice à Verviers. Nous verrons ensuite les rares glissements situés en d'autres points du Pays de Herve.

*Figure 4.1. Agrandissement d'une partie de la photo 6.6915 10 G prise le 9-10-1953 et montrant le glissement de Manaihan (n° 14 sur la carte 4.2). Cette photo et une photo voisine ont été utilisées pour obtenir par stéréophotogrammétrie la carte du relief en 1953 donnée dans le chapitre 9.*

## **2.1. Glissements de terrain au nord de la crête du Pays de Herve de Battice à Clermont**

Le glissement le plus à l'ouest localisé sur le versant nord de la crête se trouve au nord de la route au lieu-dit Stockis (n° 1 sur la carte 4.2 et figure 4.5). Il affecte une bande de terrain large d'environ 160 m et la masse déplacée présente la morphologie très caractéristique signalée ci-dessus, avec des rides plus ou moins parallèles à la pente du terrain et un abrupt terminal bien marqué. La forme est quelque peu oblitérée par le fait que l'abrupt de départ n'est pas un abrupt simple. Il est possible que des matériaux aient été extraits dans la zone de départ du glissement, ce qui en aurait altéré la forme originelle. La masse qui a glissé s'est déplacée vers le nord dans la tête d'un petit vallon. La ferme rénovée située au bord de la route paraît à la limite du glissement de terrain. La rénovation de l'immeuble d'habitation a effacé toute trace éventuelle de dégradation. Une petite annexe

*Figure 4.2. Localisation des glissements de terrain 1 à 15, situés à l'E et au S de Battice.*

*Figure 4.3. Localisation du glissement de terrain 16, à l'E de Bolland.*

*Figure 4.4. Localisation du glissement de terrain 17, à l'E d'Aubel.*

*Figure 4.5. Glissements de terrain 1 et 2 localisés sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

montre quelques fissures qui pourraient provenir de légers mouvements. L'existence de ceux-ci reste cependant hypothétique.

Au SE de ce premier glissement, sur le versant nord de la crête occupée par des pâtures, la morphologie montre les traces d'un autre glissement de terrain (n° 2 sur la carte 4.2 et figure 4.5). Un abrupt de départ bien clair est localisé au sud (à proximité de la haie qui recoupe la courbe de niveau de 280 m). Un ressaut limitant la zone déplacée s'étend au NE d'une haie approximativement parallèle à la ligne de courant à haute tension figurée sur la carte. Un pylône soutenant cette ligne se trouve à proximité de l'extrémité aval du glissement, mais probablement en dehors de celui-ci. La morphologie est complexe dans la partie ouest, avec des traces de remise en mouvement sur les pentes les plus fortes. Ce glissement affecte une pente convexe qui va de 5% au sommet à 12% en aval.

Signalons que Monsieur A. Uhoda, propriétaire de l'ancienne ferme rénovée qui se trouve à proximité, nous a déclaré que des glissements se sont déclarés lorsque, au cours de cette rénovation, on a excavé le versant entre le glissement de terrain et son immeuble.

Le glissement de terrain suivant, très grand, s'étend à moins de 100 m au sud-est de l'immeuble en question. Ce glissement s'étire sur 550 m de longueur et sur plus de 300 m selon la pente. Il couvre ainsi près de 15 ha (n° 3 sur la carte 4.2 et figures 4.6 et 4.7). Dans la suite de ce rapport, nous l'appellerons le glissement de la Croix Polinard, du nom du lieu-dit signalé en cet endroit sur la nouvelle carte au 1/10000 de l'IGN. La zone de départ du glissement apparaît sous forme d'un abrupt très élevé (10 à 15 m) qui s'étend de la ferme de Monsieur Jaegers au SE jusqu'à une ancienne ferme en cours de rénovation (propriété de Monsieur Uhoda) au NO. Une ligne de chemin de fer désaffectée (ligne 38) traverse en remblais le glissement de terrain. Ces remblais masquent partiellement la morphologie du glissement d'autant plus que l'embranchement de la ligne 37, vers Dison et Verviers, se situe également dans cette zone. Initialement, cet embranchement traversait en tranchée l'abrupt de départ du glissement. Vers 1970, la tranchée a été comblée au moment de la construction de l'autoroute. Les remblais qui y ont été déversés offrent l'allure d'une portion de cône développée au nord de l'abrupt, et la courbure régulière de la zone de départ du glissement est ainsi interrompue.

*Figure 4.6. Le glissement de terrain de la Croix Polinard (n° 3) localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000. Les traits verts à la bordure nord du glissement, chiffrés 1, 2 et 3, localisent les coupes qui seront décrites au chapitre 6.*



*Figure 4.7. Vue aérienne oblique du glissement de la Croix Polinard. L'abrupt d'arrachement du glissement s'étend entre la ferme située dans le coin supérieur droit de la photo et la ferme au toit rouge apparaissant au bord de la grand-route dans la partie supérieure gauche du cliché. La partie de l'abrupt en pente plus douce et éclairée par le soleil est la zone remblayée lors de la construction de l'autoroute. La zone boisée qui traverse le glissement correspond à l'ancien chemin de fer. L'extrémité aval du glissement se trouve en contrebas des étangs qui sont visibles de part et d'autre du pylône localisé derrière la ferme Uhoda (à l'avant plan). La zone de départ du glissement n° 2 est partiellement visible au delà de la haie en contre-haut de l'inscription "12 16:24" sur le cliché. Les irrégularités de pente dues à ce glissement apparaissent de part et d'autre de cette inscription.*

Nous verrons plus loin que des mouvements récents et actuels affectent encore ce glissement d'une part à l'extrémité est, à proximité de la ferme de Monsieur Jaeghers, et d'autre part à l'extrémité ouest près de la deuxième ferme de Monsieur Uhoda.

Au nord de cet escarpement de départ, au-delà du remblai boisé du chemin de fer, la topographie désordonnée du glissement apparaît marquée par de grandes rides qui s'échelonnent suivant la pente. Ces ressauts ont facilité l'établissement de deux étangs artificiels localisés à la partie inférieure du glissement. Un troisième étang situé à l'aval des deux autres se trouve en dehors du glissement.

La terminaison abrupte du glissement est très apparente et permet de dessiner sans aucune hésitation sa limite inférieure. Un pylône soutenant la ligne à haute tension déjà mentionnée est installé sur la masse glissée, à proximité de son extrémité nord-ouest.

Au nord de la ferme de Monsieur Jaeghers, la morphologie de la masse déplacée, si claire vers l'ouest, est plus difficile à déchiffrer. Un ressaut apparu en 1998 (que nous décrirons plus loin) montre que l'abrupt de départ se prolonge au NE de la ferme. On peut considérer que la limite orientale du glissement correspond au thalweg qui prend sa source au NE de la dite ferme. L'extrémité aval du glissement, au nord de la ferme de Monsieur Jaeghers, n'est pas claire. Il est vraisemblable qu'elle est proche de la courbe de niveau de 280 m.

*Figure 4.8. Glissement de terrain n° 4 localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

*Figure 4.9. Vue aérienne du glissement de terrain n° 4 montrant l'abrupt d'arrachement en amont et la zone irrégulière du glissement. La limite aval de la zone glissée dépasse l'ancien chemin de fer en face de la rangée de peupliers.*

Nous reparlerons plus loin du glissement de la Croix Polinard pour décrire les mouvements récents qui y ont été observés et présenter des coupes qui, en septembre 1999, ont été dégagées dans sa partie aval au moyen d'une pelle mécanique.

Le glissement de terrain le plus particulier de toute la zone que nous avons étudiée s'allonge sur 500 m de longueur dans l'angle ouest de la Chaussée Charlemagne et de la route se dirigeant vers le centre de Thimister (n° 4 sur la carte 4.2 et figures 4.8 et 4.9). La limite sud de ce glissement apparaît clairement sous forme d'un abrupt continu d'où est partie la masse déplacée. La partie située à l'extrémité ouest du glissement, plus exactement à l'ouest des 3 immeubles localisés près du chemin de fer, s'est déplacée dans le vallon important qui y prend naissance. La partie orientale apparaît comme un graben avec deux abrupts tournés vers la zone affaissée aussi bien au nord qu'au sud. Il résulte sans doute d'un mouvement qui a déplacé une masse plus importante vers l'aval, (s'étendant certainement au-delà du chemin de fer), masse qui n'a pas pu être clairement délimitée probablement en raison de l'ancienneté du phénomène.

Immédiatement au sud du village de Thimister, une plage sub-circulaire d'environ 250 m de diamètre correspond au glissement de terrain suivant (n° 5 sur la carte 4.2 et figures 4.10 et 4.11). L'abrupt de départ du glissement est bien apparent et longe au sud-est une route qui du lieu-dit "Verte Voie" rejoint la route Charlemagne. Une large ride est développée au nord de la route. La limite exacte de la zone glissée est imprécise à l'est tandis qu'à l'ouest des mouvements de départ complexes ont produit une limite irrégulière. L'extrémité aval du glissement s'étend jusqu'à la courbe de niveau de 280 m. De nouvelles maisons ont été construites sur la partie supérieure de la masse qui a glissé.

Au SE de Thimister et au SO de Clermont s'étend au lieu-dit "Borbou" le glissement de terrain le plus étendu (environ 20 ha) que nous ayons observé (n°6 sur la carte 4.2 et figures 4.12 et 4.13.): 700 m de longueur et 400 m selon la pente dans son développement maximum. Alors que, si on excepte les immeubles récemment bâtis sur le dernier glissement mentionné, aucune construction ne se trouvait sur les glissements que nous avons décrits jusqu'ici, quatre bâtisses anciennes sont implantées sur celui-ci.

La partie du glissement la plus caractéristique se trouve à l'est. Deux grandes encoches courbes atteignant 17 m d'élévation avec une pente approchant localement 80% représentent la zone de départ des mouvements les plus récents. De grandes rides apparaissent au pied de cet abrupt. A l'aval, des ressauts lobés limitent localement des gradins superposés. Enfin, un talus à l'extrémité aval ne laisse planer aucun doute sur l'extension du glissement de terrain.

L'abrupt de départ de la partie ouest est moins incliné, probablement parce qu'il est apparu dans une phase antérieure. Les rides sont absentes mais la topographie irrégulière est caractéristique d'un mouvement de masse. Les trois fermes de la partie occidentale du glissement sont localisées dans cette zone moins caractéristique. Elles sont anciennes et ne montrent que des lézardes mineures. La limite occidentale de la zone affectée par le glissement est impossible à dessiner avec précision.

Dans la partie extrême-orientale, au nord de la quatrième ferme installée sur le glissement, la morphologie ne permet pas non plus de fixer avec certitude la limite de la zone touchée par le glissement. La ferme elle-même, partiellement en pierres calcaires et construite à l'extrémité d'une ride, ne paraît pas avoir subi de dégradation malgré son ancienneté.

Avant de quitter le versant nord de la crête de Battice, signalons un glissement peu étendu, qui affecte un versant situé à 400 m au NO de l'église de Clermont (n° 7 sur la carte 4.2 et figure 4.14). La zone de départ du glissement ne dépasse pas 2 m d'élévation. La topographie est très irrégulière mais sans montrer de grandes rides parallèles à l'abrupt de départ. Il s'agit ici incontestablement de glissements moins profonds que les glissements que nous avons décrits précédemment. Un abrupt terminal est localement perceptible à l'aval. Des traces de mouvements apparaissent aussi sur le versant opposé. Ces dernières traces sont cependant superficielles et trop peu étendues pour être intégrées dans la présente étude.

*Figure 4.10. Glissement de terrain n° 5 (au nord de Thimister) localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

*Figure 4.11. Vue du glissement de terrain n° 5 au sud de Thimister. L'abrupt de départ du glissement n'est pas clairement visible sur cette photo. Il correspond à la route autour de laquelle s'alignent de nouvelles constructions. La partie inférieure du glissement se prolonge en une langue qui atteint l'extrémité de la parcelle qui s'avance en remblai vers cette zone.*

*Figure 4.12. Glissement de terrain n° 6 (au lieu-dit "Borbou") localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

*Figure 4.13. Vue aérienne partielle du glissement n° 6 au lieu-dit Borbou. L'abrupt de départ du glissement apparaît seulement clairement à gauche de la photo. Il se poursuit en s'estompant quelque peu sous la haie à droite. La ferme située à l'extrémité droite de la photo se trouve sur la masse glissée dont la topographie irrégulière est bien perceptible.*

*Figure 4.14. Glissement de terrain n° 7 (au nord de Clermont) localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

## **2.2. Les glissements reconnus au sud de la crête du Pays de Herve**

A l'est de la route allant de Houlteau à Thimister, en tête de vallon, le versant est du ruisseau de Quarreux (n° 8 sur la carte 4.2 et figures 4.15 et 4.16) montre une topographie ondulée irrégulière bien apparente sur la photo oblique prise à basse altitude le 12-10-1999 (figure 4.16). Sur le terrain, ces ondulations ont été interprétées comme des traces de mouvements qui ont affecté tout le versant. D'après la carte, la pente atteindrait dans la partie la plus inclinée 11% et les glissements paraissent relativement peu profonds.

D'excellentes photos aériennes de cette zone au 1/7500 prises le 25-5-1953 et conservées au Ministère des Travaux Publics montrent un glissement très spectaculaire qui existait au nord de l'autoroute et à proximité immédiate de celle-ci (Km 113,2) (n° 9 sur la carte 4.2 et figure 4.17), soit à 700 m au NO de Houlteau. Ce glissement réactivé par les travaux de l'autoroute menaçait directement une ferme qui a été démolie. Quoique toute trace en ait aujourd'hui disparu à la suite des travaux de l'autoroute (les 60000 m<sup>3</sup> en mouvement ont été enlevés), il est bien connu parce qu'il a été étudié par J. M. Graulich (1969) lors de la construction de cette dernière. Abrupt de départ, magnifiques rides parallèles à la zone de départ et abrupt inférieur, toutes les caractéristiques des glissements de cette région étaient rassemblées en cet endroit.

Deux cents mètres à l'ouest de l'endroit où se trouvait ce glissement, au lieu-dit Sérezé, un grand glissement très spectaculaire affecte tout le versant est et nord d'un vallon où est installée la ferme-château appartenant à Monsieur Dorthu (n°10 sur la carte 4.2 et figures 4.18 à 4.20). La partie du glissement située au sud de la ligne de chemin de fer désaffectée n° 37 est la plus caractéristique (figure 4.18). L'abrupt de départ se présente sous l'aspect de deux encoches courbes se relayant. La partie la plus méridionale de cet abrupt touche à la limite ouest de la ferme de Monsieur Thimister. Ce dernier nous a signalé qu'une fissure parallèle au talus était apparue en 1999 à proximité de sa ferme, mais en contrebas de celle-ci, donnant un indice de l'existence d'un mouvement actuel du sol. La topographie de la masse déplacée sur tout ce versant exposé à l'ouest est très caractéristique et présente les rides et les contre-pentes déjà rencontrées ailleurs. L'extrémité aval de ce glissement correspond à un talus très marqué qui permet de cerner sans ambiguïté la masse déplacée.

*Figure 4.15. Glissement de terrain n° 8 (au nord de Houlteau) localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

*Figure 4.16. Vue de la zone ondulée interprétée comme résultant de glissements peu profonds au nord de Houlteau (glissement n° 8).*

*Figure 4.17. Glissement de terrain n° 9, disparu lors de la construction de l'autoroute (les 60000 m<sup>3</sup> de la masse en mouvement ayant été enlevés) localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

Des fouilles ont été réalisées dans cette partie du glissement que nous dénommons glissement de Sérezé. Elles ont entaillé l'extrémité aval du glissement de terrain. Elles seront décrites ultérieurement. Par ailleurs, une étude géophysique a été menée dans la même zone, immédiatement au dessus d'une des fouilles réalisées. Les résultats de cette étude sont présentées au chapitre 6 du présent rapport.

Ce glissement de terrain se poursuit au nord du chemin de fer abandonné, sur le versant de la crête de Battice exposé au sud (figure 4.19). La topographie chaotique montre que tout le versant situé au sud de l'ancienne ferme installée sur ce versant s'est déplacé. Le thalweg orienté nord-sud constitue la limite de la zone principale de glissement. Il est vraisemblable que plus à l'ouest une partie du versant entre la courbe de 285 m et le remblai du chemin de fer a été aussi affectée par des mouvements de masse. Dans cette zone, l'extrémité aval du glissement se trouve sur sa plus grande longueur sous les remblais du chemin de fer. Toutefois une partie de la terminaison du glissement, un abrupt net, apparaît au nord de ce remblai en dessinant un demi-cercle bien apparent. L'ensemble de ce glissement couvre près de 10 ha.



*Figure 4.18. Vue partielle du glissement de terrain de Sérezé (glissement n° 10). A droite, la ferme de Monsieur Thimister se trouve au-dessus, mais en bordure de la zone d'arrachement. Cette zone en pente forte est parcourue par de nombreuses terrassettes créées par le passage du bétail. La topographie chaotique du glissement apparaît parfaitement ainsi qu'une ride avec contre-pente étirée au pied de l'abrupt. Une des excavations que nous avons dégagées à l'extrémité aval du glissement est ouverte au milieu de la grande parcelle à la partie supérieure de la photo. La zone boisée à la limite supérieure du cliché correspond à la ligne de chemin de fer abandonnée.*

*Figure 4.19. Vue partielle du glissement de Sérezé au nord du chemin de fer abandonné (la zone boisée). La topographie irrégulière montre clairement la zone affectée par les mouvements de terrain.*

*Figure 4.20. Glissement de terrain de Sérezé (n° 10) localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000. La localisation des tranchées décrites dans le chapitre 6 est indiquée par des traits verts chiffrés 1 et 2.*

Au SE de Battice entre l'échangeur autoroutier et la route (n° 627) de Verviers à Battice, un lotissement a été installé au lieu-dit "E Bosse", qui pourrait aussi avoir été affecté par un glissement de terrain ancien. La topographie de cette zone a été bouleversée par le lotissement et il n'est plus possible d'avoir sur place une vision du terrain originel de la zone. Aussi cette zone de glissement reste douteuse. Nous n'avons pas observé de lézardes dans les constructions nouvelles ni anciennes, ni dans les routes qui ont été construites. Précisons cependant que les constructions anciennes ont été rénovées et que si des lésions existaient, elles ne peuvent plus être observées. L'interprétation de cette zone est

toutefois fort douteuse et si des glissements de terrain y ont existé, ils ne présentent plus clairement la morphologie caractéristique que nous décrivons ailleurs.

Immédiatement au nord de cette zone, au lieu dit "Grand Horé", soit en dehors de la zone lotie, des traces de glissement apparaissent sur le versant exposé au sud (n° 11 sur la carte 4.2 et figure 4.21). Les terres sont toujours pâturées et permettent de voir des irrégularités de pente qui résultent de déplacements en masse. Un escarpement de départ courbe, une ride mal marquée et un talus terminal peuvent être reconnus.

*Figure 4.21. Glissement de terrain n° 11 (au lieu-dit "grand Horé") localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

### **2.3. Au sud de l'autoroute d'Aix-la-Chapelle, à proximité de la route Battice-Verviers**

Entre la route de Battice à Verviers et le village de Chaineux, trois glissements de terrain caractéristiques ont été reconnus. Le plus méridional, situé près du carrefour de Manaihan est le plus important en étendue. D'autre part, il est actuellement actif.

Au NO de Chaineux (n° 12 sur la carte 4.2 et figures 4.22 et 4.24), le versant exposé au SE porte la trace d'un glissement de terrain incontestable. L'abrupt de départ n'est pas extrêmement net mais le ressaut qui matérialise l'extrémité aval du glissement est bien clair avec une forme qui, en plan, dessine des lobes caractéristiques (figure 4.22).

Deux cents mètres plus au sud, un second glissement apparaît (n° 13 sur la carte 4.2 et figure 4.24). La zone de départ est formée de trois sections de talus courbes qui surmontent une zone chaotique montrant une première ride bien nette. Plus en aval, la morphologie est irrégulière et l'extrémité aval du glissement est marquée par un fort talus surtout apparent dans la partie méridionale du glissement.

*Figure 4.22. Glissement de terrain localisé au sud de l'autoroute près de la route Battice-Verviers (glissement n° 12). La zone d'arrachement en pente forte et le relief irrégulier de la zone affectée par le glissement de terrain sont clairement visibles.*

*Figure 4.23. Vue générale du glissement de Manaihan, qui a subi des mouvements en 1998-1999 (glissement n° 14). L'abrupt de départ n'est pas clairement visible sur ce cliché. Il touche aux bâtiments à toits plats situés à gauche de la photo (Cafés Liégeois), affecte la zone où se trouvent quelques conifères (aire de la station Distrigaz détruite par le glissement) et se poursuit par l'abrupt, peu visible dans l'ombre, qui longe les bâtiments de la menuiserie Henrard. Beaucoup plus loin, le même abrupt se prolonge jusqu'à l'extrémité supérieure droite du cliché. La topographie irrégulière est soulignée par l'éclairage rasant et fait très bien apparaître les rides parallèles à la zone d'arrachement qui sont caractéristiques de beaucoup des glissements. L'abrupt aval du glissement se retrouve très atténué près du thalweg et n'est pas très apparent. Le versant de rive droite couvert par un champ de maïs est régulier et n'est pas affecté par des glissements de terrain.*

*Figure 4.24. Glissements de terrain n° 12, 13, 14 et 15, à proximité de la route Verviers - Battice, localisés sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN publiée au 1/10000.*

Enfin, au NE du carrefour de Manaihan (n° 14 sur la carte 4.2 et figures 4.23 et 4.24), un grand glissement de terrain qui a enregistré des mouvements spectaculaires en 1998 et au début de 1999

affecte des bâtiments de l'entreprise des "Cafés Liégeois" ainsi que la menuiserie Henrard. Une station Distrigaz qui avait été édifée entre la menuiserie et les bâtiments des "Cafés Liégeois" a été abandonnée le 1-11-1998 à la suite des mouvements du sol. Enfin un égout souterrain géré par l'AIDE et qui traverse le glissement en suivant approximativement la courbe de niveau de 285 m a été sectionné aux deux extrémités de la masse déplacée. Nous décrirons plus loin avec plus de détails ces désordres lorsque nous donnerons les résultats de mesures de déplacement qui ont été effectuées par GPS en différents points du glissement.

La morphologie de ce glissement est tout à fait caractéristique avec en amont un abrupt de départ courbe et une topographie chaotique caractérisée par les rides et les contre-pentes habituelles. La limite inférieure de la masse glissée n'est toutefois pas ici clairement exprimée par un abrupt semblable à ceux que nous avons observés ailleurs. Il est probable que la masse descendue a colmaté le fond du thalweg en le déplaçant d'ailleurs vers le SE et il est possible que ce colmatage n'ait pas permis le développement d'un talus terminal.

Sur le versant ouest de la crête que suit la route Verviers - Battice (crête sur le versant est de laquelle se trouvent les trois derniers glissements décrits), un glissement probable doit être signalé: un abrupt marqué, légèrement courbe en plan, paraît représenter la zone de départ d'un glissement de terrain d'étendue réduite (moins de 1 ha) (15 sur la carte 4.2 et figure 4.24). Les irrégularités de pente du versant situé sous cet abrupt sont peu nettes et il n'existe aucun abrupt terminal. La morphologie reste douteuse et elle pourrait avoir été produites par d'anciennes exploitations d'argile comme terre à foulons qui sont spécialement signalées à Manaihan dans le livret explicatif de la carte pédologique.

#### **2.4. En dehors de la zone Battice - Clermont: un glissement de terrain près de Bolland et une forme hypothétique près d'Aubel**

Sept cent cinquante mètres à l'est de Bolland, soit 2500 m au NO de Herve, dans une tête de vallée entaillant le versant sud du ruisseau de Bolland (16 sur la carte 4.3 et figure 4.25), se trouve un glissement de terrain dont l'extrémité aval est caractéristique. Elle se présente comme un lobe bien marqué, abrupt. La surface de la masse descendue est irrégulière.

Aucun ressaut ne permet de reconnaître la zone de départ. Celle-ci se situe dans un vallon peu marqué. Il s'agit d'un glissement superficiel déplaçant, pour ce qui peut être vu sur le terrain, de l'argile à silex.

Enfin 2 km à l'est de l'église d'Aubel, une zone très humide est suspectée être une zone instable ayant subi des déplacements en masse (17 sur la carte 4.4 et figure 4.26). Cette zone qui couvre à peine plus d'un hectare semble caractéristique d'un glissement de terrain sur les photos aériennes. Il n'existe cependant pas d'abrupt d'arrachement sommital. Le ressaut qui existe en amont, a un tracé rectiligne qui le fait interpréter comme un rideau. La masse qui aurait glissé est limitée par deux petits ruisseaux qui se rejoignent où se terminerait le lobe du glissement. L'érosion de ces ruisseaux, de même qu'un ravinement entaillant le lobe lui-même, altèrent une morphologie somme toute peu caractéristique. S'il s'agit d'une trace de glissement de terrain, elle est ancienne et douteuse.

*Figure 4.25. Glissement de terrain de Bolland (n° 16) localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN au 1/10000.*

*Figure 4.26. Glissement de terrain d'Aubel (n° 17) localisé sur un agrandissement au 1/5000 de la nouvelle carte IGN au 1/10000.*

## V. Les caractéristiques extérieures des grands glissements de terrain observés

La description sommaire des glissements que nous avons donnée dans le chapitre précédent nous permet de tenter une classification de ces formes en fonction de leurs caractères morphologiques. Dans le tableau ci-dessous qui rassemble ces éléments, nous considérons trois parties distinctes, à savoir: 1) l'abrupt de départ, 2) la topographie de la masse glissée, 3) le talus terminal. Nous donnons aussi la surface occupée par chaque glissement ainsi que la pente moyenne de la partie du versant où la masse s'est déplacée.

| <i>N°</i> | <i>Abrupt de départ</i>                                  | <i>Masse du glissement</i>                 | <i>Abrupt terminal</i> | <i>Aire approxim.</i> | <i>Pente moyenne approxim.</i> |
|-----------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 1         | net, courbe, peut-être retouché par l'homme              | ondulations parallèles à la zone de départ | bien marqué            | 3.4 ha                | 15 à 17 %                      |
| 2         | très peu marqué                                          | pas de rides                               | local                  | 1.9 ha*               | 6 à 10 %                       |
| 3         | très développé, > 10 m                                   | rides caractéristiques                     | très marqué            | 13.3 ha               | 16 à 17 %                      |
| 4         | net, légèrement courbe                                   | rides apparentes                           | absent ou mal marqué   | 5.1 ha                | 10 %                           |
| 5         | net, courbe                                              | une ride marquée                           | pas net                | 5.6 ha                | 9 %                            |
| 6         | net, courbe, élevé                                       | rides marquées                             | net et élevé           | 21.8 ha               | 8 à 12 %                       |
| 7         | peu élevé                                                | irrégulière, sans rides                    | peu marqué             | 1.0 ha*               | 16 à 17 %                      |
| 8         | absent                                                   | ondulations                                | absent                 | 1.7 ha*               | 11 %                           |
| 9         | net, courbe                                              | rides très marquées                        | très net               | 5.6 ha                | non mesurable                  |
| 10        | très élevé au S du chemin de fer, limite incertaine au N | rides marquées                             | très net               | 12 ha                 | 15 à 17 %                      |
| 11        | courbe                                                   | une ride peu nette                         | peu élevé              | 1.3 ha*               | 15 %                           |
| 12        | marqué et élevé                                          | une ride nette                             | présent                | 2.4 ha                | 8 %                            |
| 13        | marqué et élevé                                          | irrégularités                              | présent                | 2.1 ha                | 16 %                           |
| 14        | important et élevé                                       | rides très apparentes                      | absent                 | 6.8 ha                | 7 %                            |
| 15        | peu élevé                                                | irrégularités faibles                      | absent                 | 0.9 ha*               | 15 %                           |
| 16        | absent                                                   | irrégularités locales                      | net                    | 2.9 ha*               | 7 %                            |
| 17        | inexistant                                               | ravinements                                | absent                 | 1.1 ha*               | 5 à 8 %                        |

Au total, environ 90 ha sont affectés par les glissements de terrain que nous avons reconnus. On peut grouper comme suit les glissements qui ont des caractères semblables:

La première catégorie rassemble ceux dont les caractéristiques de la partie supérieure résultent de la rotation de blocs constitués d'un matériau relativement compact. La rotation des blocs donne naissance aux rides et contre-pentes si caractéristiques de la zone amont de la masse glissée. La zone



de départ du glissement est élevée et présente un tracé courbe en plan. Dix glissements (1, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14), qui comprennent tous les glissements les plus étendus, appartiennent à cette catégorie. Une particularité doit cependant être notée pour le glissement de Manaihan (14), à savoir que le talus terminal y est inexistant ou à peine perceptible. L'ensemble de ces glissements couvrent environ 74 ha, soit 83 % de la surface totale affectée par les glissements de terrain.

Le glissement 4 (environ 5,1 ha) semble dû au déplacement d'un panneau qui, en glissant, a dégagé localement le matériau sous-jacent. Il présente le mieux cet aspect dans sa partie orientale qui ressemble à un "graben" limité aussi bien vers l'amont que vers l'aval par des abrupts tournés vers l'axe de la zone affaissée. Ce glissement présente des similitudes avec les formes de la première catégorie mais en diffère cependant par le fait que la morphologie qui a été affectée est une bande relativement étroite (100 m) mais très longue (500 m) qui correspond d'ailleurs à la partie du versant à l'origine la plus inclinée. Aucun abrupt terminal n'y est visible. Si le mécanisme que nous invoquons est bien responsable de la morphologie, cela signifie que la masse glissée s'est étendue en contrebas de la zone cartographiée. Aucune trace morphologique n'y subsiste cependant et nous sommes dans l'impossibilité de circonscrire la masse qui a été déplacée. Ensemble, tous les glissements décrits jusqu'à présent occupent 90 % de la surface étudiée.

Les glissements moins caractéristiques, n'appartenant pas à la première catégorie et qui sont considérés ci-dessous, portent un astérisque dans le tableau qui accompagne ce chapitre.

Les glissements 2, 7, 8 et 16 ne présentent pas d'abrupt de départ ou seulement un abrupt de départ peu marqué. Ils sont dus à des mouvements moins profonds et ne comportent pas les grands blocs basculés (donnant naissance aux grandes rides) qui sont propres aux glissements précédents. Les irrégularités ne présentent pas de continuité latérale. Ce deuxième type de glissement couvre 7.5 ha soit 8 % de la surface totale.

Enfin les glissements 15 et 17 (2 ha ensemble) sont douteux. La morphologie attribuée au glissement 15 pourrait être due à des exploitations de terre à foulons que le texte explicatif de la carte pédologique signale expressément à Manaihan. Le glissement 17 est aussi incertain: si l'on accepte d'y voir un mouvement de masse, le ravinement non seulement en bordure mais aussi au milieu de la masse qui aurait été déplacée atteste de sa grande ancienneté.

## **Localisation dans la topographie, exposition, pente**

Tous les glissements de la première catégorie sont localisés de part et d'autre de la crête principale du Pays de Herve et du diverticule qui s'étire vers Dison, au sud. Les formes sont d'autant plus développées que le sommet de l'escarpement de départ est à une altitude élevée. Les trois plus grands glissements (3, 6 et 10) débutent à une altitude voisine de 310 m. Le glissement 4 débute à 300 m. Le glissement superficiel 8 à 295 m.

On ne peut pas comparer directement l'altitude des glissements situés sur la crête principale du pays de Herve avec ceux qui sont localisés au sud de l'autoroute. A l'emplacement de ces derniers, étant donné la pente du Crétacé vers le nord, les assises géologiques se trouvent à une altitude plus élevée. A Manaihan (14), les glissements débutent à une altitude proche de 295 m. .

A première vue, les versants qui portent des glissements ne montrent aucune exposition préférentielle. Des glissements existent aussi bien sur des versants exposés au nord qu'au sud, à l'est qu'à l'ouest. Toutefois, l'analyse précise de la localisation des zones d'arrachement des glissements révèle des orientations préférentielles qui seront discutées au chapitre 10.

Par contre la pente originelle du versant paraît avoir une plus grande influence. Pour l'apprécier, nous considérerons la pente moyenne entre les sommets de l'arrachement et le pied des glissements. Les grands glissements (3, 6, et 10) ont des pentes moyennes comprises entre 14 et 17%. Les autres glissements ont des pentes moyennes plus faibles, sauf le glissement 1 qui, quoique plus petit, présente les caractéristiques des grands glissements et se trouve sur une pente moyenne semblable, de l'ordre de 16%.

Le glissement de Manaihan (14) présente une pente plus faible de l'ordre de 7%. C'est cependant le seul glissement qui subit actuellement des mouvements importants. Quand on prend en compte ces

valeurs de pente, il faut cependant être attentif au fait que nous considérons la pente moyenne de tout le glissement (depuis le sommet de l'abrupt de départ jusqu'à l'extrémité aval).

En bref, mis à part les glissements de Bolland (16) et d'Aubel (17), les glissements de terrain considérés sont tous situés sur la crête du Pays de Herve. Leur zone d'arrachement se trouve à une altitude voisine de 300 m et ils sont développés sur des versants dont la pente moyenne varie entre 7 et 17%. Les grands glissements de terrain se trouvent sur les pentes les plus fortes et leur morphologie indique l'existence de mouvements profonds. Quatre des glissements identifiés présentent des caractéristiques morphologiques qui semblent résulter de glissements superficiels.

## **VI. Les caractéristiques internes des glissements**

### **1. Les fouilles réalisées**

Des tranchées ont été creusées avec une pelle mécanique à l'extrémité de deux glissements de terrain importants, à savoir les glissements 3 (Croix Polinard) et 10 (Sérezé). Ces fouilles n'ont dévoilé que sur une vingtaine de mètres la structure de ces glissements dont l'extension est de plusieurs centaines de mètres. Elles ne peuvent donc pas faire apparaître la structure de l'ensemble des glissements que nous attendons plutôt de l'étude géophysique qui sera décrite plus loin. Ces dégagements ont fourni cependant quelques éléments intéressants que nous décrirons maintenant. Ils ont aussi permis de recueillir des éléments organiques (bois, charbon de bois) enfouis lors de la progression des glissements et dont la teneur en  $^{14}\text{C}$  était mesurable. Des datations de phases de progression de ces glissements ont été ainsi obtenues; nous en discuterons dans le chapitre 7.

Dans chaque cas, le creusement a dû être stoppé brusquement en cours de réalisation quand les coupes ont subi des éboulements partiels. Ceux-ci se sont poursuivis par la suite tant que les tranchées sont restées ouvertes. D'anciens plans de glissement permettent en effet des remises en mouvement faciles et les masses qui les surmontent sont ainsi extrêmement instables.

#### **1.1. Les coupes dans le glissement de terrain n° 3 (Croix Polinard)**

Trois tranchées ont été dégagées dans la partie tout à fait inférieure du glissement; elles sont localisées sur la figure 4.6 par des traits de couleur verte portant les numéros 1, 2 et 3.

##### 1.1.1. Coupe 1

###### **A. Description**

La coupe n° 1 est donnée sur la figure 6.1. Cette coupe a montré de bas en haut:

a) Une argile d'altération des schistes houillers (1, fig. 6.1). Une excavation locale au fond de la tranchée, 1,5 m plus bas que la partie inférieure du dessin a permis de retrouver localement des débris de schistes ne laissant aucun doute quant à l'origine de cette argile.

b) Une couche d'argile à silex de couleur grise et rouille surmonte cette argile (2, fig. 6.1).

c) Du limon, probablement surtout d'origine éolienne, constitue les couches (3) et (4) du dessin. Deux niveaux superposés respectivement brun et blanchi, constituent les horizons d'un sol à pseudogley qui a été déformé par la poussée d'une masse d'argile glauconieuse verdâtre (7, fig. 6.1). Cette couche de limon constituait la surface du sol avant le glissement de terrain. Des restes de charbon de bois et des restes de bois qui ont été datés (voir chapitre 7) ont été trouvés dans cette couche aux deux endroits inscrits sur la figure.

d) Les couches (5), (6) et (7) constituent la masse du glissement de terrain. Elles correspondent à une argile lourde, parfois verte en raison de la présence de glauconie, et comprenant en quantité variable des blocs de grès. Il s'agit de la formation de Vaals remaniée.

d) Au sein de ces matériaux des cisaillements ont été observés (8, fig. 6.1). Les plans de glissement (tout à fait identiques à des miroirs de faille) ont pu être dégagés. En coupe verticale, les surfaces de glissement sont souvent difficiles à reconnaître. Elles présentent des contrepenches marquées (à l'exception de deux plans quasi verticaux observés à l'extrémité SSO de la tranchée).

###### **B. Interprétation**

La surface du sol qui existait avant le glissement et a été enfouie sous celui-ci, a été retrouvée. Deux types de mouvements apparaissent:

1) l'avancée d'une masse de matériaux probablement plastiques amenant la masse (7), puis la partie inférieure de la masse (5). La forme arrondie du bloc d'argile glauconieuse (9) suggère

fortement que la première arrivée de matériaux était au moins partiellement visqueuse. Il est probable que le déplacement décrit ici se soit produit simultanément, et soit la conséquence des mouvements décrits en 2) ci-dessous.

2) de grands glissements de matériaux qui ont chevauché la masse déjà déposée. C'est le glissement de ces matériaux qui a donné naissance à l'extrémité aval abrupte du glissement.

#### 1.1.2. Coupe 2

Une seconde excavation a été dégagée à une cinquantaine de mètres au SE de la tranchée que nous venons de décrire. Elle a aussi attaqué l'abrupt aval du glissement. Bien que les deux coupes soient très proches l'une de l'autre, les formations observées ne sont pas identiques.

##### A. Description.

- a) A la base, l'argile d'altération du houiller (1, fig. 6.2).
- b) Par dessus, argile à silex bariolée, descendue sur le versant avant le glissement (2).
- c) Limon éolien (3b), argileux dans sa partie inférieure (3a), qui a été repoussé par la masse d'argile à silex (4).
- d) Plan de cisaillement (5).
- e) Masse de sable fin avec des lentilles plus grossières et localement de nombreux débris de charbon de bois probablement d'âge secondaire (6).
- f) A la base de cette masse glissée et en concordance de stratification, couche d'argile blanche (7).
- g) Sol actuel (8).

##### B. Interprétation.

La structure observée est parfaitement identique à celle qui a été trouvée dans la coupe 1 et le commentaire précédent concernant la succession des phénomènes peut être conservé. Toutefois l'apparition d'une masse imposante de sables (plus de 3 m d'épaisseur) constitue une différence frappante entre les deux coupes. A la base de cette masse de sable apparaît une couche d'argile blanche (7) qui paraît cisailée parallèlement au plan de stratification.

Le glissement affecte donc ici les sables d'Aachen et le plan de glissement paraît localisé au sein d'une couche argileuse (7) comprise dans ces sables.

L'abrupt aval du glissement, particulièrement marqué, correspond ici aussi à l'extrémité de la masse de sable qui est arrivée comme un paquet de matériaux cohérents dont la structure interne n'a pas été dérangée par son déplacement et son basculement.

Bien que nous reconnaissons deux types de mouvements, il est possible qu'ils se soient produits simultanément.

#### 1.1.3. Coupe 3

La troisième excavation a été réalisée à son tour à une cinquantaine de mètres au SE de la coupe 2. Beaucoup plus modeste en extension, elle a consisté en un puits vertical qui a dépassé de peu 4,50 m de profondeur. Elle a été localisée à proximité immédiate du thalweg du ruisseau qui coule ici au pied du glissement. L'abrupt aval du glissement ne domine ici le fond du thalweg que de 1,50 m de hauteur.

##### A. Description.

Sous le sol superficiel est apparue une masse argileuse sans cailloux. A 2 m de profondeur, donc 0,5 m sous le fond du thalweg, un niveau glauconieux a été découvert.

Cinquante cm plus bas sont apparus des silex dans une matrice argileuse glauconieuse, témoignant du mélange des formations crétacées dans ce glissement. Latéralement, une poche de sables blancs de quelques cm a été observée. Enfin, à 1,80 m sous le niveau du thalweg est apparue

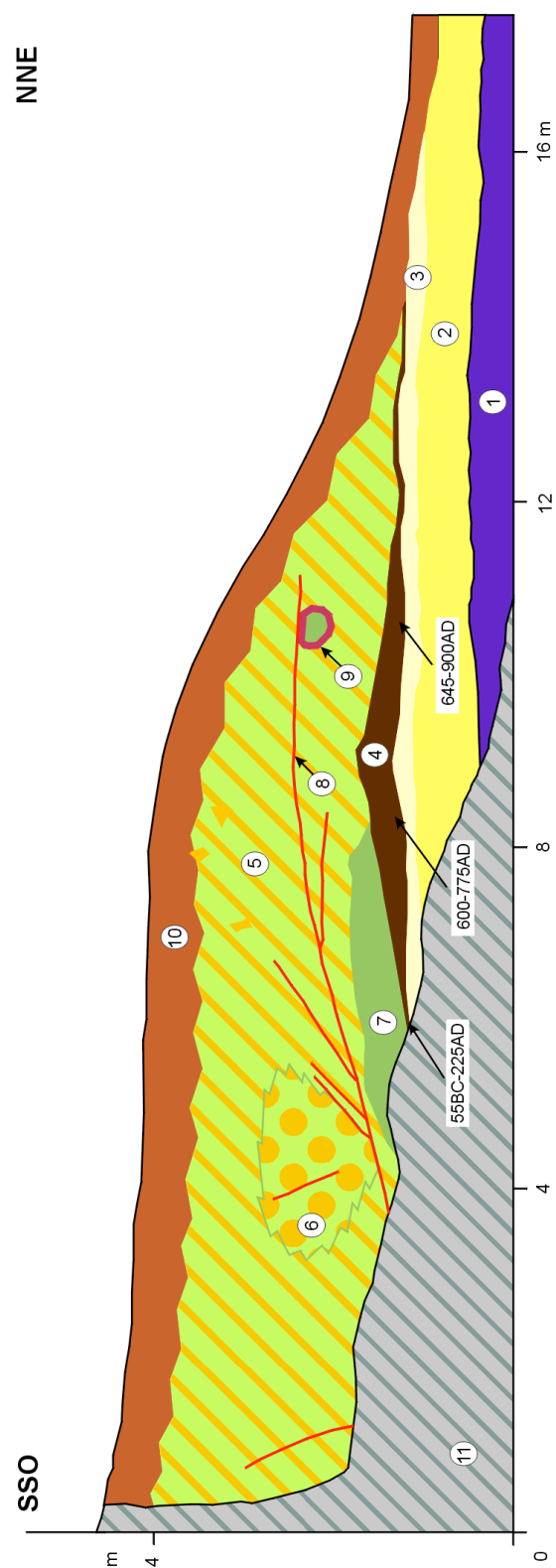


Figure 6.1. Coupe 1 réalisée dans le talus terminal du glissement de terrain de la Croix Polinard. La signification des chiffres est donnée dans le texte.

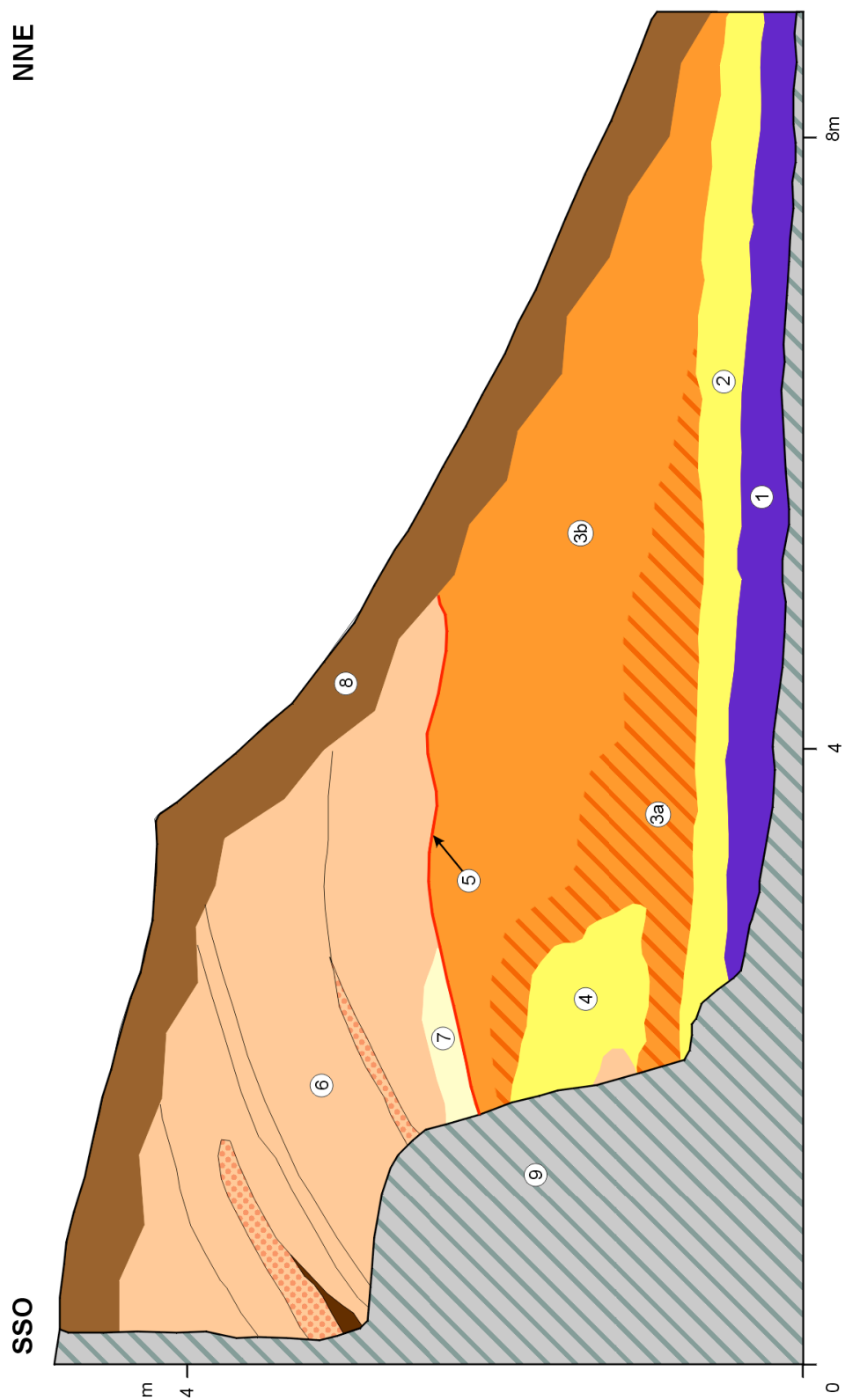


Figure 6.2. Coupe 2 réalisée dans le talus terminal du glissement de terrain de la Croix Polinard. La signification des chiffres est donnée dans le texte.

une masse tourbeuse avec des débris de bois qui ont été récoltés pour obtenir une datation par <sup>14</sup>C. Au fond de l'excavation, c'est-à-dire 2,60 m sous le fond du thalweg, ont été reconnues les argiles de décomposition du Houiller.

### B. Interprétation

Il est impossible sur la base de cette description de faire des commentaires sur la structure du glissement. L'excavation a cependant été suffisante pour reconnaître que les restes organiques se trouvaient bien à la base du glissement. Se trouvant sous la nappe aquifère ils étaient beaucoup mieux conservés que les débris trouvés dans la première excavation.

*Figure 6.3. Cisaillement observé en coupe dans la tranchée 1 du glissement de la Croix Polinard.*

## 1.2. La coupe dans le glissement de terrain n° 2 (Sérezé)

### 1.2.1. Description

Une grande fouille et une petite excavation ont été réalisées à Sérezé dans les terrains appartenant à Monsieur Thimister. Leur localisation est donnée sur la figure 4.20 et les déblais de la grande coupe sont visibles sur la photo aérienne 4.18.

La coupe principale de Sérezé (figure 6.6) s'ouvre sur environ 20 m de long dans le pied du glissement de terrain, à une altitude de 280 m. Elle attaque perpendiculairement le talus terminal de la masse glissée qui, à cet endroit, est haut d'environ 2.5 m.

Tout à fait à la base de la coupe, des argiles vertes glauconifères localement silteuses et recelant quelques éclats de silex correspondent à la formation de Vaals remaniée: il s'agit des matériaux colluvionnés en pied de versant avant le déclenchement du glissement de terrain. Deux sondages à la tarière sont descendus dans ce même matériau sur une épaisseur d'environ 1.8 m sous le plancher de la coupe. Par-dessous, ils ont rencontré 0.3 m de sable violet représentant ici la formation d'Aachen, puis quelques dizaines de cm d'argile gris-noir renfermant de fines esquilles schisteuses et marquant le

*Figure 6.4. Vue d'un plan de cisaillement montrant les stries de glissement. Chaque graduation de la règle représente 5 cm.*

*Figure 6.5. Extrémité amont de la coupe 2 (glissement n° 3, Croix Polinard) montrant les paquets de sables d'Aachen stratifiés poussés par le glissement de terrain et présentant une contrepente marquée.*



passage à la zone d'altération superficielle des schistes houillers du socle. Coincés entre deux niveaux argileux imperméables, les sables d'Aachen étaient saturés en eau. La position altitudinale rencontrée pour le sommet du Houiller sous la coupe de Sérezé est en bon accord avec celle qu'on peut déduire de l'examen de la nouvelle carte géologique de cette zone et suggère que l'Aachenien rencontré par sondage y est en place.

Par-dessus les argiles de Vaals remaniées, la partie aval de la coupe (figure 6.6:  $x = [0-6 \text{ m}]$ ) expose un niveau silteux de couleur beige clair et épais de 0.5 - 0.7 m. Vers l'amont, ce niveau présente un renflement et atteint localement une épaisseur d'un peu plus d'1 m ( $x = [6-11 \text{ m}]$ ) avant de se terminer en biseau. Contenant également de nombreux petits silex, ce silt colluvionné est vraisemblablement constitué en majeure partie de loess quaternaires. Un sol podzolique à pseudogley s'y est développé, superposant un horizon gris humifère, un horizon lessivé de couleur claire et un horizon illuvial bariolé de traînées rubéfiées. Vers l'amont, dans la partie renflée de ce niveau, l'horizon humifère semble être retourné sur lui-même, alors que dans la terminaison amont en biseau des silts, il a disparu. Cet horizon humifère renferme en outre un grand nombre de débris de charbon de bois, qui ont été prélevés en deux endroits à des fins de datation  $^{14}\text{C}$ . Dans la partie renflée, du charbon de bois est également mêlé, quoiqu'en moindre quantité, avec la masse non humifère des silts.

Surmontant les silts pédogénisés, une masse imposante d'argile brun-gris clair constitue le reste de la coupe exposée. Contenant toujours quelques silex, cette masse résulte du mélange de l'ensemble des matériaux, à dominante argileuse, affleurant plus haut sur le versant. Quoique nette dans la partie aval de la coupe, la limite entre l'argile et le silt sous-jacent est souvent plus floue dans la partie amont. Il faut surtout souligner qu'elle ne présente nulle part un caractère de discontinuité tranchée. En ce sens, elle ne peut donc être assimilée aux "plans" (en réalité des surfaces onduleuses) de cisaillement qui découpent la masse des argiles sus-jacentes. Une surface de cisaillement majeure apparaît en effet, sur laquelle se greffent deux cisaillements secondaires. Inclines le plus souvent dans la direction de la pente topographique, les cisaillements présentent aussi localement des pendages transverses. Le paquet argileux situé sous le cisaillement principal montre un caractère nettement plus rubéfié que le paquet sus-jacent, soulignant d'autant la présence de la discontinuité. A différents niveaux, on rencontre au sein de la masse argileuse des "morceaux" de sol sous la forme d'intercalations subhorizontales, dans certains cas aussi plus nettement remaniées, d'horizons humifères ou lessivés. Un troisième échantillon de charbon de bois a été recueilli pour datation  $^{14}\text{C}$  dans une de ces lentilles incluses dans la masse argileuse.

### 1.2.2. Interprétation

Les éléments suivants de la coupe doivent être considérés comme "en place" au moment du déclenchement du glissement de terrain:

- les sables d'Aachen en position originelle sur le bedrock houiller
- les argiles de Vaals colluvionnées probablement dès avant le Weichselien, en tout cas avant le dépôt des loess
- les silts pédogénisés, matériau probablement d'origine éolienne et localement repris par le creep. Le sol développé à leur sommet marque la surface topographique juste avant le glissement.

Lors du glissement de terrain, qui démarre plus de 200 m à l'amont, les masses argileuses mises en mouvement sur le versant se sont déplacées sur ce sol et l'ont fossilisé. La position actuelle du niveau silteux dans les différentes parties de la coupe montre que, vers l'amont, la masse en déplacement a raclé le sol, le repoussant devant elle en un bourrelet renflé et partiellement rabattu, avant de terminer sa course en glissant sur la surface sans plus la déranger. Le raclage du sol à l'amont de la coupe suggère que le mouvement responsable fut d'ampleur considérable. Il est donc possible que, malgré la position distale de la coupe, le mouvement qui y est enregistré corresponde à un événement de déplacement initial catastrophique du glissement sur toute son étendue actuelle. L'allure et l'importance des cisaillements dans la masse argileuse semblent conduire à une conclusion similaire, où ils ne marqueraient pas des hiatus entre événements nettement séparés dans le temps mais plutôt

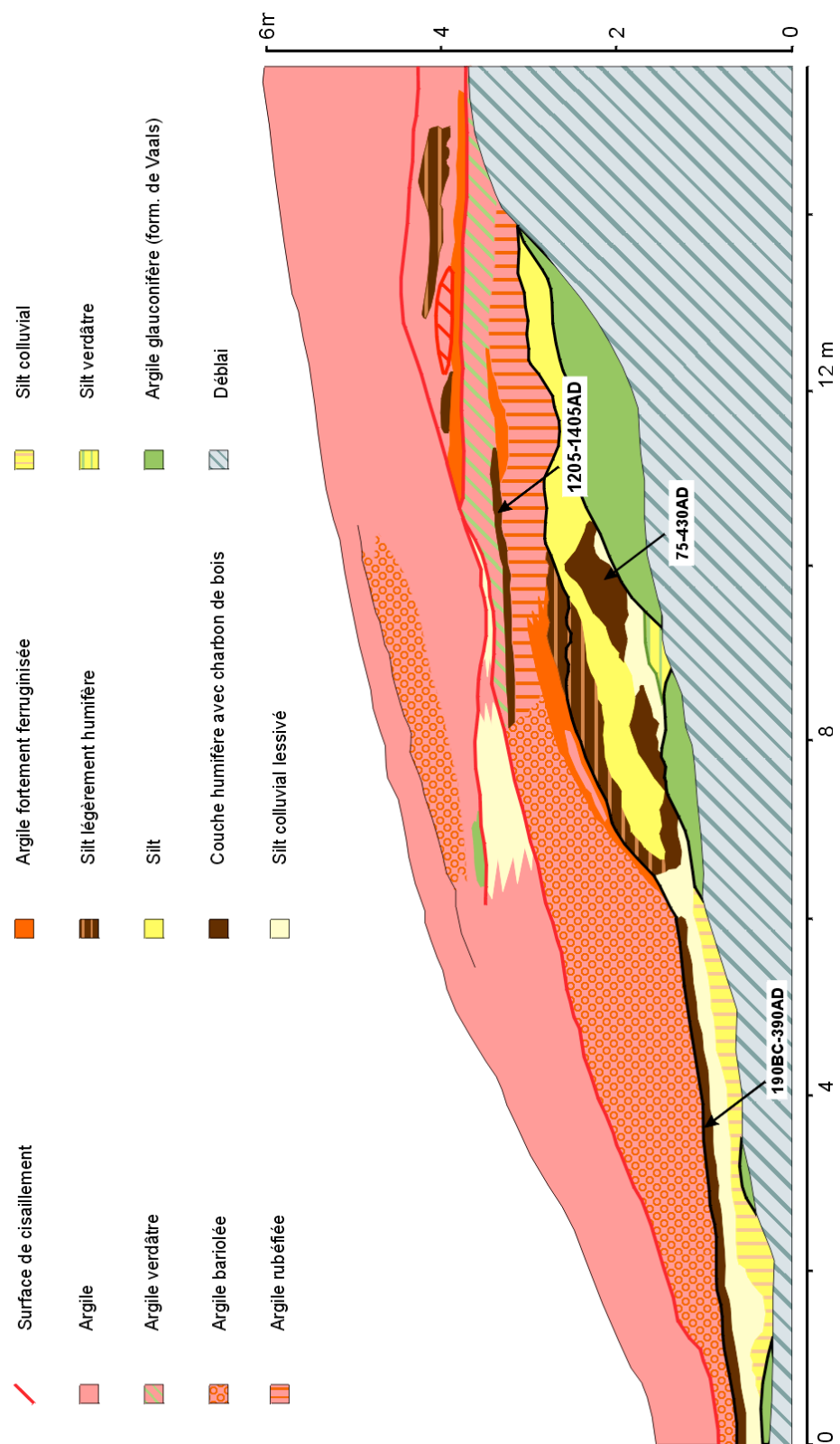


Figure 6.6. Coupe réalisée dans le talus terminal du glissement de terrain de Serezé.

des ruptures internes dans une masse unique en mouvement. La cohérence globale de celle-ci lors du déplacement est par ailleurs attestée par la conservation de bon nombre de structures internes.

Cependant, ce schéma interprétatif semble pris en défaut par la datation obtenue pour le charbon de bois récolté dans une lentille de matériau humifère au sein de l'argile glissée (figure 6.6). Cette lentille est en effet localisée sous le plan principal de cisaillement, dans la moitié inférieure de la masse glissée, soit à 2 m sous la surface actuelle du sol et serait néanmoins plus de 1000 ans plus jeune que le sol fossilisé à cet endroit par la masse qui l'englobe! Ceci est d'autant plus étonnant qu'une contamination de l'échantillon de charbon de bois par du carbone récent (racines par exemple) paraît très peu probable. L'explication de cette apparente aberration ne semble pas pouvoir être trouvée en dehors d'une remise en mouvement locale de l'argile faisant intervenir une réactivation des plans de cisaillement et recouvrant le niveau à charbon de bois (éventuellement d'origine anthropique) développé à la surface du premier glissement.

Une seconde coupe a été effectuée à quelques dizaines de mètres au sud de la précédente, à l'endroit où un petit vallon incise le pied du glissement. Beaucoup plus petite, elle a consisté en un simple trou qui a recoupé à 2.4 m de profondeur un sol ancien où on retrouve encore de façon remarquablement fraîche la couverture herbeuse couchée et laminée par la masse d'un petit glissement récent qui a remobilisé quelques dizaines de m<sup>3</sup> de matériaux dans le creux du vallon.

*Figure 6.7. La petite excavation à Sérezé, dévoilant en brun sur le palier au fond de la fouille des herbes, des mousses et des débris de bois fossilisés par le glissement de terrain.*

## 2. Reconnaissance géophysique

D'APRÈS UN RAPPORT (RWE/2000-01) DE A. MONJOIE, C. SCHROEDER, P. CHAZARD & P. THOIRON (2000) INTITULÉ "GLISSEMENT DE TERRAIN À THIMISTER. RECONNAISSANCES PAR GÉOPHYSIQUE ET CALCULS PRÉLIMINAIRES DE STABILITÉ".

Afin principalement de déterminer la profondeur des glissements étudiés, une reconnaissance géophysique de l'un d'entre eux a été réalisée par les Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique (dénommés ci-dessous LGIH). Cette étude a été réalisée sur le glissement de terrain de Sérezé (n° 10), qui présentait divers avantages:

- des coupes y ont été également creusées
- les dimensions du glissement devaient permettre de faire aisément la différence entre des plans de glissement potentiels soit superficiels, soit profonds
- il n'est affecté d'aucune perturbation d'origine anthropique du relief dans sa partie sud, qui a été prospectée.

Le versant étudié recoupe l'ensemble des différentes formations géologiques crétacées décrites au chapitre 3. Dans la zone du glissement, la formation de Gulpen n'est pas très épaisse, et est constituée surtout d'argile et de sables à silex, provenant de la dissolution de la craie. La formation de Vaals y présente une épaisseur de l'ordre de 30 mètres. On notera qu'en zones faillées, la marne normalement assez compacte se transforme en argile plastique.

Du point de vue hydrogéologique, la formation de Gulpen est habituellement aquifère mais ici, elle est plutôt constituée d'argile à silex peu aquifère. La formation argileuse de Vaals est peu perméable. Un niveau plus sableux peut cependant contenir localement une nappe de faible extension. Quant à la formation sableuse d'Aachen, elle est aquifère et donne naissance à de nombreuses sources, comme c'est effectivement le cas à Thimister. Cependant, les sables étant généralement fins et argileux, la perméabilité est faible et les sables peuvent devenir bouillants.

L'étude géophysique a comporté une tomographie électrique le long de la pente du glissement, deux sondages sismiques et trois sondages électriques, disposés transversalement au glissement. La localisation des points et ligne de mesures géophysiques est donnée à la figure 6.8.

### 2.1. Tomographie électrique

#### 2.1.1. Principe de la méthode

On peut construire une image électrique du sous-sol, c'est-à-dire une coupe de la résistivité du sol en fonction de la profondeur, en mesurant le profil de résistance pour différentes combinaisons d'électrodes de potentiel et de courant. Le dispositif de mesure le plus fréquemment utilisé en imagerie électrique ou en tomographie est le dispositif Wenner, où l'écartement entre électrodes est constant et où les électrodes de courant entourent les électrodes de potentiel. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles.

La première étape dans une interprétation des données en tomographie électrique consiste à construire une pseudo-section, qui est obtenue en reportant au centre du dispositif, à une profondeur dépendant de l'écartement utilisé entre électrodes, la valeur de résistivité apparente mesurée. Cette représentation conduit à une image fictive où ni les valeurs de résistivité, ni celles de profondeur ne sont correctes.

Pour la configuration Wenner, la profondeur d'investigation nominale est, en principe, égale à la moitié du plus grand écartement utilisé, mais peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité, et être plus ou moins grande en fonction d'une résistivité plus ou moins faible. L'écartement des électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que la résolution horizontale et

verticale. Par rapport aux autres configurations possibles, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

Pour obtenir une meilleure résolution des résultats, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section obtenue pour déterminer une coupe verticale des résistivités du sous-sol en fonction d'une vraie profondeur. L'inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tend à minimiser l'écart entre la pseudo-section mesurée et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à atteindre une concordance acceptable entre données mesurées et données recalculées, ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. L'écart finalement obtenu en fin d'itération entre les données mesurées et recalculées se présente alors sous la forme d'un modèle de résistivités apparentes résiduelles. L'inversion des données est affectée par les principes d'équivalence et de suppression valables aussi pour la géoélectrique (voir section 2.2.1).

### 2.1.2. Essais réalisés et résultats

Avec le matériel utilisé (ABEM: Electrode Selector ES464 Terrameter System; Terrameter SAS 300C), le dispositif de mesure consiste en 4 câbles comportant chacun 16 sorties sur lesquelles viennent se brancher des électrodes. Dans la configuration utilisée dans cette étude, 64 électrodes sont utilisées par sondage. Elles sont colinéaires et espacées de 5 m, ce qui représente une longueur totale de 315 m pour un profil. Cela équivaut au total à 518 mesures pour l'obtention d'un profil tomographique. Ces câbles sont reliés à un résistivimètre, lui-même connecté à un sélecteur d'électrodes et à un ordinateur portable. Un fichier contient la succession de mesures à effectuer.

Le profil tomographique obtenu, localisé en figure 6.8, est représenté sur la coupe de la figure 6.9. L'allure générale de la tomographie électrique montre une série de couches conductrices passant en profondeur à des couches résistives. On observe une remontée importante des zones résistives à partir de la cumulée 160 (zone 3), avec une remontée du bloc SO, et une modification moins nette vers la cumulée 95 - 100 (zone 1), avec remontée du bloc NE, la zone intermédiaire (zone 2) étant légèrement affaissée. Les trois zones ainsi distinguées se caractérisent comme suit:

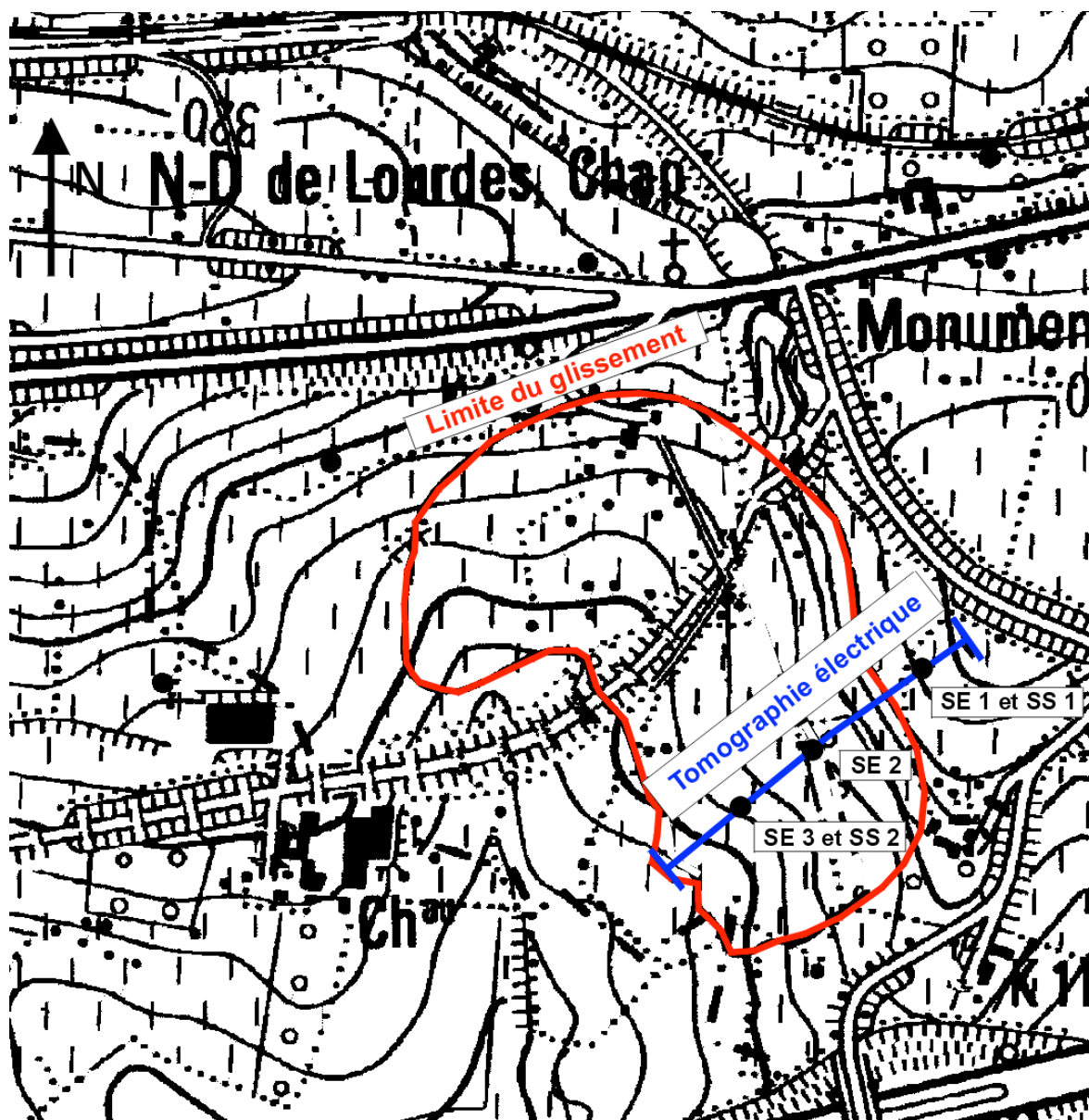
#### A. Zone 1

Comprise entre les cumulées 0 et 90, cette zone est bien représentative des terrains en place situés en arrière du glissement. On peut ainsi distinguer de haut en bas:

- une couche superficielle d'environ 5 m d'épaisseur, et de résistivité variant entre 20 et 80  $\Omega.m$  (la zone fortement résistive à la cumulée 75 - 80 m est un artefact n'ayant pas de signification physique et dû à un léger creux topographique qui influence sans doute la zone conductrice sous-jacente). Cet horizon doit correspondre à la base de la formation de Gulpen, ici composée surtout d'argile à silex provenant de la dissolution de la craie
- une épaisse couche de plus de 20 m, de résistivité inférieure à 15  $\Omega.m$ , correspondant à la formation de Vaals (smectite de Herve), des matériaux fortement argileux expliquant la faible résistivité des terrains
- ensuite, une couche de résistivité croissante, depuis 20  $\Omega.m$  jusqu'à des valeurs dépassant 100  $\Omega.m$  à grande profondeur. Vers le haut, cette dernière couche doit correspondre à la formation sablo-argileuse d'Aachen et à la transition avec le sommet du bedrock houiller argilisé, dont la résistivité doit être équivalente. L'augmentation de la résistivité en profondeur (plus de 76  $\Omega.m$ ) indique ensuite que l'on atteint le bedrock houiller schisto-gréseux plus compact.

#### B. Zone 2

Comprise entre les cumulées 90 et 160, cette zone englobe la partie des terrains affectée par le glissement. On y observe un décrochement important des couches définies dans la zone 1, correspondant vraisemblablement aux divers blocs glissés. La topographie de cette zone est marquée par les formes caractéristiques du glissement: important escarpement de départ (cumulées 95 - 120), fissures transversales, bourrelet (cumulées 150-160).



SE 1 et SS 2

SE 1 : sondage électrique 1

SS 2 : sondage sismique 2

Echelle appr. 0 100 m



Université de Liège  
Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur,  
d'Hydrogéologie  
et de Prospection Géophysique  
Prof. A. MONJOIE

Sart Tilman B19  
4000 Liège

tel : 04 366 22 16 fax : 04 366 28 17

Glissement de terrain à Thimister  
Reconnaissance par géophysique  
Calculs préliminaires de stabilité

\*  
Situation du glissement  
Implantation des reconnaissances

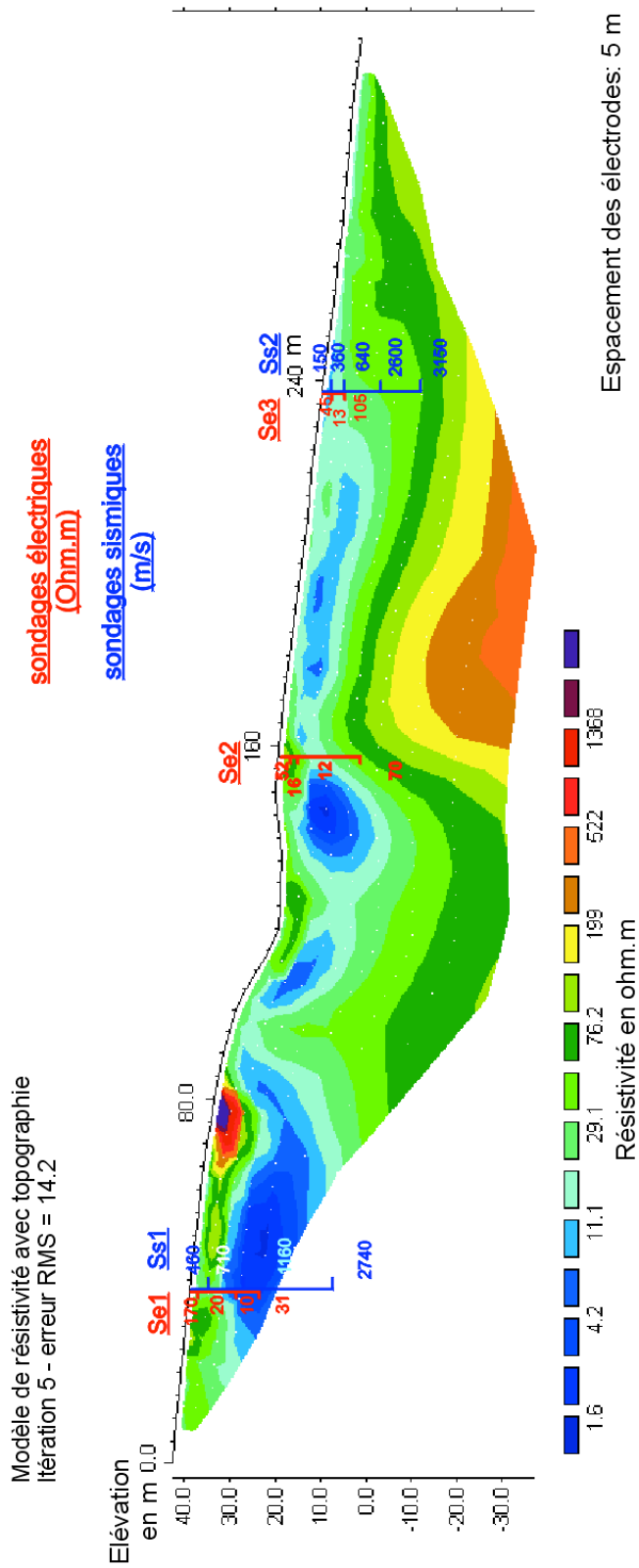
Document : 1

RWEP/001

Figure 6.8. Localisation des diverses mesures géophysiques effectuées sur le glissement de terrain de Sérezé.

NE

SO



La première électrode est située à 0.0 m  
La dernière électrode est située à 315.0 m

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Université de Liège<br/>Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur,<br/>d'Hydrogéologie<br/>et de Prospection Géophysique<br/>Prof. A. MONJOIE</p> <p>Sart Tilman B19<br/>4000 Liège</p> <p>tel : 04 366 22 16 fax : 04 366 28 17</p> | <p>Glissement de terrain à Thimister<br/>Reconnaissance géophysique</p> <p>*</p> <p>Tomographie électrique<br/>Sondages électriques et sismiques</p> <p>RWEP001</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figure 6.9. Profil de tomographie électrique réalisé sur le glissement de terrain de Sérézé.

Par ailleurs, le substratum houiller, de résistivité  $> 100 \Omega.m$ , présente une rupture au droit de la cumulée 160 environ, rupture pratiquement verticale séparant deux zones de résistivité assez différentes: au NE, des terrains inférieurs à  $200 \Omega.m$  et, au SO, des terrains nettement plus résistifs, jusqu'à  $500 \Omega.m$ . Ce contact, perpendiculaire à l'orientation des bancs, pourrait être du à la présence d'une faille.

### C. Zone 3

Comprise entre les cumulées 160 et 315, cette zone comprend les terrains de la partie aval du glissement. Ceux-ci retrouvent un aspect moins dérangé, mais on peut noter la présence d'anomalies résistives au sein de la smectite de Herve entre les cumulées 240 et 265. On observe aussi une remontée de la couche de résistivité supérieure à  $30 \Omega.m$  à partir de la cumulée 270, et ce jusque tout près de la surface.

## 2.2. Sondages électriques

### 2.2.1. Principe de la méthode

Les sondages électriques ont été réalisés suivant la méthode des résistivités, consistant à injecter dans le sol un courant d'intensité  $I$ , au moyen de deux électrodes (nommées A et B), et à mesurer la différence de potentiel  $\Delta V$ , entre deux autres électrodes (nommées M et N). Les quatre électrodes sont colinéaires, les deux extérieures servant à l'injection du courant. Le dispositif le plus fréquemment utilisé est le dispositif Schlumberger, où l'écartement des électrodes intérieures (M et N) est faible par rapport à celui des électrodes extérieures (A et B).

Pour réaliser un sondage électrique, on mesure  $\Delta V$  et  $I$  pour des écartements d'électrodes croissants. Avec le dispositif Schlumberger, les deux électrodes centrales restent fixes, et on augmente progressivement l'écartement des électrodes extérieures. A partir des mesures d'intensité et de différence de potentiel pour chaque écartement d'électrodes, on calcule la résistivité apparente par la formule suivante:

$$\rho_a = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{(AB/2)^2 - (MN/2)^2}{2MN}$$

avec       $AB/2$ : demi-écartement des électrodes externes,  
               $MN/2$ : demi-écartement des électrodes internes.

En terrain homogène, la résistivité apparente reste constante quel que soit l'écartement des électrodes externes. En terrains stratifiés par contre, chacune des couches intervient à mesure que l'écartement des électrodes externes atteint un multiple de la profondeur de la couche intéressée. Les courbes expérimentales obtenues en reportant le logarithme de la résistivité apparente en fonction du demi-écartement des électrodes externes permettent l'interprétation du sondage électrique. Ces courbes expérimentales sont comparées aux courbes théoriques calculées à partir de modèles de terrain ( $n$  couches,  $n$  résistivités et  $n-1$  épaisseurs). L'ajustement du modèle par itérations permet d'obtenir les profondeurs et les résistivités des différents horizons.

L'interprétation des sondages électriques est limitée par les principes d'équivalence et de suppression:

- une couche conductrice mince située entre deux terrains résistants n'est définie que par le rapport épaisseur/résistivité
- une couche résistante mince sise entre deux terrains conducteurs n'est définie que par le produit épaisseur/résistivité



- une couche, même épaisse, de résistivité intermédiaire entre les résistivités des couches qui l'encadrent, peut passer inaperçue sur la courbe du sondage électrique.

### 2.2.2. Essais réalisés et résultats

Les trois sondages ont été implantés en tenant compte des résultats de la tomographie électrique. Ils sont orientés selon la perpendiculaire à la direction du glissement. Ils ont donné les résultats suivants (figure 6.9).

#### A. SE 1

Le sondage effectué dans les terrains non dérangés, au-dessus de l'escarpement de départ du glissement, met en évidence, de haut en bas, la succession suivante:

- les terrains superficiels (terre végétale, limons), épais d'environ 1 m, pour une résistivité de 170  $\Omega.m$
- une couche de résistivité à 20  $\Omega.m$  et épaisse d'environ 9 m, qui doit correspondre à la smectite de Herve
- une couche de 6 m d'épaisseur, et de résistivité à 10  $\Omega.m$ , qui pourrait correspondre à un horizon plus conducteur au sein de la smectite
- Le sommet d'une couche de résistivité à 31  $\Omega.m$ .

#### B. SE 2

Le second sondage électrique a été réalisé au centre du dispositif de la tomographie électrique, soit à l'aval du bourrelet développé dans la moitié supérieure du glissement. Il permet de voir, de haut en bas, la succession suivante:

- les terrains superficiels (terre végétale, limons), épais de moins de 1 m, et de résistivité à 52  $\Omega.m$
- une couche épaisse de 17 m et de résistivité comprise entre 12 et 16  $\Omega.m$  ("smectites")
- le sommet d'une couche de résistivité à 70  $\Omega.m$  située à plus de 17 m de profondeur (Houiller).

Ce sondage montre que la smectite se trouve très proche de la surface du sol et que la formation d'Aachen sous-jacente ne se trouve plus ici qu'à 17 m de la surface.

#### C. SE 3

Le sondage a été implanté dans la partie aval du glissement de terrain. Il permet de voir, de haut en bas, la succession suivante:

- les terrains superficiels (terre végétale, limons), épais de quelques dizaines de centimètres, et de résistivité à 45  $\Omega.m$
- une couche de résistivité à 13  $\Omega.m$  et épaisse de 4 à 5 m, qui correspond à la formation de Vaals remaniée par le glissement
- le sommet d'une couche à 105  $\Omega.m$ , située à 6 m de profondeur, c'est-à-dire toujours dans les paquets remaniés de la formation de Vaals si on se réfère aux résultats de la tomographie électrique. Cet horizon pourrait peut-être correspondre à la présence de sables plus résistifs.

## **2.3. Sismique-réfraction**

### 2.3.1. Principe de la méthode

Une vibration, produite par un coup de marteau ou une explosion depuis la surface du sol, est captée par une série de géophones. Les signaux captés par les géophones sont enregistrés par un sismographe et affichés sur un écran d'ordinateur. L'onde sismique peut ainsi être visualisée, et il est

possible de mesurer son temps de propagation entre la source de la vibration et n'importe quel géophone. Le report du temps de propagation en fonction de la distance entre le point d'impact et les géophones fournit une courbe appelée "dromochronique", qui permet de calculer les vitesses de propagation des ondes dans les divers terrains, ainsi que les épaisseurs respectives de ceux-ci.

Les épaisseurs calculées sont reportées à une distance du géophone correspondant à la moitié de la distance critique (abscisse du changement de pente de la dromochronique).

La "vitesse" d'un terrain est en relation avec sa nature et ses caractéristiques géomécaniques. A titre d'exemple, citons quelques ordres de grandeur: un terrain "végétal" a une vitesse inférieure à 500 m/s; un limon, un sable peu compact, un bedrock altéré ou un gravier ont des vitesses allant jusqu'à 1200 m/s. Sous la nappe aquifère, ces vitesses sont augmentées (la vitesse dans l'eau est d'environ 1400 m/s). Une roche saine schisteuse peut avoir une vitesse allant jusqu'à 3000-5000 m/s; les vitesses atteignent 6000 m/s, voire un peu plus, dans des calcaires parfaitement compacts.

La méthode présente quelques particularités et limitations spécifiques:

- les lois de la propagation des ondes empêchent le repérage de niveaux de vitesse plus faible que les terrains surincombants, ce qui rend la méthode non opérationnelle dans le cas de revêtements durs en surface ou en cas d'interstratification d'une couche "lente" entre deux couches plus "rapides"
- lorsque le sommet du substratum présente une pente par rapport au terrain naturel, la vitesse mesurée est une vitesse "apparente", plus grande que la vitesse réelle lorsque le profil progresse dans le sens de la montée du substratum, plus faible dans l'autre cas. Par exemple, pour une pente de 5°, un substratum de vitesse de 2000 m/s montre, suivant le sens considéré, une vitesse apparente de 1500 m/s ou de 2500 m/s. Pour connaître la vitesse exacte, il est nécessaire d'effectuer deux enregistrements par dispositif: un "aller" et un "retour"
- la propagation des ondes n'étant pas plane mais volumique, des effets latéraux peuvent influencer localement les résultats.

### 2.3.2. Essais réalisés et résultats

Deux sondages de 115 mètres de longueur ont été réalisés, comprenant 24 géophones espacés de 5 mètres, et utilisant l'explosif comme source sismique. Les signaux ont été captés et enregistrés sur un sismographe BISON. Les résultats des sondages sismiques sont les suivants (figure 6.9):

#### A. SS1

Ce profil sismique a été réalisé au-dessus du glissement de terrain, au même endroit que le sondage électrique SE 1. Il a mis en évidence, de haut en bas, la succession de terrains suivante:

- les terrains superficiels (terre végétale et limon) et les terrains meubles très peu compacts, de vitesse sismique d'environ 460 m/s, et d'épaisseur d'environ 3 m
- une couche de vitesse sismique d'environ 710 m/s et épaisse de près de 8 m, qui doit englober une bonne partie de la formation de Gulpen et peut-être le sommet de la smectite de Herve
- une couche épaisse d'environ 20 m, et de vitesse sismique à 1160 m/s. Cet horizon doit correspondre à la smectite de Herve, ainsi qu'à la formation d'Aachen (couche cachée, car de vitesse moins importante ?)
- le sommet d'une couche de vitesse sismique à 2740 m/s, et située à environ 30 m de profondeur. Il s'agit certainement du sommet du bedrock compact houiller.

#### B. SS 2

Ce profil sismique a été implanté au même endroit que le sondage électrique SE 3, dans la partie aval du glissement de terrain. Il permet de voir, de haut en bas, la succession de terrains suivante:

- les terrains très superficiels correspondant à la terre végétale, de vitesse sismique à 150 m/s (?), et d'une épaisseur de moins de 1 m
- une couche d'environ 2 à 3 m d'épaisseur, et de vitesse sismique à 360 m/s, correspondant aux terrains meubles superficiels peu compacts
- une couche de vitesse sismique à 640 m/s, et d'une épaisseur d'environ 7 à 8 m, caractéristique de terrains meubles peu compacts
- une couche d'une épaisseur d'environ 8 m, à une vitesse sismique de 2600 m/s, qui doit correspondre au bedrock compact du Houiller
- le sommet du bed rock sain du Houiller, à une vitesse de 3150 m/s, situé à une profondeur approximative de 20 m.

## 2.4. Synthèse des observations géophysiques

La tomographie électrique a permis de visualiser de manière satisfaisante le profil en long du glissement de terrain. On peut y distinguer en particulier les terrains en place à l'arrière du glissement, l'allure du glissement lui-même, et les terrains dans sa partie aval (figure 6.10).

Les sondages électriques et sismiques complémentaires ont été implantés perpendiculairement au profil de la tomographie électrique afin d'investiguer les terrains latéralement au glissement. Les sondages électriques se corrélaient relativement bien avec la tomographie électrique, ce qui indique une assez bonne homogénéité latérale des terrains.

Quant à la sismique réfraction, elle donne une idée de la compacité des terrains et permet de mieux calibrer la tomographie électrique pour les grandes profondeurs, où sa résolution n'est pas optimale. On peut ainsi facilement repérer le sommet du bedrock compact du Houiller.

## 3. Calculs de stabilité

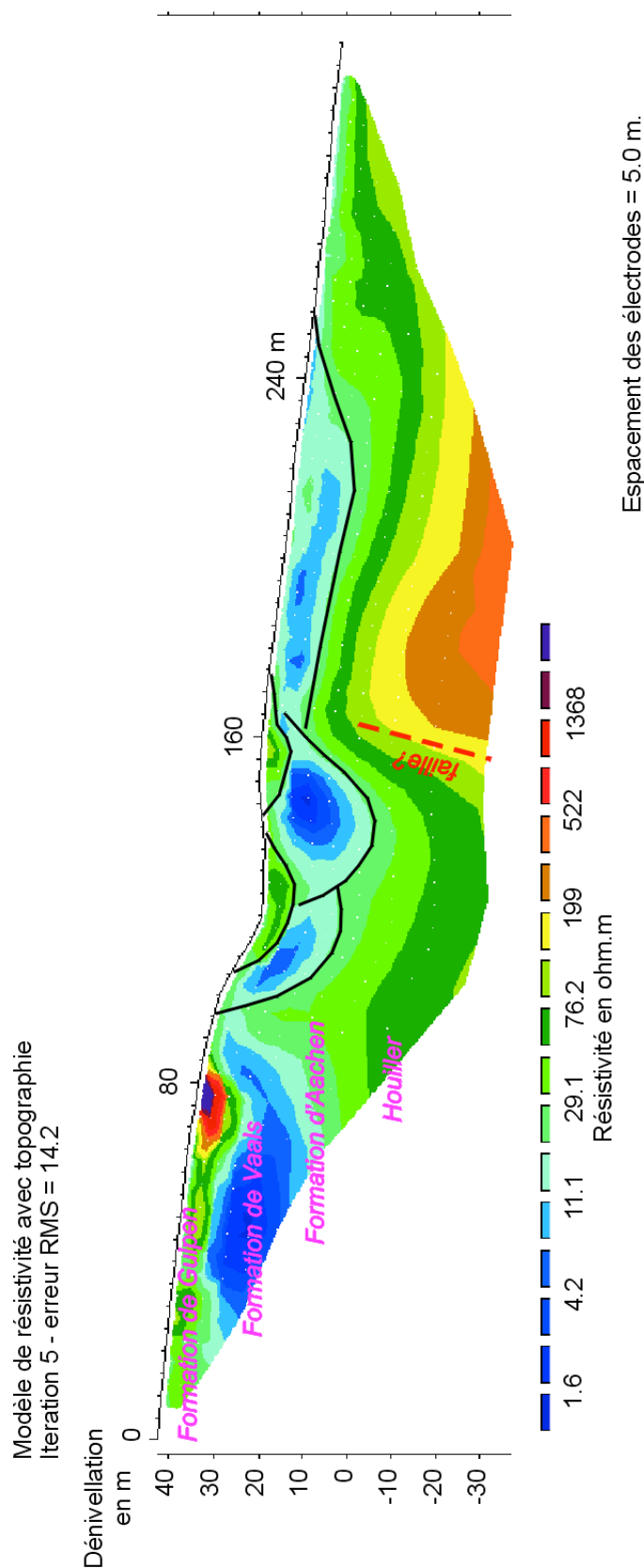
D'APRÈS UN RAPPORT (RWE/2000-01) DE A. MONJOIE, C. SCHROEDER, P. CHAZARD & P. THOIRON (2000) INTITULÉ "GLISSEMENT DE TERRAIN À THIMISTER. RECONNAISSANCES PAR GÉOPHYSIQUE ET CALCULS PRÉLIMINAIRES DE STABILITÉ".

### 3.1. Méthode de calcul

Les méthodes de calcul de la stabilité d'un talus sont variées depuis les méthodes simplifiées, voire empiriques, jusqu'aux calculs plus poussés tels la méthode des perturbations et les approches par modélisations mathématiques (éléments finis, éléments frontières ou éléments distincts), sans oublier les approches probabilistes.

Dans l'approche déterministe, la plus utilisée actuellement, la stabilité d'un talus peut se caractériser par un coefficient "de sécurité" dont la définition la plus couramment admise est: "le coefficient (ou facteur) de sécurité est égal au rapport entre les forces s'opposant au glissement et celles tendant à le provoquer". En règle générale, la valeur du coefficient de sécurité ainsi défini admise comme satisfaisante est voisine de 1,5. Dans certains cas particuliers (par exemple en cours de phases temporaires d'un chantier ou dans le cas d'une situation géologique particulièrement bien connue), on peut admettre des valeurs plus basses du coefficient de sécurité (1,3 par exemple), le coefficient de sécurité calculé pour des conditions exceptionnelles, comme un séisme, devant néanmoins rester toujours supérieur à l'unité.

Parmi les méthodes de calcul de ce coefficient de sécurité, les plus répandues sont encore celles dites "des tranches". Elles travaillent en deux dimensions (on parlera donc de "ligne" de glissement ou de rupture plutôt que de "surface"). Ces méthodes étudient l'équilibre de la masse en glissement limitée d'un côté par la surface topographique et de l'autre par la ligne de glissement. Le calcul se fait en découpant cette masse en "tranches" (on dit aussi "lamelles") et en exprimant les



La première électrode est localisée à 0.0 m.  
La dernière électrode est localisée à 315.0 m.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Université de Liège<br/>Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur,<br/>d'Hydrogéologie<br/>et de Prospection Géophysique<br/>Prof. A. MONJOIE</p> <p>Sart Tilman B19<br/>4000 Liège<br/>tel : 04 366 22 16 fax : 04 366 28 17</p> | <p>Glissement de terrain à Thimister<br/>Reconnaissance géophysique<br/>*<br/>Interprétation des données<br/>géophysiques</p> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <p>RWEP001</p>                                                                                                                |

Figure 6.10. Interprétation de la géologie et de la structure du glissement révélées par l'étude géophysique.

équations d'équilibre de chacune d'entre elles. La résolution du système conduit à la valeur du coefficient de sécurité. Les différentes méthodes "des tranches" diffèrent entre elles par les hypothèses de départ, plus ou moins simplificatrices.

Dans le programme de calcul utilisé (STABLGHI des Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique de l'Université de Liège), le calcul de la stabilité est effectué par les méthodes de Fellenius, Bishop et Janbu.

Les méthodes de Fellenius et Bishop donnent des valeurs du coefficient de sécurité uniquement valables si les lignes de rupture sont d'une forme plus ou moins circulaire et en l'absence d'efforts horizontaux (par exemple, séisme). Dans ces conditions, le coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Bishop est très proche de celui obtenu par la méthode de Janbu.

La méthode de Janbu, est valable dans toutes les formes de lignes de glissement cinématiquement acceptables. Elle permet aussi de prendre en compte les effets de surcharges locales (horizontales et/ou verticales) ainsi que les effets des séismes. La méthode de Janbu étant basée sur des calculs itératifs, le coefficient de sécurité est donné pour la première itération et en fin de calcul. Cependant, la sensibilité de cette méthode à des problèmes numériques fait que la convergence de l'algorithme du calcul n'est pas systématique.

Le programme utilisé travaille en contraintes totales ou effectives. Dans ce dernier cas, il permet de prendre en compte l'effet de la position de la nappe aquifère et d'introduire d'éventuelles surpressions interstitielles résultant de mises en charges rapides.

Le calcul de la stabilité considère que la rupture se produit le long de la surface de glissement lorsque le critère de Coulomb est atteint. Ce critère s'exprime en contraintes effectives par la relation

$$\tau = c' + (\sigma' - u) \cdot \tan \varphi'$$

où on a:  $\tau$  = contrainte de cisaillement

$c'$  = cohésion

$\sigma'$  = contrainte normale à la surface de glissement

$u$  = pression interstitielle

$\varphi'$  = angle de frottement interne.

Le critère de Coulomb fait appel à deux paramètres mécaniques: la cohésion et l'angle de frottement interne. Ces paramètres doivent être connus pour chaque couche intéressant la ligne de glissement. Ils sont déterminés par différents essais en laboratoire et *in situ* ou par analyse *a posteriori* ("back analysis").

### 3.2. Profil étudié

La stabilité du talus a été étudiée pour la coupe définie par la prospection géophysique, en se basant sur la coupe interprétative de la figure 6.10.

Pour la modélisation de ce profil, le terrain est supposé être constitué de trois couches:

- le terrain superficiel (terre végétale): 1 mètre d'épaisseur
- un terrain meuble regroupant les formations marneuses et sablo-argileuses. A ce stade de l'étude, compte tenu de la précision de la coupe géologique et de la faible différence de comportement géomécanique de ces deux formations, on a pris en compte une couche unique, de 15 mètres d'épaisseur en amont à 2 mètres en aval, c'est-à-dire avec une base sensiblement horizontale
- le substratum houiller.

Sur ce profil, 14 courbes de glissement parmi les plus probables ont été étudiées. Les courbes ont été tracées en tenant compte des résultats de l'étude géophysique et des éléments de terrain

(escarpements, bourrelets ...). Certaines de ces courbes pourraient être des courbes enveloppes de séries d'anciens glissements successifs. La discrétisation du profil et les différentes courbes de glissement étudiées sont données à la figure 6.11.

### 3.3. Etapes des calculs

Les calculs de stabilité ont pour but de déterminer quelles sont les conditions actuelles de stabilité, chiffrées par les coefficients de sécurité, dans différentes hypothèses de position de nappe phréatique et de séisme. Le calcul est d'abord effectué sur les courbes de glissement choisies, en utilisant des paramètres géomécaniques moyens, valeurs habituelles pour ces formations. Il est ainsi possible de déterminer parmi ces courbes celles conduisant aux coefficients de sécurité minimum. Les valeurs des coefficients de sécurité ainsi obtenues sont les valeurs moyennes plausibles pour le site étudié.

Dans une deuxième étape de calcul, une analyse paramétrique ("back analysis") effectuée sur les courbes de glissement permet de déterminer les caractéristiques géomécaniques résiduelles moyennes des terrains traversés conduisant à différents coefficients de sécurité. En particulier, on détermine les caractéristiques géomécaniques conduisant :

- à un coefficient de sécurité valant 1, c'est-à-dire à la limite de la rupture. Ces caractéristiques sont les valeurs minimum que peuvent présenter les terrains. Sous ces valeurs, il y a glissement
- à un coefficient de sécurité valant 1.5, soit la valeur habituellement admise pour une stabilité satisfaisante. Ces caractéristiques sont les valeurs minimum que doivent avoir les terrains pour que le site soit suffisamment stable.

La comparaison de ces valeurs avec les valeurs moyennes adoptées en première phase de calcul permet d'avoir une idée plus précise de la stabilité réelle du site.

### 3.4. Hypothèses de calcul

Les caractéristiques suivantes des terrains ont été adoptées pour les calculs en première phase:

- poids volumiques apparents:
  - terrain superficiel (terre végétale et limon): 2.0 t/m<sup>3</sup>
  - terrains meubles marneux et sablo-argileux: 1.0 t/m<sup>3</sup>
  - substratum houiller (pour mémoire, car il n'y a pas de courbe de glissement passant en son sein): 2.6 t/m<sup>3</sup>
- propriétés géomécaniques:
  - terrain superficiel:  $c' = 3.2 \text{ t/m}^2$        $\varphi' = 18^\circ$
  - terrains meubles marneux et sablo-argileux:  $c' = 1.0 \text{ t/m}^2$        $\varphi' = 15^\circ$

Ces valeurs proviennent, entre autres, des études de la smectite à Hallembaye, Evegnée-Tignée, sur le tracé TGV Liège/Aachen et de l'autoroute E40 (formation de Vaals) et d'un essai de cisaillement direct effectué aux LGIH dans le cadre de la présente étude sur un échantillon remanié prélevé dans la tranchée en pied de glissement

  - substratum houiller (pour mémoire, car il n'y a pas de courbe de glissement passant en son sein):  $c' = 5.0 \text{ t/m}^2$        $\varphi' = 30^\circ$

Ces valeurs sont celles habituellement utilisées pour de telles formations et déduites des essais de laboratoire.

La nappe aquifère a été supposée dans trois positions:

- subaffleurante

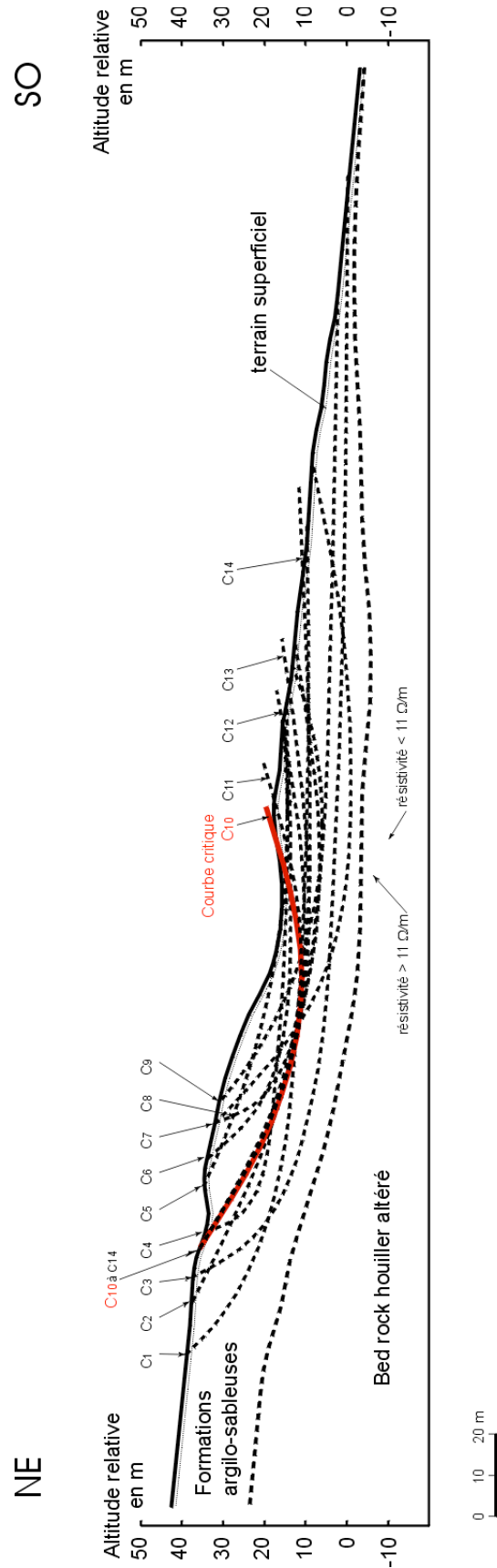


Figure 6.11. Courbes de glissement modélisées dans les calculs de stabilité à Serezé.

|                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Glissement de terrain à Thimister<br/>Calculs préliminaires de stabilité</p> <p style="text-align: center;">*</p> <p>Courbes de glissement</p> | <p>Université de Liège<br/>Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur,<br/>d'Hydrogéologie<br/>et de Prospection Géophysique<br/>Prof. A. MONJOIE</p> <p>Sart Tilman B19<br/>4000 Liège</p> <p>tel : 04 366 22 16 fax : 04 366 28 17</p> |
| <p>RWEP/001</p>                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                       |

- à 2 mètres de profondeur
- rabattue à 4 mètres de profondeur pour simuler les périodes sèches.

Les calculs sont d'abord menés en absence de séisme. Une vérification de la tenue aux séismes a ensuite été faite en adoptant une accélération sismique de 0,1 g et en supposant la nappe subaffleurante.

### 3.5. Résultats des calculs en première phase

Les coefficients de sécurité obtenus par différentes méthodes de calcul (Fellenius FS(F), Bishop FS(B)), Janbu première itération (FS(J1)), Janbu fin d'itération (FS(J)), sont représentés aux tableaux ci-après. Dans ces tableaux, le signe - indique soit une non-convergence, soit la non-applicabilité de la méthode de calcul dans ce cas (incompatibilité des conditions géométriques et géomécaniques en cas de calcul statique de l'effet d'un séisme).

Ces tableaux montrent que:

- les courbes de glissement les plus défavorables sont celles passant à l'amont par la surface d'arrachement et à l'aval par le bourrelet visible sur le terrain, soit les courbes 10 à 14, la courbe 10 étant la plus dangereuse avec un coefficient de sécurité (Janbu) égal à 0.82 en cas de nappe affleurante et à 0.93 et 1.03 en cas de nappe à 2 m ou 4 m de profondeur
- parmi les autres courbes de glissement, les courbes n°1, 6, 8 et, dans une moindre mesure, 3 sont les plus défavorables, elles présentent les coefficients de sécurité les plus faibles, approchant de l'unité en l'absence de séisme pour la courbe 1 (FS Fellenius = 1.03, FS Janbu = 1.09) dans le cas de la nappe subaffleurante
- le rabattement de la nappe à 4 m de profondeur ne suffit pas pour amener le coefficient de sécurité à une valeur suffisante (FS Janbu courbe 10 = 1.03)
- un séisme de 0.1 g conduit à une instabilité pour la majorité des courbes de glissement.

### 3.6. Etude paramétrique ("back analysis")

L'étude paramétrique porte sur la couche comprenant l'ensemble des formations marneuses et argilo-sableuses. C'est dans cette couche que se développent les plus grandes longueurs des courbes de glissement. L'étude a été faite pour toutes les courbes de glissement, dans l'hypothèse de la nappe subaffleurante.

La cohésion et l'angle de frottement interne de la couche étudiée ont été considérés dans les intervalles suivants, valeurs extrêmes plausibles pour ce type de sols argilo-sableux:

- cohésion,  $c'$ : de 0 à 3 t/m<sup>2</sup>
- angle de frottement interne,  $\varphi'$ : de 8° à 30°.

L'analyse paramétrique donne pour chaque cas étudié, deux couples extrêmes cohésion/angle de frottement interne conduisant au coefficient de sécurité voulu. Ces deux couples extrêmes correspondent aux cas limites de formation très argileuse (cohésion la plus élevée, angle de frottement interne le plus faible) et très sableuse (cohésion la plus faible, angle de frottement interne le plus élevé).

Les couples  $c'$  et  $\varphi'$  sont donnés au tableau 5. Les valeurs indiquées correspondent aux valeurs extrêmes des couples  $c'$  et  $\varphi'$ : valeur de  $c'$  correspondant à la valeur minimum de  $\varphi'$  et valeur de  $\varphi'$  correspondant au minimum de  $c'$ . L'indication TS signifie que le coefficient de sécurité est supérieur à la valeur 1 pour tous les couples  $c'$  et  $\varphi'$  testés. L'indication NA signifie que le coefficient de sécurité supérieur à la valeur 1,5 n'est pas atteint pour les couples  $c'$  et  $\varphi'$  testés.



| Courbe de glissement | Coefficient de sécurité |        |         |        |
|----------------------|-------------------------|--------|---------|--------|
|                      | FS (F)                  | FS (B) | FS (J1) | FS (J) |
| <b>C1</b>            | 1.03                    | - 1.12 | 1.01    | 1.09   |
| <b>C2</b>            | 1.32                    | 1.35   | 1.32    | 1.35   |
| <b>C3</b>            | 1.27                    | 1.34   | 1.21    | 1.26   |
| <b>C4</b>            | 1.54                    | 1.56   | 1.54    | 1.55   |
| <b>C5</b>            | 1.79                    | 1.83   | 1.79    | 1.83   |
| <b>C6</b>            | 1.20                    | 1.25   | 1.19    | 1.22   |
| <b>C7</b>            | 1.46                    | 1.63   | 1.39    | 1.62   |
| <b>C8</b>            | 1.26                    | 1.40   | 1.18    | -      |
| <b>C9</b>            | 1.61                    | 1.79   | 1.63    | 1.84   |
| <b>C10</b>           | 0.74                    | 0.80   | 0.77    | 0.82   |
| <b>C11</b>           | 0.82                    | 0.88   | 0.85    | 0.89   |
| <b>C12</b>           | 0.93                    | 1.00   | 0.95    | 1.00   |
| <b>C13</b>           | 0.99                    | 1.07   | 1.01    | 1.07   |
| <b>C14</b>           | 1.09                    | 1.16   | 1.110   | 1.15   |

Tableau 1: Nappe affleurante

| Courbe de glissement | Coefficient de sécurité |        |         |        |
|----------------------|-------------------------|--------|---------|--------|
|                      | FS (F)                  | FS (B) | FS (J1) | FS (J) |
| <b>C1</b>            | 1.25                    | 1.33   | 1.22    | 1.30   |
| <b>C2</b>            | 1.52                    | 1.55   | 1.52    | 1.56   |
| <b>C3</b>            | 1.41                    | 1.49   | 1.35    | 1.41   |
| <b>C4</b>            | 1.84                    | 1.86   | 1.82    | 1.84   |
| <b>C5</b>            | 2.28                    | 2.32   | 2.26    | 2.32   |
| <b>C6</b>            | 1.37                    | 1.43   | 1.36    | 1.40   |
| <b>C7</b>            | 1.65                    | 1.81   | 1.55    | 1.80   |
| <b>C8</b>            | 1.43                    | 1.58   | 1.34    | -      |
| <b>C9</b>            | 1.93                    | 2.11   | 1.93    | 2.18   |
| <b>C10</b>           | 0.85                    | 0.91   | 0.88    | 0.93   |
| <b>C11</b>           | 0.94                    | 1.00   | 0.97    | 1.01   |
| <b>C12</b>           | 1.08                    | 1.12   | 1.09    | 1.15   |
| <b>C13</b>           | 1.15                    | 1.22   | 1.16    | 1.22   |
| <b>C14</b>           | 1.27                    | 1.33   | 1.27    | 1.33   |

Tableau 2: Nappe à 2 m de profondeur

| Courbe de glissement | Coefficient de sécurité |        |         |        |
|----------------------|-------------------------|--------|---------|--------|
|                      | FS (F)                  | FS (B) | FS (J1) | FS (J) |
| <b>C1</b>            | 1.40                    | 1.48   | 1.35    | 1.45   |
| <b>C2</b>            | 1.72                    | 1.75   | 1.71    | 1.76   |
| <b>C3</b>            | 1.56                    | 1.63   | 1.48    | 1.56   |
| <b>C4</b>            | 2.12                    | 2.14   | 2.10    | 2.12   |
| <b>C5</b>            | 2.55                    | 2.58   | 2.52    | 2.59   |
| <b>C6</b>            | 1.55                    | 1.60   | 1.52    | 1.56   |
| <b>C7</b>            | 1.84                    | 2.01   | 1.72    | 1.99   |
| <b>C8</b>            | 1.62                    | 1.77   | 1.50    | -      |
| <b>C9</b>            | 2.25                    | 2.42   | 2.22    | 2.49   |
| <b>C10</b>           | 0.95                    | 1.01   | 0.97    | 1.03   |
| <b>C11</b>           | 1.05                    | 1.11   | 1.07    | 1.12   |
| <b>C12</b>           | 1.22                    | 1.29   | 1.23    | 1.29   |
| <b>C13</b>           | 1.30                    | 1.37   | 1.31    | 1.38   |
| <b>C14</b>           | 1.44                    | 1.50   | 1.43    | 1.49   |

Tableau 3: Nappe à 4 m de profondeur

| Courbe de glissement | Coefficient de sécurité |        |
|----------------------|-------------------------|--------|
|                      | FS (J1)                 | FS (J) |
| <b>C1</b>            | 0.87                    | 0.93   |
| <b>C2</b>            | 0.95                    | 0.96   |
| <b>C3</b>            | 0.86                    | 0.90   |
| <b>C4</b>            | 1.10                    | 1.11   |
| <b>C5</b>            | 1.51                    | 1.54   |
| <b>C6</b>            | 0.88                    | 0.90   |
| <b>C7</b>            | 0.95                    | 1.05   |
| <b>C8</b>            | 0.90                    | -      |
| <b>C9</b>            | 1.16                    | 1.27   |
| <b>C10</b>           | 0.65                    | 0.69   |
| <b>C11</b>           | 0.71                    | 0.74   |
| <b>C12</b>           | 0.77                    | 0.81   |
| <b>C13</b>           | 0.80                    | 0.84   |
| <b>C14</b>           | 0.85                    | 0.89   |

Tableau 4: Séisme 0.1 g (nappe subaffleurante)

Remarque :le tableau 4 ne reprend que les résultats des calculs par la méthode de Janbu, seule à pouvoir prendre en compte l'effet des séismes.

| Courbe<br>de<br>glisse-<br>ment | Coefficient de sécurité = 1 |           |                         |           | Coefficient de sécurité = 1.5 |        |                         |        |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------------|--------|-------------------------|--------|
|                                 | $c'$ ( $\varphi' = 8$ )     |           | $\varphi'$ ( $c' = 0$ ) |           | $c'$ ( $\varphi' = 8$ )       |        | $\varphi'$ ( $c' = 0$ ) |        |
|                                 |                             | séisme    |                         | séisme    |                               | séisme |                         | séisme |
| <b>C1</b>                       | 1.2                         | 2.2       | 19                      | 24        | 2.2                           | NA     | 27                      | NA     |
| <b>C2</b>                       | 1                           | 2.6       | 14                      | 21        | 2.2                           | NA     | 20                      | 30     |
| <b>C3</b>                       | 1.4                         | 3         | 14                      | 21        | 3                             | NA     | 21                      | 30     |
| <b>C4</b>                       | 0.6                         | 1.8       | 13                      | 20        | 1.4                           | NA     | 19                      | 28     |
| <b>C5</b>                       | 0.4                         | 0.8       | 15                      | 20        | 0.8                           | 1.4    | 21                      | 29     |
| <b>C6</b>                       | 1.4                         | 3         | 15                      | 22        | 2.6                           | NA     | 22                      | NA     |
| <b>C7</b>                       | 0.8                         | 2.8       | 11                      | 18        | 2                             | NA     | 17                      | 26     |
| <b>C8</b>                       | 1.4                         | 2.8       | 14                      | 20        | 2.6                           | NA     | 21                      | 29     |
| <b>C9</b>                       | 0.4                         | 1.6       | 11                      | 17        | 1.2                           | 2.8    | 16                      | 24     |
| <b>C10</b>                      | <b>2.8</b>                  | <b>NA</b> | <b>27</b>               | <b>28</b> | NA                            | NA     | NA                      | NA     |
| <b>C11</b>                      | <b>2.4</b>                  | <b>NA</b> | <b>26</b>               | <b>27</b> | NA                            | NA     | NA                      | NA     |
| <b>C12</b>                      | 2.0                         | <b>NA</b> | 22                      | 25        | NA                            | NA     | NA                      | NA     |
| <b>C13</b>                      | 1.8                         | <b>NA</b> | 21                      | 24        | NA                            | NA     | 30                      | NA     |
| <b>C14</b>                      | 1.6                         | 2.8       | 20                      | 23        | 3                             | NA     | 28                      | NA     |

Tableau 5: Etude paramétrique - nappe subaffleurante

Ce tableau 5 amène les remarques suivantes:

- les couples conduisant à l'instabilité (en gras) en l'absence de séisme sont les suivants:

$$\varphi' = 8^\circ \text{ avec } c' = 2.8 \text{ t/m}^2 \text{ et } \varphi' = 19^\circ \text{ avec } c' = 0 \text{ t/m}^2$$

Ces valeurs sont les valeurs minimum que doivent présenter les caractéristiques géomécaniques de la couches argilo-sableuse pour être tout juste stable, le glissement se produisant pour des valeurs inférieures à ces chiffres.

- en cas de séisme, les valeurs sont plus élevées:

$$\varphi' = 8^\circ \text{ avec } c' > 3 \text{ t/m}^2 \text{ (coefficient de sécurité 1 non atteint dans la plage de valeurs choisie) et } \varphi' = 28^\circ \text{ avec } c' = 0 \text{ t/m}^2$$

ce qui indique que, pour résister à un séisme, il faut au minimum, soit une cohésion non négligeable ( $> 3 \text{ t/m}^2$ ) pour un sol argileux, soit un frottement de  $28^\circ$  dans le cas d'un terrain sableux.

- les valeurs des caractéristiques géomécaniques conduisant à un coefficient de sécurité de 1.5, c'est-à-dire à une valeur satisfaisante sont supérieures aux valeurs maximum choisies en l'absence de séisme et *a fortiori* en cas de séisme. Il en résulte que le site ne présente en aucun cas une sécurité suffisante si la nappe est subaffleurante. Si des solutions de confortement devaient être étudiées, elles devraient nécessairement tenir compte de ce facteur.

### 3.7. Conclusions

Les calculs de stabilité montrent que les coefficients de sécurité obtenus sont inférieurs à l'unité pour les courbes de glissement passant par des points caractéristiques repérés sur le terrain (décrochement / bourrelet). Le massif dans son intégralité est susceptible d'être affecté par des glissements. Les courbes critiques de glissement peuvent s'étendre sur toute la longueur de la coupe. Il n'est pas exclu qu'elles soient les courbes enveloppes d'un ensemble de paléoglissements plus locaux qui, par régressions successives, auraient pu affecter l'ensemble de la coupe.

La courbe C10, la plus instable, correspond au léger décrochement en tête et à la loupe de glissement, ce qui semble montrer qu'un début de glissement s'est produit récemment, peut-être lors des derniers séismes ou en période de fortes pluies.

Si le site devait être stabilisé, l'importance de la position de la nappe sur la stabilité suggère de réaliser un drainage efficace et d'éviter de rejeter à l'aval du site les eaux collectées par les drains. Toutefois, un dimensionnement plus précis de ces mesures confortatives nécessiterait davantage d'investigations afin de détailler la structure du sous-sol et les caractéristiques géomécaniques des terrains.

## VII. les datations au C<sup>14</sup>

Huit échantillons de matière organique ont été récoltés dans les diverses coupes réalisées afin de fournir des datations radiométriques (C<sup>14</sup>) des différents événements enregistrés par les séquences sédimentaires étudiées.

Le tableau 1 ci-dessous renseigne la nature et la quantité de matière constituant chaque échantillon ainsi que la localisation des endroits de prélèvement:

|        | lieu de prélèvement                                                                        | nature          | poids de matière sèche |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|
| 134713 | Sérezé, coupe 1: sol non dérangé sous le glissement (x = [3-5.5])                          | charbon de bois | 25.6 g                 |
| 134712 | Sérezé, coupe 1: sol repoussé sous le glissement (x = 9.5-10.2])                           | charbon de bois | 9.3 g                  |
| 134711 | Sérezé, coupe 1: niveau gris à charbon de bois dans le glissement (x = [10-10.8], y = 3.4) | charbon de bois | 11.4 g                 |
| 134714 | Sérezé, coupe 2: base de la fouille (et d'une masse glissée secondaire)                    | bois et mousses | 11.9 g                 |
| 134715 | Croix Polinard, coupe 1: sol non dérangé sous le glissement (x = 11.8)                     | charbon de bois | 33.7 g                 |
| 134716 | Croix Polinard, coupe 1: sol repoussé sous le glissement (x = [8.8-9.6])                   | charbon de bois | 32.5 g                 |
| 134717 | Croix Polinard, coupe 1: sol repoussé sous le glissement (x = 6.6)                         | charbon de bois | 5.9 g                  |
| 134718 | Croix Polinard, coupe 3: base de la fouille (et du glissement)                             | bois            | 67.5 g                 |

Tableau 1: description des échantillons datés.

Ces échantillons ont été expédiés pour datation radiométrique au laboratoire *Beta Analytic Inc.* en Floride. Les pré-traitements mécanique et chimique n'ayant laissé qu'une quantité relativement faible de carbone disponible pour dater les échantillons 134713 (par suite d'une très forte réaction à l'acide lors de l'élimination du fer), 134711 et 134714, ces derniers ont fait l'objet d'une procédure de comptage étendu afin d'optimiser la qualité des datations. Les autres échantillons contenaient tous suffisamment de carbone pour l'application de la procédure radiométrique de comptage standard (synthèse de benzène à partir du carbone de l'échantillon et comptage C<sup>14</sup> dans un spectromètre à scintillation).

Les colonnes 2 et 3 du tableau 2 ci-dessous donnent les âges bruts obtenus par cette technique et l'intervalle de confiance à 95% (soit 2σ) affecté à ces valeurs. On notera que ces âges BP (Before Present) se réfèrent à l'année 1950 AD:

Cependant, ces valeurs conventionnelles ne donnent qu'une idée imprécise de l'âge réel des échantillons, car elles se basent sur l'hypothèse erronée d'une teneur constante de l'atmosphère en C<sup>14</sup> au cours des temps. L'estimation des variations en C<sup>14</sup> de l'atmosphère durant les 10 derniers millénaires et, en conséquence, la calibration des âges C<sup>14</sup> mesurés a été effectuée sur base de la datation radiométrique d'un grand nombre de troncs d'arbres (chênes, séquoias, pins) datés également

|               | Age C <sup>14</sup><br>conventionnel | Intervalle à 95% | Age C <sup>14</sup> calibré | Intervalle à 95%        |
|---------------|--------------------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|
| <b>134713</b> | 1920 BP                              | 1680-2160 BP     | 80 AD                       | 190 BC - 390 AD         |
| <b>134712</b> | 1770 BP                              | 1610-1930 BP     | 250 AD                      | 75-430 AD               |
| <b>134711</b> | 710 BP                               | 570-850 BP       | 1285 AD                     | 1205-1405 AD            |
| <b>134714</b> | 820 BP                               | 700-940 BP       | 1225 AD                     | 1040-1290 AD            |
| <b>134715</b> | 1270 BP                              | 1130-1410 BP     | (720)- 745 -(760) AD        | 645-900 AD              |
| <b>134716</b> | 1360 BP                              | 1240-1480 BP     | 665 AD                      | 600-775 AD              |
| <b>134717</b> | 1940 BP                              | 1820-2060 BP     | 65 AD                       | 55 BC - 225 AD          |
| <b>134718</b> | 1640 BP                              | 1540-1740 BP     | 415 AD                      | 265-290 AD + 325-540 AD |

Tableau 2: datations obtenues.

par dendrochronologie. Les irrégularités de la courbe de calibration (voir figures en fin de chapitre) expliquent que plusieurs âges C<sup>14</sup> calibrés puissent correspondre à une seule valeur mesurée (colonne 4 du tableau ci-dessus) et que les intervalles de confiance soient généralement asymétriques ou même disjoints de part et d'autre de la valeur intersectée sur la courbe de calibration (colonne 5 du tableau).

Par ailleurs, il faut bien noter la possibilité d'un biais dans les âges C<sup>14</sup> obtenus, résultant de la datation de matière qui, quoique se trouvant dans un horizon donné, peut être plus ancienne que cet horizon lui-même. Cela serait par exemple le cas pour des morceaux de charbon de bois contenus dans un sol, l'âge du charbon de bois pouvant être quelque peu supérieur à celui de l'enfouissement du sol sous un glissement (ce qui, dans ce cas, est bien sûr l'information recherchée). De même, pour certains échantillons (134711, 134712, 134713, 134716), la collecte de suffisamment de matière datable a imposé de réunir les débris de charbon de bois présents dans une section parfois plurimétrique du niveau considéré, ce qui peut aussi biaiser légèrement les âges obtenus. Toutefois, dans le cadre des datations à Sérezé et à la Croix Polinard, ces particularités n'engendrent certainement pas d'erreur supérieure à 100-200 ans, que l'intervalle de confiance considéré (95%) doit suffire à couvrir.

L'ensemble des données chronologiques récoltées à Sérezé et à la Croix Polinard permet d'y reconnaître quatre événements de glissement. Le plus ancien est aussi le seul qui soit observé dans les deux glissements étudiés; il survient aux alentours de 100 AD. Ensuite, une première reprise du glissement de la Croix Polinard est notée vers 400 AD, et une seconde permet à l'extrémité de la loupe de glissement principale d'avancer d'une dizaine de mètres supplémentaires vers 700 AD. Enfin, à Sérezé, une loupe de glissement secondaire (par ailleurs morphologiquement individualisable) est datée d'environ 1250 AD. Cependant, alors que les diverses réactivations des glissements sont datées sans équivoque, les âges les plus anciens obtenus sur les deux sites ne résolvent pas la question fondamentale de l'âge du déclenchement originel des glissements de terrain du Pays de Herve. En effet, même si les échantillons qui les ont fournis sont ceux qui se situent le plus loin vers l'amont sous les glissements, les coupes exposées ne reprennent que la partie distale des masses glissées, et il est bien difficile de dire si on ne date pas simplement à ce niveau une énième réactivation de glissements plus anciens.

Certains éléments suggèrent toutefois que l'âge de ~100 AD pourrait correspondre à l'époque du premier déclenchement des glissements de Sérezé et de la Croix Polinard. En premier lieu, la coïncidence du glissement dans les deux sites à cette époque témoigne de l'ampleur plus grande de cet événement par rapport aux remises en mouvement ultérieures. Par ailleurs, toutes les coupes taillées dans le pied des deux glissements ont montré qu'à cet endroit, en amont de la partie terminale longue de 10 à 15 m où la masse en mouvement a simplement glissé sans perturber le sol sur lequel elle s'avancait, cette même masse a raclé et repoussé le sol sous-jacent, qui montre maintenant une allure

en bourrelet de pression sous les matériaux glissés. Ce type de structure est un indice supplémentaire de l'importance des masses et du déplacement qui l'ont créé, de même d'ailleurs que le développement de plans de cisaillement majeurs dans la masse glissée, et il paraît donc raisonnable de penser que le déclenchement des glissements de terrain étudiés fut catastrophique, engendrant immédiatement la plus grande partie du mouvement actuellement identifié. Les résultats de la reconnaissance géophysique du glissement de Sérezé vont également dans ce sens. Ils montrent en effet que les blocs qui ont subi un mouvement de rotation dans la partie amont du glissement ont environ 25 m d'épaisseur et jusqu'à 50 m de développement longitudinal, un ordre de grandeur fort proche de celui qui aurait pu imposer un déplacement unique d'environ 100 m dans la partie inférieure du glissement.

En l'absence d'autres éléments de datation (par exemple, d'autres glissements, ou le sol originel enfoui juste à l'aval des blocs basculés de la partie haute des glissements), nous privilégions donc l'interprétation qui considère que les glissements de terrain du Pays de Herve eurent un départ catastrophique vers 100 AD et que, par la suite, des réactivations mineures ne retouchèrent que légèrement leur extrémité aval ou leur conformation superficielle.

## Comparaison avec des données récemment publiées

Un programme de recherche portant sur les glissements de terrain dans la Communauté Européenne a été réalisé par des chercheurs d'une vingtaine d'universités de 1991 à 1993. Dans ce cadre, de nombreux glissements de terrain ont été étudiés en quelques endroits d'Europe occidentale. La seule région proche de chez nous qui a été considérée est située au sud de l'Angleterre. Son étude a fourni des renseignements intéressants que nous rapportons ici (European Community Programme Epoch, 1994). Cette recherche a été prolongée par un second programme, intitulé TELSEC et également subsidié par l'U.E. Les résultats de ce travail viennent d'être publiés en octobre 1999 dans la revue *Geomorphology*. Enfin nous ferons état d'une autre publication très récente (Delmonaco *et al.*, 1999).

Considérons d'abord les résultats qui se rapportent au sud de l'Angleterre et à l'île de Wight, seules régions envisagées dans le premier programme européen mentionné ci-dessus pour lesquelles on peut penser que les fluctuations climatiques holocènes ont été comparables à celles de la Belgique. On notera toutefois que le contexte côtier dans lequel se développent ces glissements de terrain répond à certaines influences qui ne sont pas rencontrées dans le Pays de Herve. Dans le rapport "European Community Programme EPOCH, Contract 90 0025" (p. 341), Brunsden & Ibsen (1994) ont écrit:

*"... the inland record shows a weak landslide peak from the sub-Boreal from 5500-3000 BP; but strong for the early sub-Atlantic 2500-2000 BP, the little ice Age 1550-1850 and the modern period. The coast shows strong peaks at 5500-3000 BP as landsliding began to respond to erosion; a major phase at 2500-1800 BP on the Isle of Wight related to the sharp deterioration of climate..."*

Nous constatons que les intervalles de confiance à 95% de 3 sur 8 de nos datations recouvrent partiellement la période de 2500 à 1800 BP, période que Brunsden & Ibsen interprètent comme marquée par une augmentation des précipitations et une diminution des températures. L'échantillon 134718 (du moins l'extrémité de son intervalle de confiance à  $2\sigma$ ) est pour sa part postérieur de seulement 115 ans à la période en question. Soulignons aussi que cet extrait de Brunsden & Ibsen (1994) signale en outre un accroissement des glissements de terrain ainsi que de nombreuses remises en mouvement de glissements anciens **pendant la période moderne**. Les auteurs interprètent cela comme un phénomène naturel lié à un changement climatique.

Par ailleurs, Delmonaco *et al.* (1999, p. 51) écrivent:

*"Many records from various regions of the world indicate that the period A.D. 1000-1300 was relatively warm, defined by Lamb (1965) as "Early Medieval Warm Epoch". In Europe, this period was characterised by mild winters and very warm summers with estimated temperature of 0,5-1,0°C higher than present time. Precipitations was more important in winter while summers were characterised by dry conditions."*

Deux des datations obtenues au lieu-dit Sérezé correspondent à cette dernière période.

En bref, les diverses datations obtenues à Sérezé s'inscrivent dans deux périodes reconnues comme favorables au développement de glissements de terrain (en Angleterre pour la première, en "Europe" (?) pour la seconde). Par contre, une seule datation du glissement de la Croix Polinard peut être rapportée à la première de ces périodes.

Dans un article de synthèse rassemblant toutes les données actuellement disponibles, Dikau & Schrott (1999, p. 5) insistent sur la difficulté de ce type d'étude. Ils écrivent:

*"If the past landslide event has been dated, there is, however, no complete certainty as to whether this landslide has been triggered by the climatic conditions present at the time of failure or by other causes... The establishment of a Holocene slope instability history is difficult because of the low number of dated landslides available."*

Au total, l'ensemble des citations indique que les glissements de terrain du Pays de Herve pourraient avoir été, au moins partiellement, en phase avec les phénomènes observés au Royaume-Uni, supposés avoir dépendu de variations climatiques.

En conclusion, les datations obtenues établissent:

- 1) que les glissements sont anciens et ont subi plusieurs phases de déplacement,
- 2) que seul le premier événement, daté à environ 100 AD, a provoqué un glissement simultané dans les deux sites étudiés,
- 3) que certaines phases de mouvement coïncident avec des périodes pour lesquelles les conditions climatiques sont supposées favorables aux glissements en Angleterre ou, plus généralement, en Europe.





















## **VIII. Mécanisme et causes des glissements de terrain**

Sur la base des indications fournies par l'analyse morphologique des glissements, par l'étude géophysique réalisée à Sérezé et par les diverses fouilles effectuées, nous tenterons dans ce chapitre de préciser le(s) mécanisme(s) responsable(s) du déclenchement des glissements de terrain du Pays de Herve ainsi que les facteurs déterminants de ceux-ci et leur cause première.

### **1. Le mécanisme des glissements**

L'analyse morphologique révèle la présence quasi-systématique dans les grands glissements d'un escarpement de départ important d'allure semi-circulaire à elliptique et surtout de plusieurs rides allongées parallèlement au versant et séparées par des zones en contrepente dans la moitié supérieure de la masse glissée. Ceci témoigne du développement de glissements rotationnels multiples, impliquant autant de blocs basculés qu'on observe de rides majeures sur le terrain (Buma & van Asch, 1996). Par ailleurs, la zone d'accumulation à allure désordonnée qu'on observe à l'aval des blocs basculés est généralement plus allongée que ce qu'on est en droit d'attendre au pied d'un glissement rotationnel pur. Atteignant dans certains cas près de 200 m d'extension longitudinale (Croix Polinard), elle atteste clairement que les glissements considérés sont de nature composite.

L'étude géophysique menée à Sérezé confirme pleinement les indications fournies par la morphologie de surface. Dans ce cas précis, elle montre l'existence au pied de l'escarpement de deux grands blocs basculés, définissant la première moitié du glissement (figure 6.10). Les dimensions de ces blocs sont de l'ordre de 25 m en épaisseur et 50 m en développement longitudinal. Ils présentent des surfaces de cisaillement basal distinctes dont l'emboîtement suggère une évolution du mouvement de l'amont vers l'aval. L'examen de la tomographie électrique révèle aussi la présence de deux blocs basculés superficiels, de dimensions beaucoup plus réduites, superposés aux blocs principaux. Vers l'aval, elle montre enfin une masse déplacée à allure en planche parallèle à la pente, longue d'au moins 100 m et épaisse de 10 m.

Quant aux fouilles effectuées à hauteur du talus terminal des glissements de Sérezé et de la Croix Polinard, elles ont mis en évidence la géométrie interne de cette partie de la zone d'accumulation. Celle-ci est caractérisée par l'existence de plans de cisaillement importants. Onduleux, ces plans peuvent être suivis sur toute la longueur des coupes exposées et sont pourvus d'une "gouge" argileuse marquée de très nettes stries de glissement. Les masses de matériaux qu'ils séparent ont très souvent conservé intacte leur structure interne. C'est par exemple le cas de paquets de sables d'Aachen observés dans une des fouilles à la Croix Polinard, basculés mais avec une stratification entrecroisée originelle et des alternances sable silteux - argile toujours parfaitement en ordre. Bien sûr, les masses de matériaux colluviaux déplacés par le glissement n'ont pas de structure propre. L'ensemble de ces observations conforte l'interprétation qui voit en la partie aval des glissements étudiés le résultat d'un glissement translationnel de blocs cohérents, très nettement distincts de dépôts qui auraient subi un écoulement "fluide".

De façon générale, on constate enfin que les escarpements de départ de tous les glissements répertoriés dans la zone de Battice sont situés en des endroits où affleurent les argiles glauconifères de la formation de Vaals, ou à la limite d'affleurement de la formation crayeuse de Gulpen (dont la partie sommitale est fréquemment altérée en argile à silex). Toutefois, les observations de terrain et l'étude géophysique soulignent que dans tous les cas, la formation sableuse d'Aachen se situe approximativement à hauteur de la semelle des glissements.

Ceci nous incite à voir dans la liquéfaction des sables d'Aachen, réputés pour leur caractère extrêmement "boulant", le facteur décisif du déclenchement originel des grands glissements de terrain du Pays de Herve. Pour expliquer les mouvements de masse observés, le mécanisme suivant semble donc pouvoir être proposé: pour une cause qui sera discutée plus loin, des niveaux sableux de la formation d'Aachen sont subitement liquéfiés, enlevant momentanément tout support aux formations surincombantes, spécialement en pied de versant où affleure la formation d'Aachen. Ceci déclenche d'abord un glissement translationnel de blocs cohérents de la formation de Vaals dans la partie basse et

en pente relativement faible du versant (le glissement n° 4, localisé à l'ouest de Thimister, n'a pas évolué au-delà de ce stade), lequel mouvement engendre à son tour par évolution rétrogressive les mouvements rotationnels de plusieurs blocs appartenant à la partie haute, en pente plus forte, du versant, où se forme alors l'escarpement raide observé dans la plupart des cas (figure 6.10). Ce mécanisme impliquerait donc que l'ensemble des formes majeures constituant les glissements seraient apparues simultanément à l'occasion d'un événement de nature catastrophique. Par la suite, ainsi que le montrent les datations  $C^{14}$ , la tomographie électrique et l'enregistrement de mouvements affectant actuellement certains glissements, des réactivations de ces grands glissements ont pu avoir lieu. Ces réactivations d'ampleur limitée affectent principalement la partie distale de la zone d'accumulation, ou correspondent aussi au basculement superficiel de petits blocs déstabilisés dans la moitié supérieure des glissements. La nature des réactivations locales des glissements est forcément différente de celle des glissements originels. Elles résultent en effet maintenant en premier lieu de l'existence de plans de faiblesse (les plans de cisaillement) dans la masse glissée et n'ont plus rien à voir avec la liquéfaction des sables d'Aachen.

## 2. Les facteurs déterminants du glissement

Parmi les facteurs locaux déterminant l'apparition des glissements de terrain, nous envisagerons rapidement la lithologie des formations affleurantes et la pente des versants affectés.

En ce qui concerne la lithologie, il faut successivement évoquer le rôle de la nature, de l'épaisseur et du pendage des formations géologiques en présence.

La répartition des formes étudiées et le mécanisme proposé ci-dessus montrent que la combinaison lithologique nécessaire à l'apparition de glissements de terrain est constituée de la superposition des sables et silts d'Aachen et des argiles marneuses de Vaals. Les caractéristiques géotechniques de l'un et l'autre matériau sont particulièrement défavorables en effet: dans les "sables" d'Aachen, l'alternance fréquente de sables fins silteux (dont la porosité dépasse 40%) et de silts argileux entraîne la présence de nappes locales en charge dans les sables fins, où les surpressions ne peuvent être aisément évacuées et où des phénomènes de boulangerie se manifestent (LGIH, s.d.). Quant aux "smectites de Herve" (formation de Vaals), leur caractère gonflant ne fait qu'accroître leur propension à glisser. On notera par ailleurs les rapides variations latérales de faciès affectant spécialement la formation d'Aachen, qui rendent assez aléatoire l'occurrence des conditions lithologiques idéales et peuvent ainsi expliquer la localisation individuelle des glissements de terrain. Enfin, il faut noter que, curieusement, la zone de la crête de Battice affectée par les glissements de terrain est aussi celle où la formation crayeuse de Gulpen fait défaut par-dessus les smectites de Herve.

A première vue, l'épaisseur des formations en présence, et notamment de celle d'Aachen, pourrait bien aussi jouer un rôle dans la localisation des glissements de terrain. En effet, il semble normal de supposer qu'à partir du moment où les sables d'Aachen atteignent une puissance importante, il est plus difficile d'y réaliser des pressions de pore élevées et donc de les liquéfier. Cette hypothèse néglige cependant le fait que ce n'est jamais la masse entière des sables d'Aachen qui est liquéfiée, mais exclusivement des niveaux relativement minces (quelques dizaines de cm au maximum) de sables fins coincés entre des niveaux argileux imperméables. Peu importe donc l'épaisseur totale de la formation, ce qui est déterminant, c'est l'alternance de niveaux de perméabilité différente incluant nécessairement des passées de sables fins. D'ailleurs, les sables d'Aachen atteignent des puissances de l'ordre de 10 m et plus dans la zone de distribution des glissements de terrain.

Le pendage des couches crétacées dans le Pays de Herve, quoiqu'il ne soit pas déterminant, a certainement aussi favorisé dans une certaine mesure l'apparition de la majorité des glissements recensés. De façon générale, ce pendage est relativement régulier dans la zone considérée, où il présente une valeur de  $\sim 1.5\%$  vers le NNO. Il est donc idéalement orienté par rapport aux glissements situés sur le flanc nord de la crête de Battice, qui se sont déplacés précisément dans cette direction. L'analyse des orientations prises par les zones d'arrachement des glissements répertoriés montre même que la direction NNO appartient à une zone d'orientation très nettement préférentielle. Par ailleurs, les coupes géologiques réalisées sur base de nombreux sondages indépendants lors de la construction de l'autoroute Roi Baudouin (Graulich, 1969) et des reconnaissances préalables à la construction de la ligne de chemin de fer à grande vitesse Liège-Cologne (LGIH, s.d.) montrent qu'à Sérezé, la surface de

base des sables d'Aachen présente une pente locale de ~3% vers l'ouest. A nouveau, cette orientation correspond à celle du déplacement observé dans les glissements de l'endroit. Quant à la zone des glissements situés entre Chaineux et Manaihan, sur le flanc oriental de la crête N-S qui s'étire vers Dison, il manque de sondages pour pouvoir y représenter l'allure de la surface de base de l'Aachenien.

Enfin, du point de vue topographique, on pourrait aussi considérer que la pente des versants a certainement joué un rôle dans la localisation et le déclenchement des glissements de terrain. De façon assez surprenante pourtant, l'inclinaison des pentes affectées par ceux-ci reste toujours fort modérée, comprise entre 4 et 9.5° (soit 6 à 17%), quoique, assez localement il est vrai, la zone d'étude présente des pentes dépassant 12°. En réalité, et malgré le fait que des pentes très faibles, inférieures à 4°, ne puissent bien entendu supporter aucun glissement, il semble que le facteur "pente" ne soit pas indépendant, et que les glissements observés se localisent sur des pentes inférieures à 10° simplement parce que des pentes plus importantes sont pratiquement absentes sur les versants qui taillent les argiles de la formation de Vaals.

### 3. La cause première des glissements

La recherche de la cause première des grands glissements de terrain du Pays de Herve est rendue fort délicate par une autre observation relative à leur répartition. En effet, à l'exception des petites formes de Bolland et d'Aubel, d'origine clairement différente, tous les glissements répertoriés se concentrent dans une aire d'environ 4 sur 5 km dans et à proximité immédiate du graben de La Minerie, une structure géologique dont l'activité tertiaire et même quaternaire a été démontrée (Forir, 1906; Ancion & Evrard, 1957; Graulich, 1959) (figure 3.1). A l'ouest, les glissements de Chaineux - Manaihan s'égrènent le long de la faille de Monty, qui constitue la bordure occidentale du-dit graben. A l'est, les grandes formes de la Croix Polinard et de Sérezé chevauchent pour ainsi dire la faille d'Ostende qui représente non seulement la bordure orientale du graben de La Minerie, mais surtout le prolongement nord de la zone faillée de Hockai, connue pour être une faille sismogénique active (Camelbeeck, 1993). Quant au très grand glissement de Clermont, situé le plus à l'est, il n'est lui-même éloigné que de 2 km de la faille d'Ostende.

Cette proximité des glissements et d'une faille active va de pair avec le fait qu'apparemment, à l'est de Clermont où plus aucun mouvement de masse n'est repéré, les conditions topographiques ne changent pourtant pas particulièrement. En effet, les flancs des crêtes du Pays de Herve continuent à y exposer des versants de pentes comparables. Du point de vue lithologique par ailleurs, la formation de Vaals continue à présenter une prédominance du faciès argileux au moins jusqu'au cimetière militaire d'Henri-Chapelle vers le nord. Seule l'apparition des craies de la formation de Gulpen en sommet de crête marque un changement d'ordre lithologique au passage des limites de l'aire de distribution des glissements de terrain, tant à l'est qu'à l'ouest. Toutefois, dans l'état actuel de nos connaissances, il n'est pas du tout clair que ces craies surincombantes (généralement de puissance supérieure à 10 m) puisse exercer une influence protectrice vis-à-vis du déclenchement des glissements dans les smectites affleurant plus bas sur les versants. L'alternative à trancher est donc la suivante: doit-on attribuer une origine climatique ou sismique aux glissements de terrain du Pays de Herve? La question est primordiale car ces deux causes potentielles ayant des périodes de récurrence très différentes, l'importance de l'aléa que représentent les glissements qui en résulteraient est également tout à fait différente.

Toutefois, cette question ne se pose que pour le déclenchement originel des grands glissements, et il est utile d'évacuer d'abord la question de l'origine des petites réactivations que ceux-ci ont subies épisodiquement. Pour ces réactivations mineures, une origine climatique liée à des épisodes de très fortes précipitations ne fait le plus souvent aucun doute. Elle est par exemple démontrée par les déplacements enregistrés actuellement sur le site de Manaihan, lesquels sont étroitement corrélés avec les périodes de précipitations excessives que la région a subies récemment, notamment en septembre 1998 (voir chapitre 9). Les datations C<sup>14</sup> effectuées à Sérezé ont aussi mis en évidence un épisode de mouvement vers 1250 AD, au coeur d'une époque (1000-1300 AD) identifiée comme favorable aux glissements de terrain en Europe en raison d'hivers fort doux et extrêmement pluvieux (Delmonaco *et al.*, 1999). De toute façon, comme déjà signalé, les diverses reprises limitées des déplacements résultent d'un mécanisme différent de celui qui fut à l'oeuvre lors de l'apparition des grands

glissements puisque la liquéfaction des sables d'Aachen ne doit, ou même le plus souvent ne peut plus être invoquée. Ces remises en mouvement ne concernent plus en effet que des matériaux superficiels déstructurés et mal stabilisés, principalement à hauteur des pentes les plus fortes marquant la topographie de la masse glissée (surtout au niveau du talus terminal, toutes conditions restant inchangées: le cas assez particulier du glissement de Manaihan est discuté dans le chapitre 9). La présence de surfaces de cisaillement au sein des argiles glissées, surfaces facilement lubrifiables et en outre inclinées de façon idéale dans le sens de la pente du versant, suffit à relancer des déplacements locaux à l'occasion de fortes pluies.

Pour l'ensemble des grands glissements de terrain par contre, l'analyse proposée du mécanisme et les datations disponibles suggèrent qu'ils résultent d'un événement catastrophique, éventuellement unique et qui pourrait alors être daté d'environ 100 AD. Il est bien entendu que, théoriquement, un événement climatique exceptionnel (ou plusieurs si les glissements non datés devaient remonter à une époque différente de ceux de Sérezé et de la Croix Polinard) pourrait être tenu pour responsable de la création de ces glissements. Sur le plan climatique précisément, plusieurs études concernant des glissements de terrain en Europe suggèrent que la période 2500-2000 BP fut éminemment favorable à leur développement du fait d'une nette dégradation climatique (Starkel, 1966; Brunsden & Ibsen, 1994a, 1994b). Cependant, un examen plus approfondi de ces articles révèle que leurs conclusions sont fondées sur des datations très peu nombreuses, et il serait donc fort hasardeux d'imaginer que les glissements du Pays de Herve vers 100 AD (c'est-à-dire 1850 BP) doivent être rattachés à cette période, dont la signification réelle reste incertaine.

Si toutefois on souhaite envisager plus avant la possibilité d'une origine climatique des glissements étudiés, il reste surtout à comprendre les caractéristiques de leur répartition spatiale. On admet aisément qu'aucune forme ne soit identifiée sur les flancs de la crête à l'ouest de Battice, puisque la formation des sables aacheniens, bien développée dans l'est du Pays de Herve, se termine en biseau à hauteur de Chaineux et Battice. Par contre, comme il a déjà été suggéré, la limite orientale de la zone des glissements est beaucoup moins facilement justifiable par le contexte géologique et topographique. Ainsi, pour ce qui concerne la formation de Vaals, on peut considérer que les argiles marneuses glauconifères en restent le matériau constitutif prédominant dans toute la région étudiée, qui inclut la crête principale du Pays de Herve, de Herve à Henri-Chapelle, ainsi que les deux crêtes qui la prolongent au nord respectivement vers Aubel et Hombourg; il faut en tout cas passer nettement au nord d'Henri-Chapelle pour voir les niveaux sableux (fréquemment indurés par ailleurs dans cette zone) prendre le dessus. L'augmentation de puissance de la formation d'Aachen vers l'est ne joue probablement pas un rôle plus important. Quant à ses variations de faciès, elles n'empêchent pas les intercalations de sables fins et de silts argileux de se manifester au moins jusqu'à Elsaute et Henri-Chapelle. Plus à l'est, on notera même que si les sables d'Aachen deviennent dans l'ensemble plus homogènes, ils n'en restent pas moins entremêlés vers la base avec les argiles d'Hergenrath sous-jacentes. Les craies de la formation de Gulpen viennent pour leur part simplement coiffer le sommet de la crête à partir de Clermont vers l'est, sans qu'on puisse reconnaître une influence quelconque qu'elles pourraient avoir sur le comportement au glissement du couple sensible Vaals-Aachen sous-jacent. Enfin, les conditions topographiques restent pareilles à elles-mêmes bien au-delà de la limite orientale de la zone des glissements. Au total donc, même si, en soi, l'hypothèse climatique ne peut être rejetée, sa conjonction avec les conditions géologiques et topographiques régionales explique mal les limites de l'aire de répartition des glissements de terrain, spécialement à l'est.

Ceci nous pousse en conséquence à examiner les particularités des glissements susceptibles de leur faire attribuer une origine sismique. Il faut d'ailleurs noter que, dès 1969, Graulich avait proposé une cause de cette nature pour expliquer l'origine des glissements de terrain qui avaient été remis en mouvement à Sérezé lors de la construction de l'autoroute. On peut en effet aligner une série d'indices concourant à rendre l'hypothèse sismique plausible sinon probable:

1. en premier lieu bien sûr, leur répartition centrée sur le graben de La Minerie, et spécialement sur sa bordure orientale, matérialisée par la faille d'Ostende, est significative. Forir (1906) a montré que les dépôts crétacés ont subi un déplacement vertical d'environ 23 m le long de cette faille. Bien plus, elle constitue un segment de la zone faillée de Hockai, zone sismogénique où ont notamment été enregistrés un séisme de magnitude  $M_L = 2.9$  en 1985 et un essaim de microséismes en 1989-1990

(Camelbeeck, 1993). C'est encore sur cette même faille qu'on soupçonne qu'aurait pu s'être produit le tremblement de terre de Verviers le 18 septembre 1692, certainement le séisme historique le plus violent qui ait secoué nos régions et pour lequel on estime la magnitude  $M_w$  à plus de 6.0 (Camelbeeck, communic. pers.; Camelbeeck *et al.*, 1998). En outre, la faille de Monty, sur laquelle s'alignent les glissements de terrain de Chaineux-Manaihan, semble avoir aussi subi des mouvements quaternaires, notamment à Petit Rechain, 1 km au sud de Manaihan (Graulich, 1959).

2. il a été clairement montré que les phénomènes de liquéfaction, dynamique en l'occurrence, sont le plus souvent (au moins en contexte continental) associés aux secousses cycliques imprimées par les ondes sismiques à des matériaux susceptibles lors d'un tremblement de terre (Seed, 1968). Si on accepte que la liquéfaction des sables d'Aachen est à l'origine de la mise en mouvement des glissements, on prend alors une option sérieuse sur l'hypothèse sismique.

3. les résultats des calculs de stabilité présentés au chapitre 6 confirment la nécessité d'une intervention dynamique pour déclencher le glissement de Sérezé. Ils montrent en effet que les lignes de glissement C3 et C7 (figure 6.11), correspondant le mieux à la surface de glissement originelle, sont toujours stables en conditions statiques, quelle que soit la position envisagée pour la nappe aquifère. Seule l'intervention d'une accélération verticale et horizontale supplémentaire de 0.1 g (d'origine sismique) permet de déstabiliser le massif suivant ces lignes. On notera par ailleurs que cette modélisation ne représente que très imparfaitement, toujours de façon semi-statique en réalité, l'influence d'un séisme sur le massif puisque le caractère vibratoire des secousses sismiques n'y est pas pris en compte (Lee & Edwards, 1986).

4. l'occurrence simultanée des deux glissements datés vérifie également une condition *sine qua non* de l'hypothèse d'une origine sismique des glissements.

5. l'ampleur beaucoup plus grande des désordres survenus lors de l'événement daté de ~100 AD par rapport aux remises en mouvement ultérieures qui, pour leur part, répondent probablement le plus souvent à des conditions climatiques particulières, suggère que la cause des glissements en 100 AD était d'une autre nature.

6. le développement des mouvements sur des pentes très modérées et la position de l'escarpement de départ le plus souvent dans la partie haute du versant constituent deux caractéristiques supplémentaires des glissements de terrain résultant de tremblements de terre (Hansen, 1965; Jibson & Keefer, 1993).

7. le type des glissements décrits dans le Pays de Herve (glissement de blocs cohérents de sol et de formations meubles) ainsi que leurs dimensions imposantes en font aussi des formes semblables à celles que l'on observe très fréquemment à la suite de tremblements de terre (Crozier, 1992; Jibson, 1996). Perrin & Hancox (1992) suggèrent par ailleurs que, très souvent, les glissements occasionnés par des périodes de précipitations intenses montrent une morphologie (et une structure interne) témoignant d'un déplacement plus fluide des matériaux.

8. enfin, l'observation d'un petit escarpement de faille à proximité immédiate du glissement de Sérezé constitue un argument supplémentaire. Bien sûr, la coupe qui a permis de s'assurer que le ressaut topographique observé en surface correspondait bien à une faille a en même temps suggéré que son existence pourrait être due à un contraste lithologique. Il n'empêche toutefois que cette observation ponctuelle ne peut être extrapolée sans autre forme de procès à toute la longueur du ressaut (environ 800 m). Par ailleurs, la seconde coupe réalisée au travers de cette faille dans l'axe d'un petit vallon remblayé n'a montré aucune déformation des argiles de remblaiement. Cependant, la présence de troncs sciés en place dans ces argiles indique que le remblaiement du vallon pourrait bien avoir été associé à la période des défrichements du Moyen-Age, et qu'il ne pourrait donc témoigner d'un éventuel mouvement de la faille en 100 AD. La question de la signification réelle de ce ressaut reste donc totalement ouverte.

Comme c'est presque toujours le cas en pareilles circonstances, la démonstration de l'origine sismique des glissements de terrain du Pays de Herve ne peut donc être définitive, loin s'en faut, mais il semble cependant que les arguments en faveur de cette origine soient assez nombreux pour qu'elle mérite d'être considérée avec attention et qu'un document évaluant le risque de glissement de terrain

dans la région en tienne compte. Cette origine sismique n'aurait d'ailleurs absolument rien d'extraordinaire en regard de l'activité sismique régionale et en particulier du caractère sismogénique reconnu de la zone faillée de Hockai. Keefer (1984) a en effet établi une série de relations empiriques entre les caractéristiques des glissements de terrain d'origine sismique et de leur répartition et la magnitude des séismes qui les ont causés. Tant le type des glissements observés dans le Pays de Herve que l'extension de leur aire de répartition (environ 20 km<sup>2</sup>) et que la distance maximale d'environ 2 km entre le glissement le plus éloigné (celui de Clermont) et la zone de rupture du séisme (par hypothèse, la faille d'Ostende à hauteur de Thimister-Sérezé) convergent parfaitement vers une magnitude  $M_s$  d'environ 4.8 - 5.0 (équivalant à une magnitude locale  $M_L$  de  $\pm 5.3 - 5.5$ ) pour le séisme responsable (si on lui suppose en outre une profondeur hypocentrale "moyenne", de l'ordre de 10 km). Une secousse de cette ampleur paraît tout à fait acceptable pour la zone faillée de Hockai, puisqu'on pense que le séisme historique de 1692, qui l'a probablement ébranlée également, avait une magnitude largement supérieure à 6.0 (Camelbeeck, communic. pers.). Ce qui serait étonnant au contraire, ce serait précisément que ce tremblement de terre historique, responsable de dégâts particulièrement importants dans les villages au nord de Verviers (mais aussi dans la région de Stavelot – Malmédy), n'aurait pas remis en mouvement les glissements existant au préalable. La rareté des formes datées à ce jour ne permet toutefois pas de préjuger de ce fait, sans oublier en outre que, pour peu que l'épicentre du séisme de 1692 ait été situé à quelque distance au sud de la crête de Battice, les formations géologiques susceptibles de glisser aient été en-dehors de la zone d'intensité suffisante à déclencher des mouvements de terrain ( $MMI = VII$  d'après Keefer, 1984).

## **IX. Activité actuelle des glissements de terrain**

A l'origine de la présente étude se trouve l'observation que des mouvements de terrain importants ont eu lieu à Manaihan (commune de Herve - Battice) lors de l'automne 1998 et de l'hiver qui a suivi. En effet, l'aspect préoccupant d'un glissement de terrain pour l'aménagement du territoire n'est pas tant son existence que le fait qu'il soit susceptible de se mouvoir actuellement. Il convient alors de déterminer les circonstances particulières, climatiques, anthropiques ou combinées, qui sont favorables à la réactivation des déplacements. C'est pourquoi une étude des mouvements récents à Manaihan a été entreprise, accompagnée d'un suivi des déplacements du terrain depuis mars 1999. Parallèlement, des observations relatives à l'activité des autres glissements de terrain répertoriés dans le Pays de Herve ont également été collectées.

### **1. Le glissement de terrain de Manaihan**

#### **1.1. L'événement de septembre 1998**

*Figure 9.1. Ressaut apparu en tête du glissement de Manaihan en septembre 1998 (ici dans la pelouse de la propriété de M. Henrard).*

Les premières observations véritablement alarmantes relatives au glissement de terrain de Manaihan ont été effectuées après les précipitations exceptionnelles des 13 et 14 septembre 1998. A la suite de ces pluies, des affaissements importants se sont manifestés en tête du glissement, avec le développement de ressauts vifs au niveau de l'escarpement de départ du glissement. Un ressaut d'environ 0.8 m de haut et orienté N-S est notamment apparu sur une longueur de 70 m, dénivellant l'entrée de la prairie contiguë au bâtiment des « Cafés Liégeois » ainsi que la pelouse et l'entrée de la menuiserie Henrard (figure 9.1). Ce ressaut principal était localement accompagné de ressauts mineurs, pour une dénivelée totale dépassant 1 m en certains endroits. Prolongeant le ressaut principal vers le sud, des fissures apparurent également quelques temps après dans le tarmac neuf de l'entrée

d'une station de Distrigaz installée deux ans auparavant à côté du bâtiment des Cafés Liégeois. Ces fissures, qui allaient progressivement s'élargir par la suite, entraînèrent la décision de fermer la station le 1er novembre 1998. La figure 9.2 montre que la fissure principale à l'entrée de la station mesurait un peu plus de 0.3 m de large (pour une dénivelée d'environ 0.15 m) le 19 février 1999 et qu'elle s'est encore élargie d'une quinzaine de centimètres supplémentaires dans l'année qui a suivi.

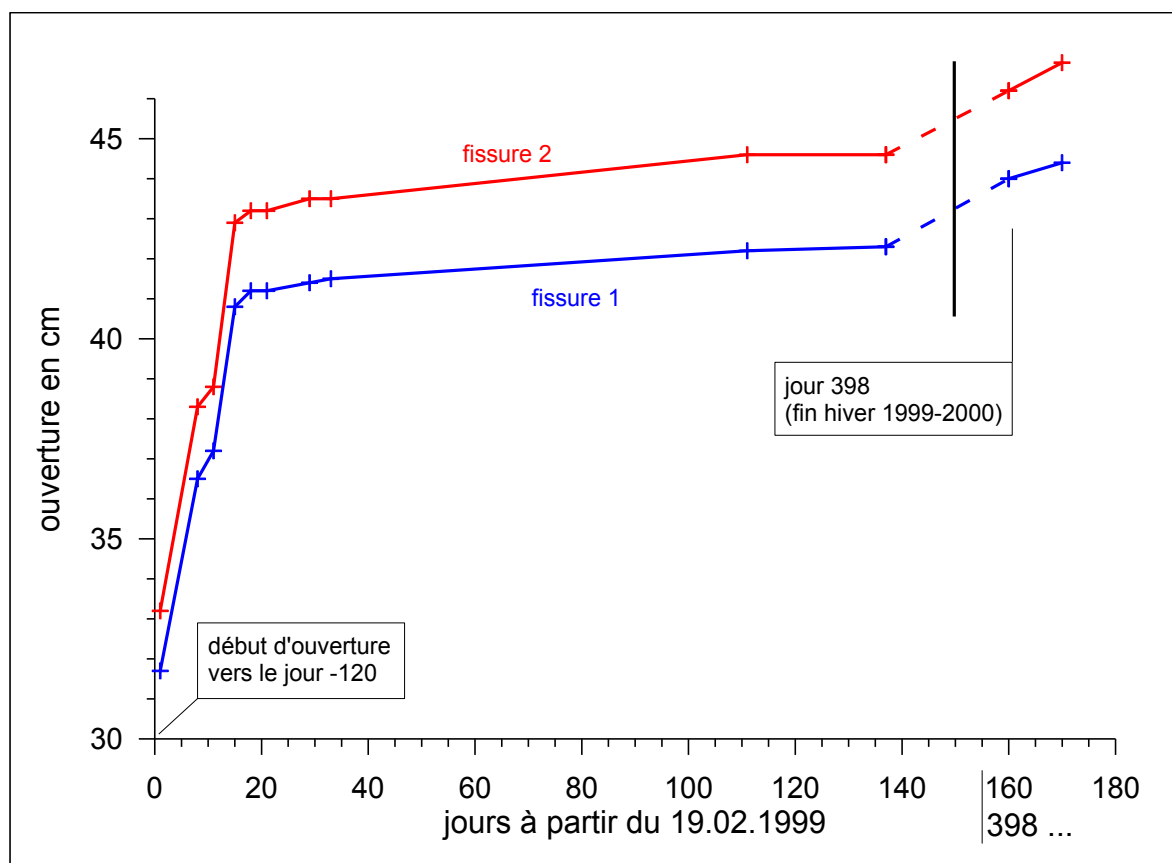


Figure 9.2. Chronologie de l'élargissement des fissures apparues dans le tarmac à l'entrée du chemin d'accès à la station Distrigaz de Manaihan.

Le même épisode pluvieux de septembre 1998 provoqua aussi des mouvements de terrain importants dans la prairie appartenant à M. Leruth et située au pied du versant sur lequel est installé un château d'eau de la SWDE. De très nombreux ressauts vifs y apparurent, majoritairement orientés au NE ou à l'ENE, soit légèrement obliques par rapport à l'escarpement de départ du glissement à cet endroit. La dénivelée moyenne de ces ressauts est de l'ordre de 0.5 m. On notera donc qu'ici, contrairement à ce qui est observé dans la propriété de M. Henrard, la rupture du sol affecte les terrains situés au pied de l'escarpement. Il semble qu'en réalité, la jonction puisse être réalisée entre les observations effectuées de part et d'autre, appartenant toutes à une ligne de rupture unique qui recoupe l'escarpement obliquement du sud au nord, puis au nord-est. Les ressauts apparus dans la prairie de M. Leruth délimitent notamment un graben orienté au NE et résultant du déplacement des masses de terrain situées plus à l'aval (c'est-à-dire à l'est) (figure 9.3). Enfin, il semble bien que ce soit au même moment qu'un autre talus se développa dans le verger situé à l'est de la propriété de M. Liégeois (soit à l'extrême sud du glissement). Quoique moins tranché puisque la surface herbeuse n'y a pas été arrachée, il représente une dénivellation d'environ 1 m sur une distance de 20 à 30 m.



*Figure 9.3. Petit graben apparu en septembre 1998 au pied de l'escarpement de départ du glissement de Manaihan, dans une prairie appartenant à M. Leruth.*

Si les mouvements en tête du glissement de Manaihan furent spectaculaires en septembre 1998, leur répercussion morphologique dans la partie aval du versant est beaucoup plus ténue. Tout au plus a-t-on pu suivre sur quelques 10 à 20 m dans la prairie exploitée par M. Hick deux bourrelets onduleux, hauts et larges seulement d'une dizaine de centimètres.

Suite à la réactivation du glissement en septembre 1998 et à l'occasion de nouvelles précipitations abondantes, on observa encore au début du mois de mars 1999 la réapparition d'un talus de  $\pm 0.3$  m à l'entrée de la prairie de M. Hick et devant l'atelier de M. Henrard. Vers le 15 mars 1999 apparurent deux entonnoirs d'effondrement larges de 2 m et profonds de 3 m aux endroits où un égout industriel de l'AIDE en provenance du zoning industriel de Battice recoupe les bordures N et S du glissement. Ces deux effondrements mirent à jour la rupture la canalisation, qui a subi à ces endroits des décrochements de près de 2 m depuis son établissement. Vers le même moment, dans la prairie de M. Leruth, la fissure bordant le graben au nord s'est prolongée vers l'est jusqu'à atteindre l'égout. Le 27 avril 1999, la vanne fermant une conduite partant du château d'eau vers l'est, à travers le glissement, lâcha, entraînant le déversement des 1000 m<sup>3</sup> d'eau du réservoir dans le glissement de terrain. Cet événement, probablement aussi lié aux mouvements récents du terrain, permit de constater que, malgré une infiltration non négligeable, une masse importante d'eau déversée très ponctuellement (tant des points de vue spatial que temporel) sur le glissement n'y engendra aucun mouvement particulier. Enfin, en juin 1999, un affaissement supplémentaire est apparu 15 m en aval du tracé de l'égout dans la prairie de M. Leruth (la taque au milieu de la prairie de M. Hick est également fortement inclinée vers l'aval du glissement).

## **1.2. Les témoignages recueillis**

Les témoignages recueillis auprès des riverains (MM. Hick, Henrard, Liégeois, Mme Leruth) et d'autres personnes intéressées (M. Keutgens, conducteur des travaux de la ville de Herve) ont permis d'apporter les informations complémentaires suivantes. On notera cependant que le souvenir des témoins est parfois flou, et que ces informations ne peuvent donner qu'une idée d'ensemble de l'évolution du glissement durant les dernières années.

- comme le renseigne le plan Popp (1858), une maison a existé il y a  $\pm$  150 ans sur le haut du glissement (à l'endroit où a été construite plus récemment la maison de M. Henrard, voir ci-dessous). Elle aurait été détruite à la suite du développement d'un glissement de terrain.

- la maison que M. Henrard avait construite dans les années 1970 sur le haut du glissement actuel, précisément sur la cicatrice du glissement entre son atelier actuel et la station Distrigaz abandonnée, a dû être détruite à la suite de dégradations continues liées au mouvement du terrain. Une dénivellation de 39 cm s'était développée en 18 ans entre les extrémités d'un pièce de 3 x 3,6 m.

- l'atelier actuel de M. Henrard est menacé: le chemin d'accès en est régulièrement abîmé par le glissement et l'extrémité sud-est du bâtiment « repose » dans le vide! Quelque peu en contrebas, un silo à copeaux est fortement incliné vers l'ouest suite au glissement vers l'est du terrain qui le supporte. C'est lors de pluies importantes que les mouvements se produisent.

- M. Henrard affirme que quand il était jeune (vers 1960), la pente de la prairie affectée par le glissement de terrain était beaucoup plus régulière et permettait une descente en traîneau qui n'est plus possible maintenant.

- M. Hick, locataire de la prairie située au pied de la menuiserie Henrard, constate d'année en année les modifications du terrain engendrées par le glissement, modifications mises en évidence par les difficultés qu'il rencontre lors des fauches de la prairie. Depuis 1978, il loue cette prairie. Les premiers mouvements se seraient manifestés en 1980, après une période de fort gel et de neige.

- Mme Leruth, propriétaire de la prairie voisine, également en mouvement, se souvient que le talus limitant le glissement à l'amont, entre chez elle et chez M. Henrard, aurait connu un premier mouvement important dans sa partie nord au printemps 1998 (dénivellation de l'ordre de 1 m) avant de bouger à nouveau, cette fois sur toute sa longueur, fin septembre 1998. Elle a aussi le souvenir précis d'un autre mouvement du talus en juin 1986.

- le déplacement d'ensemble d'une clôture de prairie orientée N-S a été de plus de 2 m au cours des années 1998-1999 comme en témoigne l'extrémité qui n'a pas été déplacée (figure 9.4, position [60,195]). Malgré l'importance du mouvement, la clôture déplacée est restée parfaitement rectiligne (sur environ 50 m). Parallèlement, on observe la croissance en hauteur d'un bourrelet de terrain développé un peu plus bas et haut actuellement d'environ 2 m (position [90,130]).

- la conduite partant du château d'eau vers l'est en descendant à travers le glissement de terrain a dû être abandonnée. A proximité immédiate du château d'eau, quatre fuites importantes (vidant les 1000 m<sup>3</sup> du réservoir) se sont déjà produites: le 27 avril 1999, 2-3 ans auparavant, il y a 10 ans et à une autre date, oubliée de Mme Leruth. Ces fuites étaient chaque fois dues à des déboîtements de tuyaux.

- de fortes fissures sont observées dans le mur nord du bâtiment des « Cafés Liégeois », construit en 1966. D'autres fissures inquiétantes ouvrent notamment une voûte à l'intérieur du bâtiment.

De l'ensemble des observations et témoignages recueillis, il ressort qu'au moins 4 épisodes de mouvements récents peuvent être identifiés pour le glissement de Manaihan:

1. printemps 1998: - apparition d'un ressaut de 1 m au niveau du talus au haut de la prairie de M. Leruth.
2. fin septembre 1998: - rejeu de 0,8 m du même talus sur toute sa longueur (c'est-à-dire jusqu'à l'entrée de la prairie de M. Hick, vers le sud)
  - apparition de ressauts vifs d'environ 0.5 m délimitant un petit graben dans la prairie de M. Leruth
  - développement d'un talus de 1 m dans le terrain de M. Liégeois suite à « l'effondrement sur place » du terrain en aval.
3. Toussaint 1998: - apparition de fissures dans le tarmac à l'entrée de la station Distrigaz.

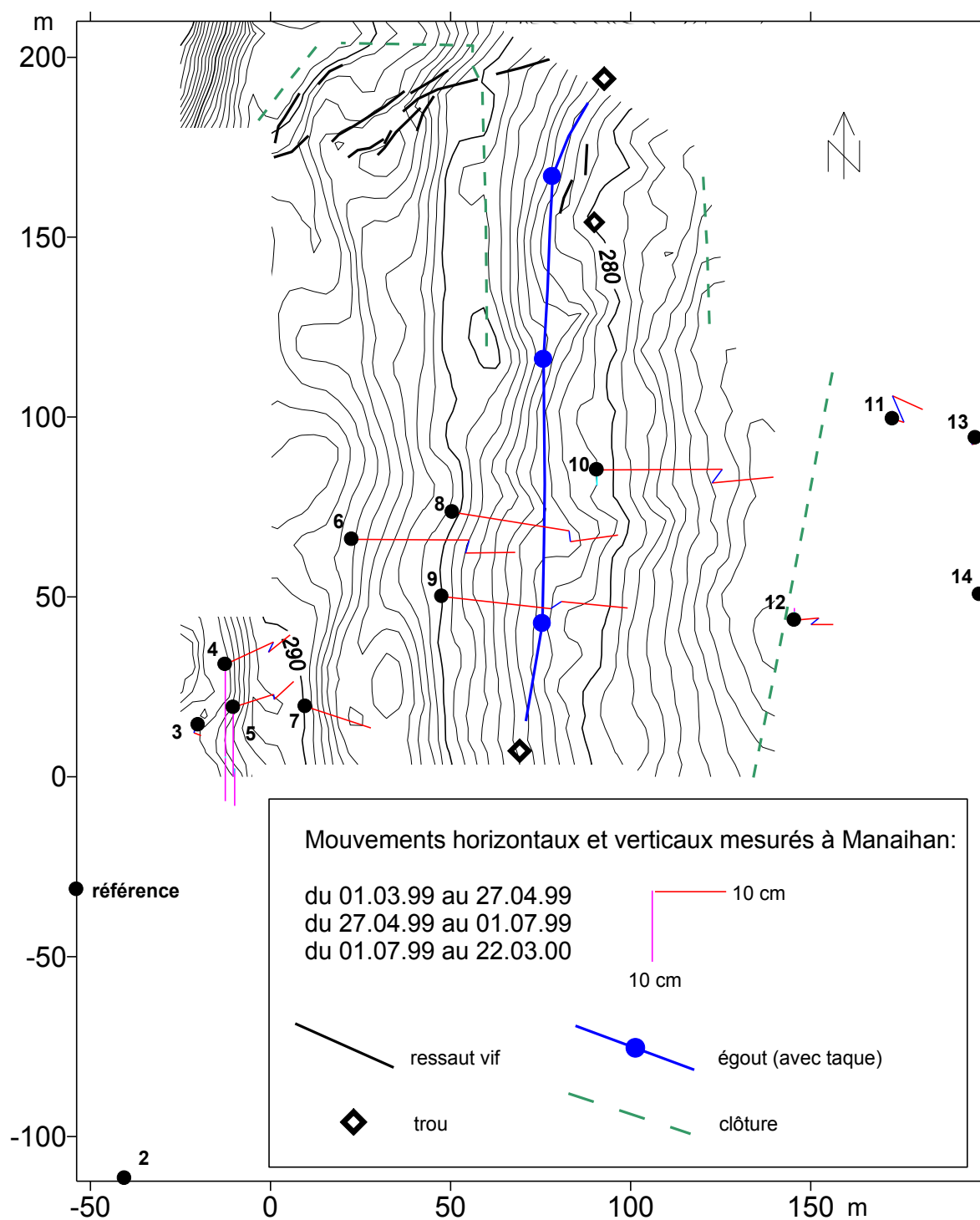


Figure 9.4. Topographie du glissement de terrain de Manaihan en 1999 et distribution des mouvements horizontaux et verticaux du sol mesurés par GPS du 1<sup>er</sup> mars 1999 au 22 mars 2000.

4. début mars 1999:
- élargissement de la fissure à l'entrée de la station Distrigaz d'environ 0.1 m
  - réapparition d'un talus de  $\pm 0.3$  m à l'entrée de la prairie de M. Hick et devant l'atelier de M. Henrard
  - effondrements liés aux ruptures de l'égout industriel de l'AIDE.

### 1.3. Suivi GPS du glissement depuis le 1er mars 1999

Dès le début de cette étude en mars 1999, il fut décidé de suivre l'évolution du glissement de terrain de Manaihan afin de localiser les déplacements subis, de les quantifier et de voir à quel rythme ils s'amortissent après un épisode de réactivation brutale. Nous avons choisi de réaliser ce suivi par des mesures GPS répétées de la position d'un certain nombre de points sur le glissement de terrain.

Le GPS (*Global Positioning System*) est un système de positionnement par rapport à une constellation de 27 satellites, dont les orbites sont elles-mêmes déterminées en liaison avec la position de quelques stations de contrôle au sol. Les procédures de mesures différentielles mettant en oeuvre deux récepteurs GPS permettent d'obtenir rapidement des précisions de positionnement relatif de l'ordre de quelques mm, dépendant bien sûr de la longueur des lignes de base mesurées. Il est donc possible de mesurer très précisément la position de divers points du glissement de terrain par rapport à un point de référence extérieur au glissement et supposé stable, et de réitérer régulièrement ces mesures afin de déterminer l'ampleur et la vitesse des déplacements.

Nous avons mesuré un réseau de 14 points aux dates suivantes: 01.03.99 - 27.04.99 - 01.07.99 et 21.03.00. Le point de référence du réseau (le pivot) a été placé dans une prairie à l'ouest de la route Verviers - Battice, en dehors du glissement. Afin de s'assurer de la stabilité de cette zone, un deuxième repère a été installé dans la même prairie. Le repère 3 (Figure 9.4) se trouve juste au-dessus de l'escarpement de départ du glissement, les repères 4 et 5 suivant l'évolution du bloc qui s'était affaissé fortement en septembre 1998. Sept repères furent ensuite installés dans la prairie exploitée par M. Hick, au pied de l'escarpement. Enfin, les repères 13 et 14 sont placés à l'est du vallon coulant au pied du glissement. Ils sont donc également en dehors de celui-ci et permettent de caler définitivement les mouvements mesurés. Seules les circonstances pratiques au moment de l'établissement du réseau de mesure GPS nous ont incités à choisir de suivre les déplacements du terrain dans la prairie de M. Hick plutôt que dans celle de M. Leruth, plus au nord, où les mouvements étaient vraisemblablement au moins aussi conséquents.

Les lignes de base que nous avons mesurées ne dépassent pas 200 m, et les temps de stationnement de 30 minutes par point que nous avons appliqués en procédure statique fournissent, à la fréquence d'observation de 15 secondes, des séries de données sur 120 époques. Ces conditions de mesure nous permettent d'atteindre une précision de positionnement relatif de 2 - 3 mm. Cependant, la piètre qualité des repères utilisés, rapidement détériorés par les animaux en pâture et les machines de fauche, a limité la précision de centrage à environ 1 cm, qui constitue donc le seuil de signification en x et y des déplacements observés. Quant à la précision des mesures en z, l'ensemble des données recueillies montre qu'elle est meilleure que 1 cm, et donc comparable à celle en x et y.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 9.4. Ils montrent que le point 3, situé à 3 m en retrait de l'escarpement principal du glissement, est resté parfaitement stable tout au long de la période considérée. Ceci est plutôt rassurant si on considère que, un peu plus au nord, le château d'eau n'est lui-même distant du-dit escarpement, beaucoup plus élevé à cet endroit, que de quelques dizaines de mètres. De même, les points 13 et 14, de l'autre côté du vallon, ne sont affectés d'aucun déplacement. Les autres repères ont par contre indiqué des mouvements fort importants durant la période du 1er mars au 27 avril 1999 ainsi que pendant l'hiver 1999-2000. Toutefois, aucun déplacement significatif n'est enregistré entre le 27 avril et le 1er juillet 1999, suggérant qu'à ce moment, le mouvement du terrain induit par l'événement de septembre 1998 et les pluies abondantes de l'hiver qui suivit est arrivé à son terme.

Lors du printemps 1999, des mouvements horizontaux atteignant 17.4 cm en 2 mois et dirigés vers l'est (c'est-à-dire bien perpendiculairement à la direction de l'escarpement de départ) ont été mesurés dans la partie nord de la prairie de M. Hick. Ils ne reflètent qu'imparfaitement l'ampleur des

déplacements car la plus grande partie de ceux-ci avait déjà eu lieu avant la date du 1er mars 1999. Le bloc affaissé en tête du glissement combine pour sa part un mouvement horizontal plus restreint (7.4 cm au maximum, orienté à l'ENE) avec une composante importante de subsidence (12.8 cm en 2 mois). On peut opposer ce mode d'affaissement lent (6.4 cm/mois) à l'effondrement instantané de 80 cm survenu fin septembre 1998 et auquel il fait suite. Quoique globalement moins humide et dépourvu d'épisode de précipitations intenses, l'hiver 1999-2000 a permis la réactivation des mouvements sur le mode lent. Les déplacements enregistrés durant cette période présentent les mêmes orientations qu'au cours du printemps précédent mais des amplitudes moindres: 9.2 cm de déplacement horizontal maximum (en  $\pm 4$  mois) et 6 cm d'affaissement en tête de glissement. Il faut cependant s'entendre sur la signification du mode « lent » de déplacement. Quoique la nature des mesures effectuées ne permettent pas de s'en assurer, il est vraisemblable qu'il ne s'agit pas d'un mouvement continu du terrain, mais plutôt de déplacements épisodiques d'ampleur limitée, comme le suggère la réactivation du ressaut à l'entrée de la prairie de M. Hick observée en l'espace d'une nuit du début mars 1999.

#### 1.4. Evaluation du déplacement des terrains de 1953 à 1999

L'existence d'excellentes photos aériennes couvrant à une échelle favorable ( $\pm 1/15000$ ) la zone du glissement de terrain de Manaihan nous a offert une opportunité supplémentaire de pouvoir évaluer les déplacements subis par le glissement entre la période de la prise de vue (1953) et 1999. Le principe de cette évaluation repose sur la comparaison (soustraction) de modèles numériques de terrain établis pour les deux époques considérées.

##### 1.4.1. Procédure

Pour l'époque actuelle (1999), aucune photo aérienne n'étant disponible, le modèle numérique de terrain a été réalisé à partir d'un levé GPS de la zone du glissement. Pour ce type de levé, la technique du DGPS (GPS différentiel) est à nouveau utilisée. Le modèle obtenu sera donc calé en coordonnées géodésiques à la précision du positionnement absolu, soit 5 à 10 m en (x,y), mais présentera une précision interne de l'ordre de 5 à 10 cm (figure 9.4). Cette précision un peu moins bonne qu'en mode de mesure statique est caractéristique de mesures effectuées en mode cinématique par rapport à un pivot peu éloigné (les lignes de base restant inférieures à 250 m). L'avantage de la méthode est l'enregistrement d'un très grand nombre de points de mesure en peu de temps: 12000 points ont été levés sur les 3 ha de la zone pour laquelle le modèle a été réalisé, soit une densité de 0.4 point/m<sup>2</sup>. Ceci assure une grande précision au modèle numérique puisque la grille d'interpolation a en réalité une maille de même dimension que celle du levé de terrain. La précision en z est en fait limitée principalement par le mode du levé, effectué en déplaçant au ras du sol la base de la canne supportant l'antenne GPS. Les inégalités du terrain parcouru font donc que cette précision sur l'altitude relative est de l'ordre de 10 cm (pour environ 5 cm de précision en (x,y) par suite notamment du défaut de verticalité de la canne en mouvement).

Le modèle numérique de terrain pour l'année 1953 a pour sa part été réalisé au départ d'un couple de photographies aériennes (voir chapitre 4, section 1, pour la référence exacte) à l'échelle du 1/15000. Un modèle stéréophotogrammétrique indépendant, exploité en orientation relative, sans basculement, a été produit par les services du MET (D432, Topographie et Cartographie, dir. M. A. Collignon). Le référentiel cartésien dans lequel ce modèle a été formé possède son origine au centre optique du cliché gauche du couple utilisé et donne donc des valeurs de z négatives. Sa précision en (x,y) est donnée par la formule semi-empirique suivante, qui tient compte du fait que les points levés étaient relativement mal identifiables:

$$(\text{RMS})_{x,y} \text{ (en mm)} = 0.03 * e_c$$

avec  $e_c$  = dénominateur de l'échelle des photos = 15000. La précision en (x,y) du modèle est donc d'environ 45 cm. Quant à la précision en z, elle est fournie par une autre formule semi-empirique:

$$(\text{RMS})_z \text{ (en mm)} = 0.015 * (f/b) * e_c$$

avec b (base) = distance entre les centres optiques des clichés  $\approx 60$  mm et f = longueur focale = 114.56 mm. Ces valeurs donnent une précision en z qui est également voisine de 45 cm. Il faut toutefois souligner que ce chiffre représente l'incertitude moyenne sur l'altitude de chaque point considéré

isolément. Cependant, la qualité réelle du modèle obtenu est aussi fonction de la densité des points mesurés. La densité moyenne sur l'ensemble du modèle établi est de 0.06 point/m<sup>2</sup> (soit un point tous les 4 m), mais elle est plus élevée dès qu'un relief différencié est rencontré. En réalité, sur la zone analysée pour le glissement de terrain de Manaihan, qui ne représente que 5% du modèle levé à partir des photos, la comparaison des situations en 1953 et 1999 dans les endroits non affectés par le glissement montre a posteriori que la précision en z du modèle de 1953 est aussi de 10 à 20 cm.

Seulement trois points de calage entre les deux modèles ont pu être levés par GPS. Ces trois points ont servi à calculer les 7 paramètres de la transformation de Helmert qui a permis de placer le modèle de 1953 dans le même référentiel que celui de 1999 (figure 9.5). La précision de l'identification des points de calage sur les photos de 1953, qui conditionne la qualité de la transformation opérée, est d'environ 50 cm en (x,y) et 5 cm en z. L'opération finale fournissant l'information sur l'évolution du relief du glissement entre 1953 et 1999 a consisté en la soustraction du modèle de 1953 de celui de 1999. La précision du résultat obtenu au terme de l'ensemble du processus est d'environ 70 cm en (x,y) et 25 cm en z.

#### 1.4.2. Description des mouvements observés

La carte de la figure 9.6 et les profils qui en ont été tirés (figure 9.7) montrent que des mouvements significatifs ont affecté le glissement de Manaihan entre 1953 et 1999. Comme signalé ci-dessus, et si l'on fait abstraction des effets de bord à l'est de la zone cartographiée, deux zones permettent de s'assurer de la qualité de la comparaison effectuée. Ce sont respectivement la partie tout à fait à l'aval du glissement (c'est-à-dire le quart oriental de la carte) et le versant raide de la couronne du glissement dans le coin NO, qui n'auraient dû subir, et n'ont effectivement subi aucun mouvement significatif durant la période considérée (à l'exception du colluvionnement observé au pied de l'escarpement). Dans le coin SO de la carte (voir aussi le profil 3 de la figure 9.7), le très fort rehaussement qui apparaît correspond au remblai qui fut apporté lors de la construction de l'habitation de M. Henrard dans les années '70. Le petit graben apparu en 1998 dans la prairie de M. Leruth est également parfaitement identifiable, avec un affaissement maximum d'un peu plus d'1 m. Les autres zones d'affaissement apparues un peu plus au NO à la même époque dans cette prairie sont aussi renseignées par le document.

Mais l'élément le plus frappant de la comparaison est constitué par les zones de soulèvement importants (jusqu'à 1.7 m) qui s'allongent du sud au nord parallèlement à la couronne du glissement. En réalité, il ne s'agit pas véritablement d'un soulèvement du terrain mais, comme le montrent clairement les profils topographiques de la figure 9.7, d'un avancement important des bourrelets successifs qui marquent le glissement. Le 1.7 m de soulèvement apparent correspond donc à la hauteur du bourrelet qui s'est déplacé latéralement, vers l'aval. Ce déplacement peut être estimé à 5-7 m dans la zone centrale du glissement (en Y = 130) et à un peu moins de 4 m dans sa partie sud. Par ailleurs, le léger affaissement qui s'allonge entre deux zones de "soulèvement" en position [55,120] (figure 9.6) suggère qu'à cet endroit le déplacement du bloc vers l'aval du glissement inclut une composante de rotation responsable de la légère contrepente qui existe maintenant.

Malheureusement, le manque de données intermédiaires entre 1953 et 1999 ne nous permet de tirer aucune conclusion sur la vitesse du glissement pendant la période considérée. En effet, d'après les témoignages recueillis, le terrain semblait stable jusqu'au début des années 1980. Il est donc possible que l'essentiel des 7 m de mouvement latéral observés ait été acquis au cours des 20 dernières années seulement. La seule information de vitesse dont nous disposons est fournie par le suivi GPS de mars 1999 à mars 2000, qui donne un mouvement maximum de 25 cm/an, **après** l'événement pluvieux exceptionnel de septembre 1998. Au vu des affaissements observés, ce dernier est susceptible d'avoir provoqué à lui seul un déplacement horizontal quasi instantané de plusieurs dizaines de cm au moins. Quoi qu'il en soit, si on accepte l'hypothèse d'une réactivation du glissement vers 1980, une grossière approximation de la vitesse du mouvement du terrain donne des valeurs comprises entre 10 et 30 cm/an, auxquelles il faut ajouter un déplacement exceptionnel en septembre 1998.

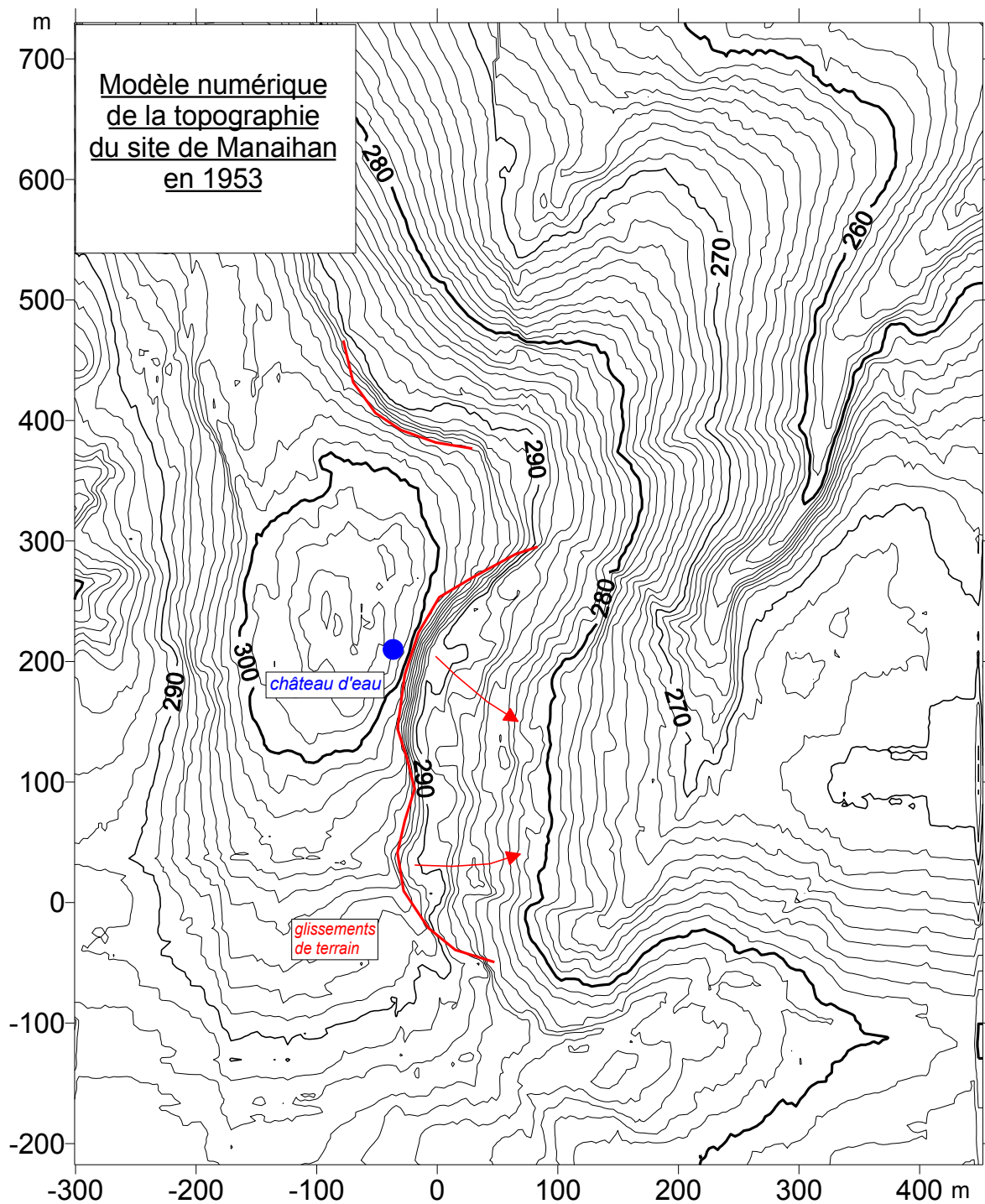


Figure 9.5. Modèle numérique de terrain de la zone englobant le glissement de Manaihan: situation en 1953.

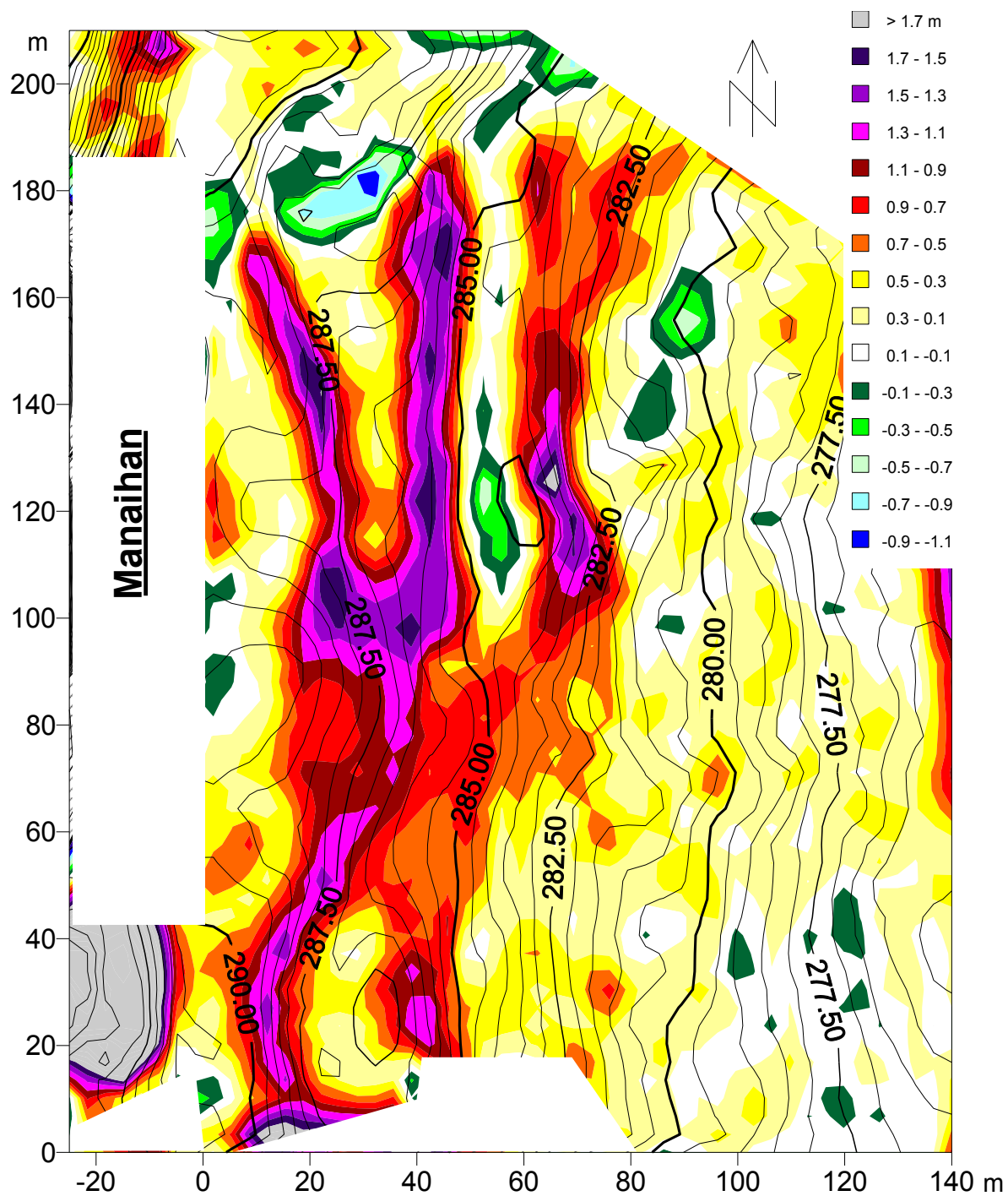


Figure 9.6. Evolution de la topographie du glissement de terrain de Manaihan entre 1953 et 1999.



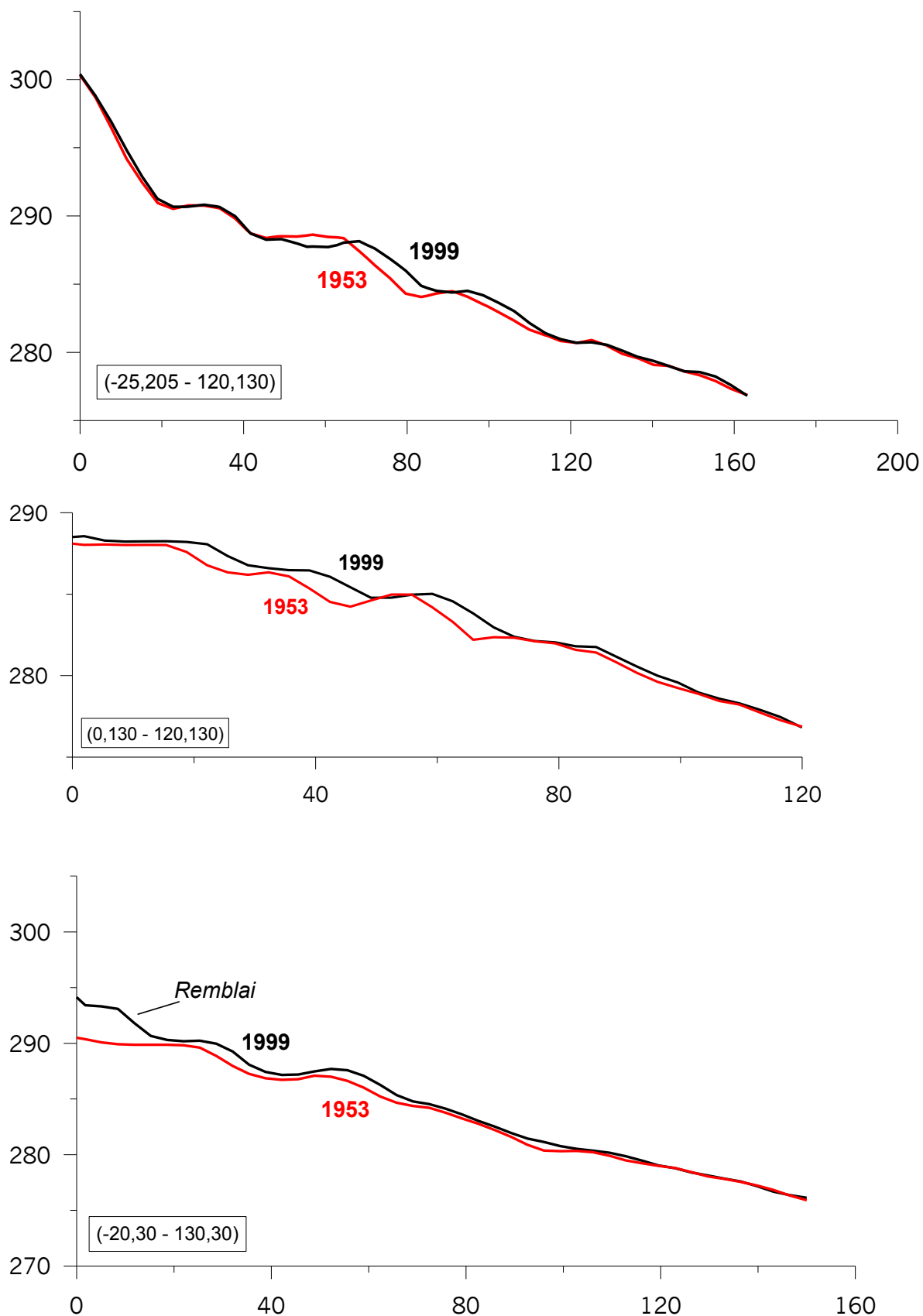


Figure 9.7. Profils de comparaison du relief du glissement de Manaihan entre 1953 et 1999. La position des profils sur la carte de la figure 9.6 est donnée par les coordonnées en cartouche.

## 1.5. Causes de la réactivation du glissement

Deux phénomènes doivent être discutés ici. En premier lieu, il faut identifier la cause immédiate des mouvements épisodiques que subit le glissement depuis sa réactivation. En second lieu, il faut aussi comprendre pourquoi le glissement a été réactivé récemment, probablement vers 1980.

Nous avons d'abord considéré la relation qui pourrait exister entre les épisodes de glissement que nous avons enregistrés en 1998-1999 et les précipitations. Les figures 9.8, 9.9 et 9.10 montrent la répartition des pluies journalières tombées à Thimister de janvier 1998 à octobre 1999. Jusqu'en août 1998, les pluies journalières restent modérées, ou même parcimonieuses. Par contre, de septembre 1998 à mars 1999, trois épisodes pluvieux importants sont identifiés, dont celui, tout à fait exceptionnel, de septembre 1998. En effet, non seulement la hauteur d'eau précipitée le 13 septembre atteignit-elle 70.5 mm mais encore tomba-t-il 55.6 mm supplémentaires le lendemain, 14 septembre. C'est au cours de la nuit du 13 au 14 septembre, lorsque ces fortes précipitations sont tombées, que s'est produit le mouvement de terrain brusque à Manaihan décrit en 1.1. ci-dessus. Le mois suivant, le 31 octobre, une pluie de 42 mm est encore tombée à Thimister. Au cours de la nuit suivante, la station de Distrigaz dont le tarmac de l'accès se fissurait dut être abandonnée. Enfin, le troisième épisode pluvieux significatif de cette période, réunissant trois pluies journalières supérieures à 20 mm, s'est produit en février 1999. En relation avec ces fortes précipitations, c'est au début du mois de mars 1999 que des effondrements ont été observés au-dessus du collecteur de l'AIDE. D'avril à octobre 1999, bien que 7 jours isolés aient recueilli des pluies supérieures à 20 mm, aucun nouveau mouvement du glissement de Manaihan n'a été signalé. Ces pluies furent espacées dans le temps et une seule dépassa 25 mm. La relation entre les événements pluvieux principaux enregistrés à Thimister, station de l'IRM la plus proche, et les mouvements observés à Manaihan est donc flagrante. Le glissement, remis en mouvement par la pluie exceptionnelle de septembre 1998 a aussi répondu aux événements pluvieux importants qui sont survenus par la suite. Il est intéressant de souligner que les mouvements décrits se sont produits immédiatement après les précipitations.

Afin précisément de reconnaître le caractère exceptionnel de ces précipitations, nous avons aussi analysé les valeurs de précipitations mensuelles recueillies à Thimister depuis 1990 (figure 9.11, qui indique également les moyennes mensuelles, de façon à faire apparaître l'importance des écarts à la moyenne). Il apparaît que des précipitations mensuelles supérieures à 200 mm n'ont été observées que trois fois au cours de la décennie considérée: en décembre 1993, en septembre et en octobre 1998. Ceci montre le caractère anormal des précipitations qui, dans le dernier quart de 1998, ont remis en mouvement le glissement de terrain. La valeur mensuelle de septembre 1998 est qualifiée de "très exceptionnelle" (valeur centennale en réalité) par l'IRM. Nous avons par ailleurs cherché quelles ont été les précipitations journalières les plus intenses pour tous les mois de la dernière décennie où la valeur mensuelle a été supérieure à 150 mm. Nous donnons ces valeurs dans le tableau ci-dessous. Durant cette période, aucune pluie journalière n'a dépassé celle du 13 septembre 1998.

Précisons que les pluviomètres sont relevés à 8.00 h du matin et que les pluies mesurées sont donc tombées de 8.00 h du matin le jour où elles sont comptées jusqu'à 8.00 h du matin le lendemain. A Bierset, où les mesures s'étendent de 0 à 24 h, il a été enregistré 32.4 mm le 13 septembre 1998 et 76.2 mm le 14 septembre, montrant que l'essentiel des précipitations est tombé pendant la nuit du 13 au 14. Au vu de ces informations, il est probable que les 126.1 mm de pluies des 13 et 14 septembre à Thimister sont tombés en moins de 24 heures. La pluie centennale à Thimister est pour sa part estimée à 113 mm en 24 heures (Poncelet, 1960, communication écrite). L'examen des précipitations mensuelles recueillies à Thimister entre 1960 et 1990 n'apporte aucune information supplémentaire, confirmant seulement le **caractère exceptionnel de l'événement de septembre 1998, dont la période de retour serait légèrement supérieure à 100 ans.**

Il est donc clair que **les mouvements spectaculaires enregistrés à Manaihan depuis septembre 1998 sont directement liés à l'intensité des précipitations, avec un temps de réponse extrêmement bref** (moins de 24 heures).

Si maintenant on s'interroge sur la raison de la réactivation du glissement vers 1980, les éléments suivants doivent être pris en compte: dans les années 1970, M. Henrard a dû, pour construire

sa maison (maintenant démolie), remblayer substantiellement afin d'aplanir le terrain sur une surface adéquate et ce précisément sur la tête du glissement. De la même manière, actuellement, les recharges fréquentes auxquelles il procède chaque fois que l'accès à son atelier de menuiserie est dénivélé par un mouvement du sol ainsi que l'important remblai sauvage qui se développe derrière la maison voisine au nord de l'atelier sont situés exactement sur l'escarpement de départ du glissement. **Ce sont très certainement ces recharges intempestives au sommet du glissement qui ont réactivé et continuent à entretenir le glissement de terrain de Manaihan.** Par contre, il semble que la charge de plus de 1000 tonnes correspondant au château d'eau à quelques dizaines de mètres en retrait de l'escarpement n'ait aucun effet perceptible sur le glissement. En tout cas, aucun signe de déstabilisation n'est actuellement décelé à hauteur du-dit château d'eau. Seuls de fréquents déboîtements de tuyaux sont observés un peu plus bas, au niveau du sommet de l'escarpement. Enfin, si, à l'intérieur d'un épisode de réactivation du glissement comme celui que l'on connaît depuis une vingtaine d'années, les phases de mouvement sont directement liées à des pluies importantes, on notera qu'à une échelle de temps plus large, le glissement alterne également des épisodes de repos et de réactivation, en fonction spécialement des interventions anthropiques. En effet, quoique avant 1980 la zone soit signalée comme stable par les témoins, on se rappellera que vers 1850 une autre maison fut construite sur la tête du glissement, engendrant les mêmes problèmes de charge supplémentaire et déclenchant des mouvements du sol qui causèrent sa perte.

| Année | Pluie mensuelle       | Pluies importantes journalières                                            |
|-------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1992  | 164.8 mm en août      | 33.5 mm le 07.08                                                           |
| 1993  | 224.6 mm en décembre  | 23 mm le 12.12<br>28.7 mm le 20.12<br>16.8 mm le 21.12<br>22.7 mm le 30.12 |
| 1994  | 159.7 mm en décembre  | 41.9 mm le 09.12<br>39 mm le 19.12<br>23 mm le 27.12                       |
| 1995  | 178.9 mm en janvier   | 20.7 mm le 22.01<br>29.2 mm le 25.01<br>20 mm le 26.01                     |
| 1996  | 198.1 mm en août      | 33 mm le 11.08<br>27.2 mm le 28.08<br><b>55.5 mm le 29.08</b>              |
| 1997  | 168.9 mm en juillet   | 48 mm le 07.07<br>33 mm le 13.07<br>14.3 mm le 27.07<br>12.6 mm le 29.07   |
| 1998  | 241.3 mm en septembre | <b>70.5 mm le 13.09</b><br><b>55.6 mm le 14.09</b>                         |
| 1998  | 206.3 mm en octobre   | 42 mm le 31.10                                                             |
| 1999  | 162.4 mm en février   | 27 mm le 19.02<br>15.3 mm le 21.02<br>22.4 mm le 23.02                     |

## 2. Les autres glissements de terrain

Quoique beaucoup plus restreintes, quelques observations montrent que les autres grands glissements de terrain du Pays de Herve ne sont pas tous parfaitement stabilisés et peuvent encore encore bouger lors de circonstances exceptionnelles:

- le glissement de la Croix Polinard (n° 3) montre divers signes de mouvements récents. Tout d'abord, l'assiette de la ligne désaffectée n° 38 de la SNCB présente une dénivellée

*Figure 9.8. Pluies journalières en mm de janvier 1998 à juin 1998 à Thimister (IRM).*

*Figure 9.9. Pluies journalières en mm de juillet 1998 à mars 1999 à Thimister (IRM).*

*Figure 9.10. Pluies journalières en mm d'avril 1999 à octobre 1999 à Thimister (IRM).*

*Figure 9.11. Précipitations mensuelles en mm de janvier 1990 à octobre 1999 à Thimister (IRM). En tiretés, moyennes mensuelles.*

d'environ 1.6 m à l'endroit où elle entre dans le glissement par l'ouest (figure 9.12). Cette dénivellation est apparue dans les 50 dernières années (après la désaffectation de la ligne!). Sur le flanc est du glissement, les rails étaient pour leur part tordus lorsqu'on les enleva, plusieurs années après la désaffectation de la ligne (témoignage de M. Jaegers). Récemment, à la suite du très pluvieux automne-hiver 1998-1999, un mouvement de la partie orientale du glissement a occasionné l'apparition d'un ressaut (haut de  $\pm 0.3$  m au maximum) courant sur plus de 100 m à proximité immédiate de la ferme de M. Jaegers, surplombant de très près la couronne du glissement vers l'est (figure 9.13). On notera que dans cette zone, l'ancienne tranchée de la ligne de chemin de fer fut remblayée lors de la construction de l'autoroute, donnant lieu à une recharge significative et à l'apparition d'un relief légèrement proéminent par rapport au profil raide de l'escarpement qu'il interrompt. Enfin, un peu au-delà de la limite ouest du glissement, et en liaison probable avec la proximité des sables bouillants de la formation d'Aachen, de petits glissements auraient été provoqués lors de la réalisation d'excavations à l'occasion des travaux de rénovation effectués sur une ferme appartenant à M. Uhoda.

*Figure 9.12. Dénivellation affectant la ligne de chemin de fer désaffectée n° 38 à l'endroit où elle entre dans le glissement de terrain de la Croix Polinard par l'ouest.*

- le glissement n° 9 n'est actuellement plus visible dans le paysage car le versant qu'il affectait fut totalement remodelé lors de la construction de l'autoroute Roi Baudouin à



la fin des années '60. En réalité, ce glissement était stable jusqu'au jour où la réalisation de l'autoroute a obligé à réaliser une section en déblai à son pied. Privé de support, il s'est alors remis en marche et a occasionné d'importants surcoûts et la destruction d'une ferme qui était établie depuis plusieurs siècles juste au dessus de l'escarpement. Ce glissement de terrain, ainsi qu'un autre à proximité immédiate, a très bien été décrit et étudié par Graulich (1969).

- Le glissement de Sérezé (n° 10) est apparemment stable lui aussi, puisque la ferme tricentenaire de M. Thimister se maintient sans dommage à moins de 20 m du bord supérieur de son escarpement de départ. Il n'empêche qu'au printemps 1999, une mince fissure s'y est ouverte sur une dizaine de mètres dans la partie supérieure de l'escarpement, rappelant également que ces terrains ne sont pas très loin de la limite d'équilibre.
- Enfin, suivant le témoignage de M. Hick, exploitant des pâtures à Manaihan, les terrassements réalisés pour la construction d'une étable au pied du glissement n° 13 furent problématiques, dans la mesure où le trou creusé un jour fut trouvé remblayé le lendemain sous l'effet de la liquéfaction des sables d'Aachen.

*Figure 9.13. Dégradation d'un muret de la ferme de M. Jaegers à l'endroit où passe le ressaut (indiqué par une flèche noire sur la photo) apparu durant l'hiver 1998-1999. Ce ressaut parcourt ici le cône de remblayage de l'ancienne tranchée du chemin de fer, qui oblitère localement l'allure de l'escarpement de départ du glissement. A noter également que le muret, construit en 1966, est resté intact pendant 6 ou 7 ans avant de commencer à se dégrader peu de temps après la recharge du versant occasionnée par le remblaiement de la tranchée de chemin de fer.*

Enfin, les cartes et plans anciens (carte de Ferraris, de la fin du 18<sup>e</sup> siècle et plan Popp (1858)) de la région ont été examinés pour rechercher si des constructions furent jadis installées dans les zones de glissement de terrain et dans quelle mesure elles subsistent à l'heure actuelle. La figure 9.14 reproduit un extrait de la carte de Ferraris, planche de Herve (n° 212), publiée en 1965 par le Crédit

Communal de Belgique. Nous y avons reporté les limites des glissements de terrain observés. Les tracés sont imprécis mais nous avons cependant été spécialement attentifs à bien localiser les glissements par rapport aux bâtiments figurés sur la carte.

La majorité des glissements reconnus ne portaient aucun immeuble à l'époque de Ferraris. La seule exception concerne le glissement très étendu de Borbou (n° 6), sur lequel étaient construites trois fermes qui existent encore aujourd'hui. Quoique située à l'extrémité d'une ride en partie supérieure du glissement, la ferme localisée à l'est du glissement ne montre aucune trace de dégradation liée à des mouvements du sol, suggérant que ceux-ci furent inexistantes dans cette zone depuis plus de deux siècles. La carte de Ferraris mentionne cependant juste à la limite NE du glissement deux petits bâtiments en maçonnerie qui ont actuellement disparu. Comme ces constructions ne portent aucun numéro indiquant la commune à laquelle ils appartenaient, nous supposons qu'il s'agit de dépendances agricoles qui peuvent avoir disparu pour n'importe quelle raison indépendante du glissement. Les deux autres fermes établies sur le glissement de Borbou se trouvent dans sa partie occidentale, où l'estompement des formes témoigne d'une ancienneté beaucoup plus grande des mouvements. Il n'est donc pas étonnant qu'elles soient toujours intactes.

En bordure immédiate du glissement n° 9, outre la ferme signalée ci-dessus qui fut démolie lors de la construction de l'autoroute, la carte de Ferraris renseigne un deuxième bâtiment, un peu plus à l'ouest et dans une position comparable, dont nous ne pouvons expliquer la disparition. Celle-ci a eu lieu en tout cas avant 1947 puisque les photos aériennes de cette époque ne le montrent plus. A Sérezé enfin (glissement n° 10), le pignon de l'étable de M. Thimister qui se trouve juste à la limite de la zone d'arrachement du glissement a été reconstruit. D'après M. Thimister, cette réfection n'a cependant rien à voir avec le glissement mais fut nécessitée par les destructions causées par des obus durant la guerre 1940-1945.

En conclusion, l'analyse des documents anciens démontre que, déjà il y a deux ou trois siècles, les gens étaient conscients du danger représenté par les zones de glissement. Si on excepte la construction édifiée à Manaihan il y a quelque 150 ans, les seules autres fermes établies directement sur des glissements le furent sur celui de Borbou, qui témoigne d'une parfaite stabilité. Il est à espérer que le glissement de Thimister (n° 5), sur lequel vient d'apparaître un lotissement récent, ne montrera pas plus de vellétés de mouvement.

### **3. Conclusion**

L'ensemble des observations et analyses effectuées sur les mouvements récents des glissements de terrain du Pays de Herve montrent donc qu'un certain nombre d'entre eux témoignent de déplacements actuels plus ou moins dévastateurs. La cause de ces réactivations est généralement la combinaison d'interventions anthropiques, jouant le rôle de facteur déclenchant, et du facteur climatique.

Le paramètre anthropique intervient par le biais soit d'une recharge en tête de glissement (constructions et remblai sauvage à Manaihan, remblai de la tranchée du chemin de fer à la Croix Polinard), soit d'une décharge en pied de glissement (creusement de l'autoroute au pied du glissement n° 10, terrassement au pied du glissement n° 13). Dès que ces modifications d'origine anthropique ont ramené les terrains concernés à la limite d'équilibre, il ne faut plus alors qu'une influence accidentelle pour engendrer des mouvements significatifs. Cette influence "accidentelle" supplémentaire semble toutefois devoir prendre la forme de précipitations intenses, à récurrence centennale, avant que des mouvements véritablement dommageables (et qui auraient pu être catastrophiques dans le cas de la station Distrigaz) n'apparaissent.

*Figure 9.14. Extrait de la carte de Ferraris (fin du XVIIIe siècle), sur une reproduction du Crédit Communal de Belgique. On y a reporté les glissements de terrain décrits au chapitre 4.*

## **X. Prédiction et cartographie du risque de glissement de terrain**

### **1. Introduction**

Le problème de la cartographie du risque de glissements de terrain futurs dans le Pays de Herve est terriblement complexe. Il y faut combiner le volet des causes potentielles (naturelles et anthropiques) de mouvement, très diversifiées et à périodes de récurrence variables, à celui des paramètres environnementaux qui favorisent également les glissements. Or, parmi ceux-ci, il en est un qui doit nécessairement être considéré à part. Si en effet des facteurs tels que la lithologie ou l'importance des pentes interviennent de façon plus ou moins pressante, la préexistence d'un ancien glissement est pour sa part un paramètre suffisant pour être assuré d'un risque de remise en mouvement extrêmement élevé dans les aires qu'il concerne. Par comparaison avec les autres zones dont le risque doit également être évalué, il conviendrait donc de placer tous les anciens glissements d'une certaine envergure dans la catégorie de risque la plus restrictive. Cela sera discuté ci-dessous, dans le cadre d'une catégorisation des zones à risque qui propose quatre classes distinctes.

### **2. Risque de remise en mouvement de glissements anciens: inventaire**

Tous les auteurs s'accordent à souligner le risque élevé de remise en marche des glissements de terrain anciens. En effet, les plans de glissement selon lesquels les déplacements se sont effectués subsistent au sein des masses glissées et constituent autant de surfaces de faiblesse facilitant des remises en mouvement. L'effondrement des excavations que nous avons dégagées à Sérezé et à La Croix Polinard ont aussi mis cet élément en évidence: dans toutes les tranchées dégagées, des éboulements se sont déclenchés au cours des travaux, le plus souvent à la suite du recoupement de plans de cisaillement qui existaient dans la masse. Ces éboulements nous ont forcés à interrompre les dégagements et par la suite, ils se sont poursuivis pendant les quelques semaines durant lesquelles les tranchées sont restées ouvertes.

Comme nous l'avons rappelé dans le chapitre 2, une contrainte importante est nécessaire pour déclencher un premier glissement. Par contre, une fois la rupture consommée, la contrainte à appliquer pour remettre en mouvement le glissement de terrain est beaucoup moins élevée. Ceci explique que les mouvements qui surviennent au début d'un glissement de terrain sont souvent catastrophiques et peuvent causer de nombreux décès tandis que les remises en marche de glissements anciens sont généralement des mouvements beaucoup plus lents.

D'autre part, les glissements que nous observons se sont arrêtés lorsque les forces causant le cisaillement ont été contrebalancées par celles qui s'y opposent. Autrement dit, les glissements anciens se sont arrêtés au moment où un équilibre a été atteint, équilibre évidemment précaire qui peut être rompu lorsque des circonstances particulières, comme des précipitations exceptionnelles, viennent temporairement diminuer la résistance au mouvement.

Ces données justifient de considérer séparément, les remises en marche des glissements anciens et les nouveaux glissements qui pourraient survenir sur des pentes vierges de tout mouvement de masse antérieur. Fondamentalement en effet, ces deux phénomènes présentent des risques non seulement de grandeur mais aussi de probabilité différentes.

#### **2.1. Glissement n° 1 (Stockis)**

Absolument caractéristique, il paraît ne pas avoir subi de déplacement significatif depuis la fin du 18<sup>e</sup> siècle puisqu'une ferme déjà indiquée sur la carte de Ferraris est conservée à proximité immédiate. Le bâtiment a été rénové mais des lézardes dans l'annexe ne permettent cependant pas d'affirmer qu'une stabilité parfaite soit assurée.

## **2.2. Glissement n° 2**

Il est peu caractéristique mais montre de nombreuses traces de mouvements du sol. La zone la plus délicate est celle qui se trouve sur le versant le plus incliné de la vallée. On peut s'attendre à de sérieuses difficultés si on veut bâtir en cet endroit.

## **2.3. Glissement n° 3 (Croix Polinard)**

Pour ce glissement, nous avons des preuves de déplacement récent, d'une part à son extrémité ouest par la déformation de la ligne de chemin de fer, et d'autre part à l'extrémité est, par la déformation d'un mur et l'apparition d'un abrupt dans un pré à la fin de l'hiver 1999. Il doit donc être considéré comme inconstructible. Certes les mouvements observés sont réduits et limités en deux endroits. Par ailleurs, ils ne se produisent que lors d'événements pluvieux exceptionnels, mais les mouvements observés sont suffisamment marqués pour n'accorder aucun permis de bâtir.

## **2.4. Glissement n° 4**

Très particulier comme nous l'avons montré, il paraît ancien et de ce fait peut être supposé stable. La partie ouest près de la tête d'un vallon est toutefois susceptible de glisser plus que toute autre. La prudence est de rigueur spécialement de ce côté.

## **2.5. Glissement n° 5 (Thimister)**

Nous aurions été très réticents à accorder un permis de bâtir sur ce glissement, où plusieurs nouvelles maisons ont été construites. Elles ont passé, apparemment sans mal, la pluie exceptionnelle du 13-14 septembre 1998 et l'on ne peut qu'espérer qu'une reprise du mouvement ne se produira pas. Le rassemblement et l'évacuation des eaux de pluie, de même que la conduite hors de la zone dangereuse des eaux usées doivent être très sérieusement assurés dans cette zone. Il convient aussi de ne pas surcharger la route qui se trouve en tête du glissement.

## **2.6. Glissement n° 6 (Borbou)**

Ce très grand glissement de terrain (près de 22 ha) présente des indices de stabilité, du moins en ses deux extrémités. Depuis la fin du 18<sup>e</sup> siècle, 3 fermes y sont établies et ne montrent pas de dégradation particulière. Celle située à l'extrémité est, établie au bout d'une ride, montre malgré la raideur de l'abrupt d'arrachement qui la surmonte, qu'aucun mouvement ne s'est produit depuis plusieurs siècles. Il en va de même pour les fermes situées à l'ouest. La stabilité de cette zone est cependant moins étonnante car la topographie plus douce de la zone d'arrachement y indique qu'il y a longtemps que des mouvements ne s'y sont plus produits. Il convient toutefois d'être fort prudent pour le reste du glissement de terrain, pour lequel nous ne disposons d'aucune observation.

## **2.7. Glissement n° 7**

La petite zone cartographiée sous le n° 7, où apparaissent des traces importantes de glissement superficiel, ne pourrait être construite que si les immeubles reposent sur le terrain stable sous-jacent aux masses déplacées. Des reconnaissances doivent être conduites en cet endroit avant d'y bâtir et les fondations doivent être adaptées aux conditions particulières qui y règnent.

## **2.8. Glissement n° 8**

La zone accidentée qui a été classée sous le n° 8 correspond aussi très probablement à des glissements superficiels et les mêmes prescriptions que pour la zone 7 doivent être appliquées.

## **2.9. Glissement n° 9**

Situé en bordure de l'autoroute, il a été stabilisé lors de la construction de celle-ci et la masse qui se déplaçait a été évacuée. Il ne subsiste donc plus de problème en cet endroit quoique, si on voulait y construire sur les remblais qui ont été accumulés, il conviendrait de retrouver à l'Administration des Routes à Verviers, les documents de l'époque décrivant les aménagements qui ont été réalisés.

## **2.10. Glissement n° 10 (Sérezé)**

Ce glissement paraît très dangereux. La fissure apparue en tête de glissement près de la ferme de Monsieur Thimister et décrite par ce dernier comme s'étant ouverte après les pluies de septembre 1998, laisse planer un doute sur la stabilité de la masse qui s'est déjà déplacée. Certes, la maison construite sur le glissement près de la ligne abandonnée du chemin de fer, datant de l'époque de l'installation de cette ligne, ne paraît pas montrer de dégradation particulière. Le remblai du chemin de fer installé à proximité et qui s'étend au pied du glissement sur le versant exposé au sud peut toutefois avoir contribué à la stabilisation de cette zone. Il est de toute façon extrêmement délicat d'accorder une autorisation de bâtir dans la zone où s'est étendu le glissement de terrain.

## **2.11. Glissements n° 11, 12 et 13**

Relativement peu étendus (5,8 ha en tout), ils présentent les caractères de glissements profonds. Aucun indice de stabilité ou d'instabilité n'existe pour aucune de ces formes. Il convient d'être très prudent dans ces zones où l'on manque cruellement de données.

## **2.12. Glissement n° 14 (Manaihan)**

Le glissement de Manaihan, en mouvement actuellement, est évidemment inconstructible. Les précipitations du mois de septembre 1998 ont accéléré les mouvements qui sont dus aussi aux recharges, pourtant faibles, qui ont été effectuées au sommet du glissement. Les mouvements se sont poursuivis depuis lors et il est clair qu'on n'est pas arrivé à la stabilisation des masses qui bougent. Les constructions qui seraient édifiées sur ce glissement seraient vouées à une destruction rapide et le plan de lotissement qui a été préparé dans la zone affectée par le mouvement doit être définitivement abandonné.

## **2.13. Glissement n° 15**

Il est douteux. Peut-être s'agit-il seulement d'une ancienne exploitation de terre à foulons. On ne peut pas interdire d'y construire, mais on doit cependant imposer à celui qui voudrait le faire de réaliser une étude préalable.

## **2.14. Glissement n° 16**

Il est caractéristique, et il ne peut être question de construire dans la partie inférieure du glissement. Il n'a pas été possible de limiter clairement la zone affectée par le mouvement dans sa partie supérieure. Dans cette zone, la couche qui se déplace est sans doute superficielle. Ici aussi, il faudrait adapter les fondations aux conditions géologiques qui auront été reconnues par des recherches complémentaires, de façon à asseoir les fondations sur des terrains stables.

## **2.15. Glissement n° 17**

Il est hypothétique. Il se trouve toutefois dans une zone très humide, et même marécageuse, où il ne paraît de toute façon pas souhaitable de construire. La stabilité du sol paraît problématique et des travaux importants de drainage devraient y être réalisés.

## **3. Prédiction de futurs glissements de terrain dans le Pays de Herve**

D'APRÈS UN RAPPORT DE C.J. CHUNG ET A. DEMOULIN, INTITULÉ "A PRELIMINARY STUDY OF LIEGE DATA FOR LANDSLIDE HAZARD MAPPING".

Afin de préciser le risque de glissement de terrain dans l'ensemble de la zone d'étude du Pays de Herve, une cartographie prédictive en a été réalisée sur base d'une analyse probabiliste (Chung & Fabbri, 1993; Chung & Leclerc, 1994; Chung, Fabbri & van Westen, 1995). Cette analyse a utilisé 7 couches d'information (voir le CD-Rom joint à ce rapport) couvrant une zone cartographiée de 177.66 km<sup>2</sup> (soit 470x420 = 197400 pixels de 30 m de côté). Les coordonnées Lambert belge 72 des coins NO et SE de cette zone sont respectivement (247705, 157135) et (261805, 144535). Les couches d'information constituant la base de données sont les suivantes:

1. les zones d'arrachement des grands glissements de terrain: elles ont été définies en considérant les 15% des pixels les plus hauts en altitude pour chacun des 10 grands glissements délimités au chapitre 4. Ces zones d'arrachement comprennent 154 pixels en tout.
2. la lithologie, pour laquelle 9 classes sont distinguées, respectivement :
  - le Paléozoïque à l'exclusion du Houiller
  - le Houiller
  - la formation d'Aachen
  - les affleurements de la formation de Vaals distants de moins de 300 m de la formation d'Aachen
  - les affleurements de la formation de Vaals distants de 300 à 500 m de la formation d'Aachen
  - les affleurements de la formation de Vaals distants de plus de 500 m de la formation d'Aachen
  - la formation de Gulpen
  - les restes de sables tertiaires et les terrasses fluviatiles quaternaires
  - les dépôts de plaines alluviales actuelles

Il a été jugé utile de distinguer au sein de la formation de Vaals trois sous-classes basées sur la proximité de l'Aachenien en raison du mécanisme proposé pour le déclenchement des glissements, qui implique les deux formations conjointement. Par ailleurs, le risque de glissement de terrain ayant été considéré comme nul sur le Paléozoïque (à l'exception du Houiller) et les sables tertiaires et alluvions anciennes, les aires de la zone d'étude correspondant à ces deux catégories lithologiques ont été exclues de l'analyse.

3. la proximité de failles transverses, d'orientation NNO-SSE, qui, par hypothèse, sont considérées comme potentiellement actives dans cette région centrée sur le graben de La Minerie: trois classes distinguent les zones respectivement situées à moins de  $0.15 \cdot L$ , entre  $0.15 \cdot L$  et  $0.25 \cdot L$  et à plus de  $0.25 \cdot L$  de chacune de ces failles,  $L$  représentant à chaque fois la longueur du segment de faille individuel considéré.
4. la distance au réseau de drainage: ce paramètre veut refléter l'influence combinée de la pente et de la proximité d'un drain, soit en dernière analyse quelque chose comme le temps de résidence de l'eau de percolation dans chaque pixel. Il répond à la formule:

$$D = D_s \cdot VF$$

avec  $D$  = valeur attribuée au pixel,  $D_s$  = distance suivant la pente jusqu'au drain le plus proche et  $VF$  (= "facteur vertical") =  $1 + a$ , où  $a = 0.02 \cdot S$  ( $S$  = pente exprimée en grades). Cinq classes de distance croissante ont été retenues.

5. la pente du terrain: 10 classes ont été distinguées.
6. l'orientation de la pente: 15 classes de  $24^\circ$  sont considérées.
7. l'altitude: 10 classes ont été distinguées.

Les couches 4 à 7 sont issues d'un modèle numérique de terrain de l'IGN dont la résolution est de 30 m. Ce modèle a été obtenu par scannage, vectorisation et identification des courbes de niveau figurant sur la carte à 1:50.000 et garantit, dans le Pays de Herve, une précision absolue sur l'altitude de l'ordre de 8 à 10 m, avec une fiabilité de 90%.

Dans une première approche, la couche 3, qui fait référence à l'influence des failles sur les glissements de terrain (par le biais des tremblements de terre qu'elles sont susceptibles d'engendrer) a

été ignorée. En conséquence, la modélisation a d'abord utilisé la distribution spatiale des zones d'arrachement des glissements comme couche d'information directe et les couches 2, 4, 5, 6 et 7 comme support indirect. A chaque pixel, la probabilité conditionnelle conjointe a été employée comme indicateur de l'occurrence d'un futur glissement de terrain. Pour chaque pixel  $p_{(x,y)}$  de coordonnées  $(x,y)$ , l'aléa désigné de la façon suivante: "*ce pixel sera inclus dans la zone d'un futur glissement de terrain*" est représenté par la probabilité conditionnelle:

$$\text{Prob}\{p_{(x,y)} \in \mathbf{T} \mid p_{(x,y)} \in \Lambda_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in N_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in A_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in \Sigma_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in E_{(x,y)}\} \quad (1)$$

où  $\mathbf{T}$  désigne la zone d'arrachement ("trigger") des futurs glissements et  $\Lambda_{(x,y)}$ ,  $N_{(x,y)}$ ,  $A_{(x,y)}$ ,  $\Sigma_{(x,y)}$  et  $E_{(x,y)}$  représentent respectivement les classes liées à la lithologie, la distance au réseau hydrographique, l'orientation de la pente, sa valeur et l'altitude du pixel  $p_{(x,y)}$ . La valeur obtenue représente la probabilité que le pixel  $p_{(x,y)}$  appartiendra à la zone d'arrachement d'un futur glissement étant données ses caractéristiques lithologique, de pente, d'altitude et de proximité à un drain.

Soit  $\Lambda_{(x,y)}$  l'aire incluant tous les pixels qui appartiennent à la classe  $\Lambda_{(x,y)}$  dans la couche d'information lithologique. De la même manière, soient  $N_{(x,y)}$ ,  $A_{(x,y)}$ ,  $\Sigma_{(x,y)}$  et  $E_{(x,y)}$  les aires représentant les classes  $N_{(x,y)}$ ,  $A_{(x,y)}$ ,  $\Sigma_{(x,y)}$  et  $E_{(x,y)}$  dans les couches concernant respectivement la distance à l'axe de drainage, l'orientation de la pente, la valeur de la pente et l'altitude.

La probabilité en (1) est équivalente à:

$$\begin{aligned} & \text{Prob}\{p_{(x,y)} \in \mathbf{T} \mid p_{(x,y)} \in \Lambda_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in N_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in A_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in \Sigma_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in E_{(x,y)}\} \\ &= \text{Pr ob}\{p_{(x,y)} \in \mathbf{T} \mid p_{(x,y)} \in \Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)}\}, \end{aligned}$$

et, suivant une loi de probabilité:

$$= \frac{\text{Pr ob}\{p_{(x,y)} \in \mathbf{T}\} \text{Pr ob}\{p_{(x,y)} \in \Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)} \mid p_{(x,y)} \in \mathbf{T}\}}{\text{Pr ob}\{p_{(x,y)} \in \Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)}\}}.$$

Pour la simplicité de la notation, écrivons plutôt:

$$= \frac{\text{Pr ob}\{\mathbf{T}\} \text{Pr ob}\{\Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)} \mid \mathbf{T}\}}{\text{Pr ob}\{\Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)}\}}.$$

L'aire  $\{\Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)}\}$  est qualifiée d'aire "de condition unique", dont tous les pixels appartiennent aux mêmes classes  $\Lambda_{(x,y)}$ ,  $N_{(x,y)}$ ,  $A_{(x,y)}$ ,  $\Sigma_{(x,y)}$  et  $E_{(x,y)}$  de lithologie, distance au drainage, orientation de pente, valeur de pente et altitude que le pixel  $p_{(x,y)}$ .

Supposons qu'à l'intérieur de l'aire  $\mathbf{T}$  des zones d'arrachement des futurs glissements de terrain, les classes  $\Lambda_{(x,y)}$ ,  $N_{(x,y)}$ ,  $A_{(x,y)}$ ,  $\Sigma_{(x,y)}$  et  $E_{(x,y)}$  de (i) la lithologie, (ii) la distance au réseau hydrographique, (iii) l'orientation de la pente, (iv) la valeur de pente et (v) l'altitude sont "statistiquement indépendants" ("indépendance conditionnelle"). Sous cette hypothèse, en utilisant une règle bayésienne, nous pouvons montrer que la probabilité conditionnelle en (1) est:

$$\frac{\text{Pr ob}\{\mathbf{T}\} \text{Pr ob}\{\Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)} \mid \mathbf{T}\}}{\text{Pr ob}\{\Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)}\}}$$



$$\begin{aligned}
&= \frac{\Pr ob\{\mathbf{T}\} \Pr ob\{\mathbf{\Lambda}_{(x,y)} | \mathbf{T}\} \Pr ob\{\mathbf{N}_{(x,y)} | \mathbf{T}\} \Pr ob\{\mathbf{A}_{(x,y)} | \mathbf{T}\} \Pr ob\{\mathbf{\Sigma}_{(x,y)} | \mathbf{T}\} \Pr ob\{\mathbf{E}_{(x,y)} | \mathbf{T}\}}{\Pr ob\{\mathbf{\Lambda}_{(x,y)} \cap \mathbf{N}_{(x,y)} \cap \mathbf{A}_{(x,y)} \cap \mathbf{\Sigma}_{(x,y)} \cap \mathbf{E}_{(x,y)}\}} \\
&= \frac{\Pr ob\{\mathbf{\Lambda}_{(x,y)}\} \Pr ob\{\mathbf{N}_{(x,y)}\} \Pr ob\{\mathbf{A}_{(x,y)}\} \Pr ob\{\mathbf{\Sigma}_{(x,y)}\} \Pr ob\{\mathbf{E}_{(x,y)}\}}{\Pr ob\{\mathbf{\Lambda}_{(x,y)} \cap \mathbf{N}_{(x,y)} \cap \mathbf{A}_{(x,y)} \cap \mathbf{\Sigma}_{(x,y)} \cap \mathbf{E}_{(x,y)}\}} \Pr ob\{\mathbf{T}\} \\
&\quad \frac{\Pr ob\{\mathbf{T} | \mathbf{\Lambda}_{(x,y)}\}}{\Pr ob\{\mathbf{T}\}} \frac{\Pr ob\{\mathbf{T} | \mathbf{N}_{(x,y)}\}}{\Pr ob\{\mathbf{T}\}} \frac{\Pr ob\{\mathbf{T} | \mathbf{A}_{(x,y)}\}}{\Pr ob\{\mathbf{T}\}} \frac{\Pr ob\{\mathbf{T} | \mathbf{\Sigma}_{(x,y)}\}}{\Pr ob\{\mathbf{T}\}} \frac{\Pr ob\{\mathbf{T} | \mathbf{E}_{(x,y)}\}}{\Pr ob\{\mathbf{T}\}}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Nous pouvons aisément obtenir plusieurs composants de cette equation:

$$\begin{aligned}
&\Pr ob\{\mathbf{\Lambda}_{(x,y)} \cap \mathbf{N}_{(x,y)} \cap \mathbf{A}_{(x,y)} \cap \mathbf{\Sigma}_{(x,y)} \cap \mathbf{E}_{(x,y)}\} \\
&= \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Lambda}_{(x,y)} \cap \mathbf{N}_{(x,y)} \cap \mathbf{A}_{(x,y)} \cap \mathbf{\Sigma}_{(x,y)} \cap \mathbf{E}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in the whole study area, } \mathbf{A}} \\
&\Pr ob\{\mathbf{\Lambda}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Lambda}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in the whole study area } \mathbf{A}} \\
&\Pr ob\{\mathbf{N}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{N}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in the whole study area } \mathbf{A}} \\
&\Pr ob\{\mathbf{A}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{A}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in the whole study area } \mathbf{A}} \\
&\Pr ob\{\mathbf{\Sigma}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Sigma}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in the whole study area } \mathbf{A}} \\
&\Pr ob\{\mathbf{E}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{E}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in the whole study area } \mathbf{A}}
\end{aligned} \tag{3}$$

De plus, si nous connaissons l'aire de  $\mathbf{T}$ , alors

$$\begin{aligned}
&\Pr ob\{\mathbf{T}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{T}}{\# \text{ of pixels in the whole study area } \mathbf{A}} \\
&\Pr ob\{\mathbf{T} | \mathbf{\Lambda}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{T} \cap \mathbf{\Lambda}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Lambda}_{(x,y)}} \\
&\Pr ob\{\mathbf{T} | \mathbf{N}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{T} \cap \mathbf{N}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \mathbf{N}_{(x,y)}} \\
&\Pr ob\{\mathbf{T} | \mathbf{A}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{T} \cap \mathbf{A}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \mathbf{A}_{(x,y)}}
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\text{Pr ob}\{\mathbf{T} | \Sigma_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{T} \cap \Sigma_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \Sigma_{(x,y)}}$$

$$\text{Pr ob}\{\mathbf{T} | \mathbf{E}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{T} \cap \mathbf{E}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \mathbf{E}_{(x,y)}}$$

Cependant, puisque nous ne connaissons pas l'aire  $\mathbf{T}$  des zones d'arrachement des futurs glissements de terrain, nous ne pouvons calculer les probabilités en (4). Pour estimer celles-ci, nous utilisons  $\mathbf{\Pi}$ , l'aire reprenant les zones d'arrachement des glissements de terrain anciens répertoriés dans la base de données pour la région étudiée. Nous obtenons ainsi les contreparties suivantes:

$$\text{Pr ob}\{\mathbf{\Pi}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Pi}}{\# \text{ of pixels in the whole study area } \mathbf{A}}$$

$$\text{Pr ob}\{\mathbf{\Pi} | \Lambda_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Pi} \cap \Lambda_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \Lambda_{(x,y)}}$$

$$\text{Pr ob}\{\mathbf{\Pi} | \mathbf{N}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Pi} \cap \mathbf{N}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \mathbf{N}_{(x,y)}}$$

$$\text{Pr ob}\{\mathbf{\Pi} | \mathbf{A}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Pi} \cap \mathbf{A}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \mathbf{A}_{(x,y)}}$$

$$\text{Pr ob}\{\mathbf{\Pi} | \Sigma_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Pi} \cap \Sigma_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \Sigma_{(x,y)}}$$

$$\text{Pr ob}\{\mathbf{\Pi} | \mathbf{E}_{(x,y)}\} = \frac{\# \text{ of pixels in } \mathbf{\Pi} \cap \mathbf{E}_{(x,y)}}{\# \text{ of pixels in } \mathbf{E}_{(x,y)}}$$

(5)

Ces probabilités (5) ont été calculées pour chaque classe de chaque couche d'information. Un exemple en est montré en bleu à la figure 10.1 pour les 9 classes lithologiques envisagées.

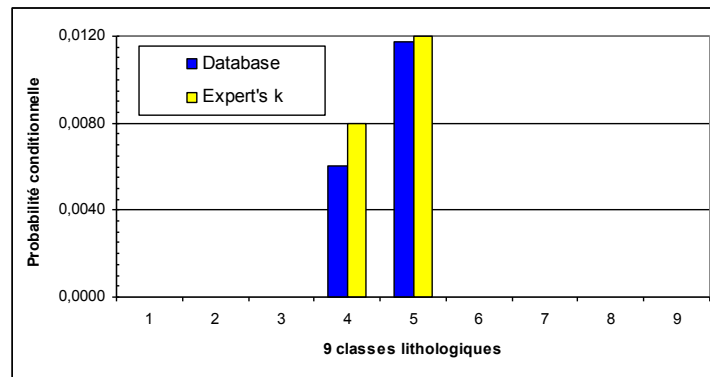


Figure 10.1. Probabilités conditionnelles obtenues pour les diverses classes lithologiques retenues. En bleu, probabilités fondées sur la base de données, en jaune, probabilités proposées en fonction de nos connaissances de terrain.

Avec les probabilités (3) et en utilisant les probabilités (5) comme estimateurs des probabilités (4), nous pouvons maintenant estimer la probabilité conditionnelle pour le pixel  $p_{(x,y)}$  en (1) à l'aide de l'équation (2):

$$\begin{aligned} & \hat{\text{Pr ob}} \{p_{(x,y)} \in T \mid p_{(x,y)} \in \Lambda_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in N_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in A_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in \Sigma_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in E_{(x,y)}\} \\ &= \frac{\text{Pr ob}\{\Lambda_{(x,y)}\} \text{Pr ob}\{N_{(x,y)}\} \text{Pr ob}\{A_{(x,y)}\} \text{Pr ob}\{\Sigma_{(x,y)}\} \text{Pr ob}\{E_{(x,y)}\}}{\text{Pr ob}\{\Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)}\}} \text{Pr ob}\{\Pi\} \\ &= \frac{\text{Pr ob}\{\Pi \mid \Lambda_{(x,y)}\}}{\text{Pr ob}\{\Pi\}} \frac{\text{Pr ob}\{\Pi \mid N_{(x,y)}\}}{\text{Pr ob}\{\Pi\}} \frac{\text{Pr ob}\{\Pi \mid A_{(x,y)}\}}{\text{Pr ob}\{\Pi\}} \frac{\text{Pr ob}\{\Pi \mid \Sigma_{(x,y)}\}}{\text{Pr ob}\{\Pi\}} \frac{\text{Pr ob}\{\Pi \mid E_{(x,y)}\}}{\text{Pr ob}\{\Pi\}} \end{aligned} \quad (6)$$

Les probabilités estimées par (6) ont été calculées pour tous les pixels de la zone d'étude. La figure 10.2 est obtenue après classement par ordre décroissant des 197400 (470 x 420 pixels) valeurs de probabilités estimées. Le pixel correspondant à la plus grande valeur reçoit le numéro d'ordre 197400, celui avec le plus petit estimateur le numéro d'ordre 1. Les 987 pixels d'ordre compris entre 196414 et 197400 sont ensuite assimilés à la valeur 99.5%. Ils correspondent en réalité au 0.5% de la zone d'étude où la probabilité d'un futur glissement de terrain est la plus grande. Les 987 pixels suivants (d'ordre 195427 à 196413) se voient attribuer la valeur 99%, et ainsi de suite.

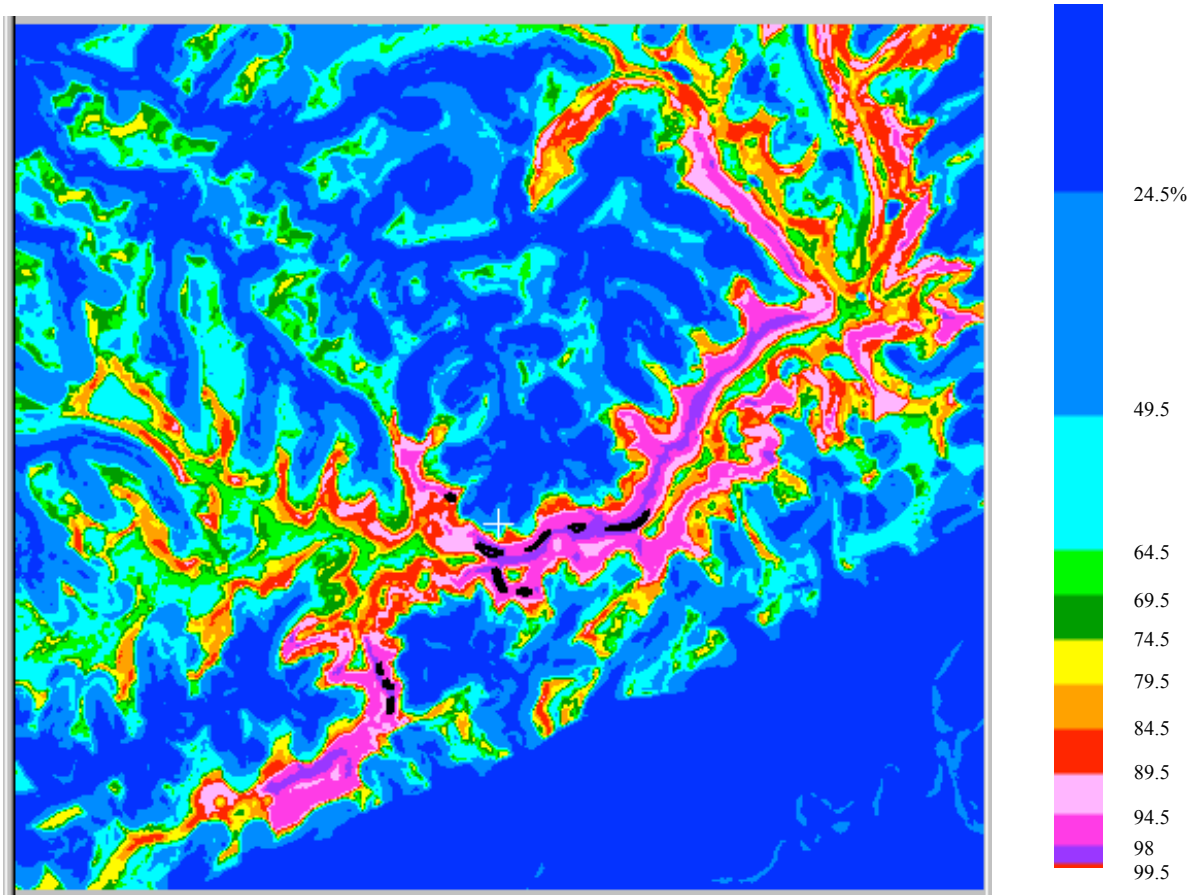


Figure 10.2. Carte du risque de glissement de terrain basée sur 5 couches d'information (à l'exclusion des failles). En noir, zones d'arrachement des 10 glissements anciens de la base de données.

Afin d'évaluer la qualité de la carte de prédiction de la figure 10.2, nous avons employé la technique de validation croisée suivante:

1. nous supposons que le glissement #1 n'est pas encore survenu. Cela signifie que nous ne disposons plus que de 9 glissements (#2 - #10) dans la base de données pour la zone d'étude
2. sur base de ces 9 glissements et des 5 couches d'information déjà utilisées, nous calculons la probabilité conditionnelle pour chaque pixel suivant l'équation 6
3. après classement des probabilités estimées, chaque pixel se voit attribuer une valeur entre 0 et 99.5%
4. on examine alors les valeurs obtenues pour les pixels appartenant à la zone d'arrachement du glissement #1, et on retient la plus élevée d'entre elles. Cette valeur est donnée à la 1<sup>re</sup> ligne du tableau 1 en tant que valeur prédite
5. On revient alors à l'étape 1, mais en supposant cette fois que c'est le glissement #2 qui n'a pas encore eu lieu. Nous avons à nouveau une base de données comprenant 9 glissements (#1, #3 - #10) qu'on utilise pour répéter les étapes 2 à 4
6. On répète le processus pour les glissements #3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, et 10 et on construit ainsi la première colonne du tableau 1 ci-dessous.

| <i>Glissement #</i> | <i>Valeur de pixel prédite sur base de la validation croisée</i> | <i>Valeur reposant sur les probabilités suggérées par les experts</i> |
|---------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>1</b>            | 96                                                               | 98                                                                    |
| <b>2</b>            | 98                                                               | 99                                                                    |
| <b>3</b>            | 98                                                               | 99                                                                    |
| <b>4</b>            | 98.5                                                             | 99                                                                    |
| <b>5</b>            | 99.5                                                             | 99.5                                                                  |
| <b>6</b>            | 99                                                               | 99.5                                                                  |
| <b>7</b>            | 96.5                                                             | 98.5                                                                  |
| <b>8</b>            | 98                                                               | 99                                                                    |
| <b>9</b>            | 99                                                               | 99.5                                                                  |
| <b>10</b>           | 99.5                                                             | 99.5                                                                  |

Tableau 1. Validation croisée de la carte de prédiction (1<sup>re</sup> colonne) et qualité des estimations de probabilité basées sur les connaissances de terrain (2<sup>re</sup> colonne).

La courbe de prédiction de la figure 10.3 est basée sur les valeurs renseignées dans cette première colonne. Elle fournit les probabilités empiriques de l'occurrence du prochain glissement de terrain dans une classe donnée ou dans celles au-dessus.

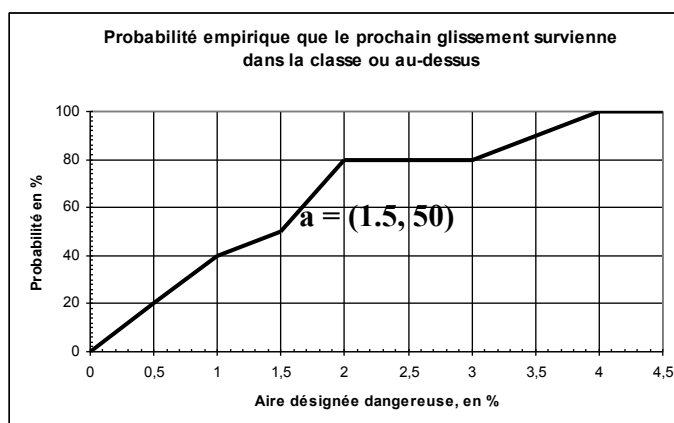


Figure 10.3. Probabilité empirique que le prochain glissement de terrain survienne au-dessus ou dans une classe donnée.

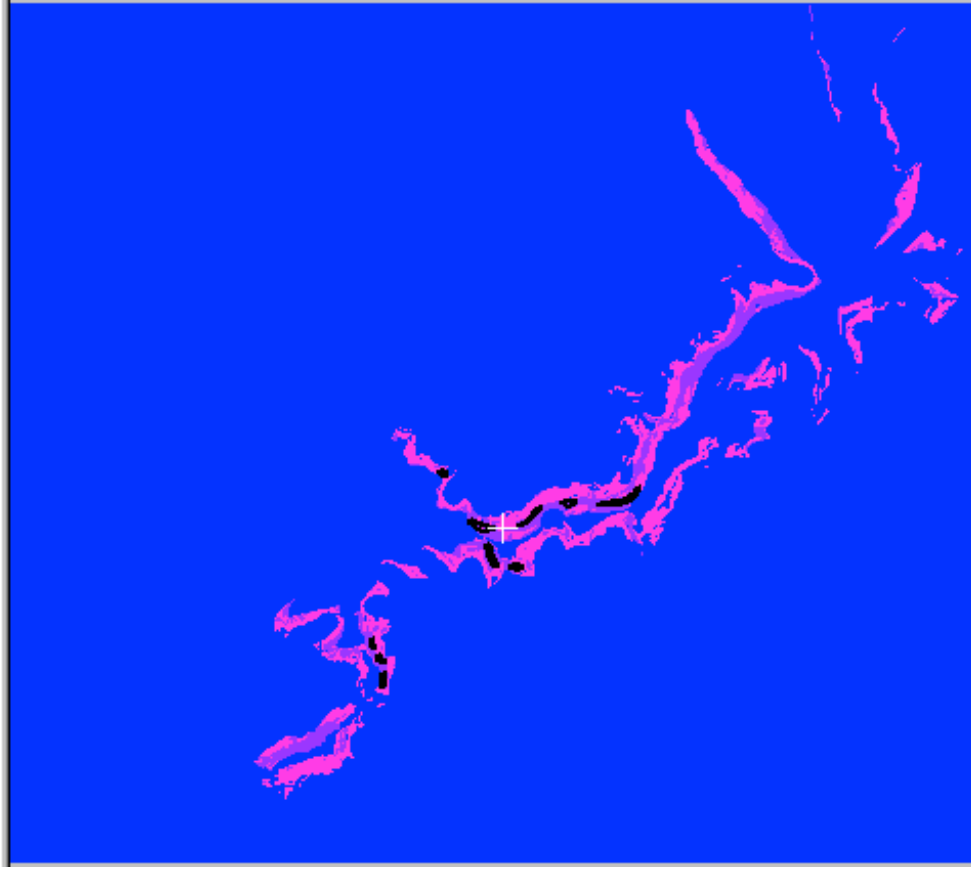


Figure 10.4. Carte du risque de glissement de terrain basée sur 5 couches d'information (à l'exclusion des failles) et sur les probabilités conditionnelles bivariées déduites de notre connaissance de terrain. En noir, zones d'arrachement des 10 glissements répertoriés. En violet, pixels de valeur comprise entre 98.5 et 99.5%; en magenta, pixels de valeur comprise entre 95 et 98%

A titre d'exemple, si on considère le point a de la figure 10.3, il indique que si nous reconnaissons comme zone à risque le 1.5% des pixels de la zone d'étude avec les valeurs de probabilité estimée les plus élevées (soit la zone de couleur violette sur la figure 10.2), la probabilité que le prochain glissement de terrain survienne dans cette zone est de 50%. De la même manière, il y a 100% de chances que la zone d'arrachement du prochain glissement de terrain dans la région étudiée prenne place dans l'aire reprenant les 4% de pixels à valeurs de probabilité les plus élevées (c'est-à-dire les zones violette et magenta de la figure 10.2).

Par ailleurs, nous avons aussi modifié les valeurs de probabilité conditionnelle bivariée déduites de la base de données par l'équation (5) (barre bleue de la figure 10.1) en utilisant notre connaissance du contexte de terrain et de la nature des glissements attendus. Ces valeurs modifiées sont figurées par la barre jaune de la figure 10.1 pour les diverses classes lithologiques considérées. Sur la base de ces probabilités conditionnelles bivariées modifiées, l'estimateur de l'équation (6) est remplacé par un second estimateur des probabilités conditionnelles répondant à

$$\begin{aligned}
 & \tilde{\text{Pr ob}} \{p_{(x,y)} \in \mathbf{T} \mid p_{(x,y)} \in \Lambda_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in N_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in A_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in \Sigma_{(x,y)}, p_{(x,y)} \in E_{(x,y)}\} \\
 &= \frac{\text{Pr ob}\{\Lambda_{(x,y)}\} \text{Pr ob}\{N_{(x,y)}\} \text{Pr ob}\{A_{(x,y)}\} \text{Pr ob}\{\Sigma_{(x,y)}\} \text{Pr ob}\{E_{(x,y)}\}}{\text{Pr ob}\{\Lambda_{(x,y)} \cap N_{(x,y)} \cap A_{(x,y)} \cap \Sigma_{(x,y)} \cap E_{(x,y)}\}} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T}\} \\
 & \quad \frac{\tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T} \mid \Lambda_{(x,y)}\} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T} \mid N_{(x,y)}\} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T} \mid A_{(x,y)}\} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T} \mid \Sigma_{(x,y)}\} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T} \mid E_{(x,y)}\}}{\tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T}\} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T}\} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T}\} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T}\} \tilde{\text{Pr ob}}\{\mathbf{T}\}}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

$\tilde{\text{Prob}}\{\mathbf{T}\}$ ,  $\tilde{\text{Prob}}\{\mathbf{T}|\Delta_{(x,y)}\}$ ,  $\tilde{\text{Prob}}\{\mathbf{T}|\mathbf{N}_{(x,y)}\}$ ,  $\tilde{\text{Prob}}\{\mathbf{T}|\mathbf{A}_{(x,y)}\}$ ,  $\tilde{\text{Prob}}\{\mathbf{T}|\Sigma_{(x,y)}\}$  et  $\tilde{\text{Prob}}\{\mathbf{T}|\mathbf{E}_{(x,y)}\}$  sont donc basées sur notre propre évaluation des probabilités en (4). A l'aide de l'équation (7), nous obtenons ainsi la figure 10.4 par le même processus d'attribution de valeur aux pixels que pour la figure 10.2. Cependant, du fait que nous avons donné une valeur nulle à certaines probabilités conditionnelles bivariées, nous n'avons cette fois que trois coloris car seulement 5% des pixels ont une valeur de probabilité conditionnelle estimée non nulle, et peuvent donc être classés, tous les autres présentant une probabilité estimée nulle.

L'usage de l'équation (7) ne permet toutefois aucune validation croisée, et nous ne pouvons que lire sur la figure 10.4 les valeurs prédites pour les pixels correspondant aux zones d'arrachement des 10 glissements de terrain répertoriés. Ce sont ces valeurs qui figurent dans la seconde colonne du tableau 1 et qui fournissent la "courbe de succès" (en rouge sur la figure 10.5) de la carte de prédiction basée sur notre connaissance de terrain. Il est important de bien faire la distinction entre la signification d'une courbe de prédiction (en noir sur la figure 10.5), qui renseigne le taux de réussite dans la prédiction d'un futur glissement, et celle de la courbe de succès, qui montre seulement la qualité du document dans l'identification des glissements anciens comme zone à risque. La carte de la figure 10.2 est donc *a priori* plus adéquate que celle de la figure 10.4 pour définir les zones où le risque de glissement futur est le plus élevé. Dans la pratique, il apparaît toutefois que les deux documents fournissent une information quasiment identique, car les probabilités conditionnelles bivariées proposées par les experts ne sont pas fondamentalement différentes de celles calculées à partir de la base de données (et ceci malgré le nombre restreint de glissements sur lesquels repose l'analyse).

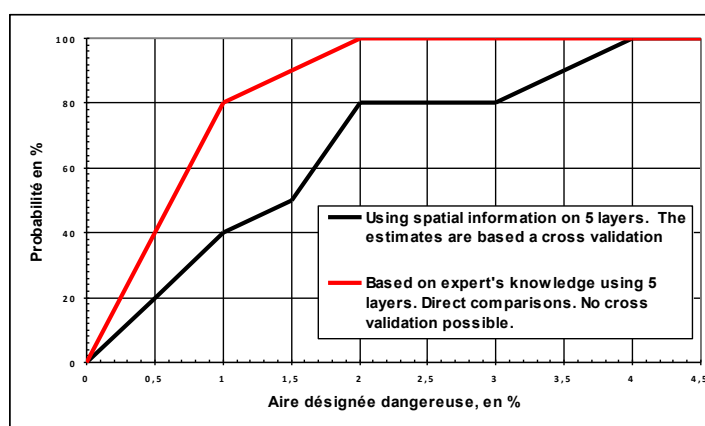


Figure 10.5. Courbe de succès (en rouge) basée sur les probabilités conditionnelles bivariées modifiées suivant notre connaissance de terrain et courbe de prédiction (en noir) utilisant la base de données à 6 couches d'information (zones d'arrachement des glissements répertoriés + lithologie, proximité au drainage, orientation et valeur de pente, altitude).

Enfin, une analyse similaire à celle qui a conduit à la figure 10.2 a été menée sur la base de la combinaison de la couche de données "zones d'arrachement des glissements de terrain" avec cette fois les 6 autres couches d'information disponibles, incluant donc la proximité aux failles transverses NNO-SSE, supposées potentiellement actives et responsables du déclenchement de glissements à l'occasion de séismes. Le résultat de cette dernière analyse est montré à la figure 10.6. A nouveau, cette carte n'offre que des différences mineures avec les précédentes. La seule divergence notoire qu'elle présente est de déplacer une partie de la zone de plus haut risque (98.5-99.5%) : en effet, si on tient compte de la présence des failles, la crête du cimetière d'Henri-Chapelle, s'étirant en direction NNO de Henri-Chapelle vers Aubel, parallèlement à la faille toute proche de la Gulp devient plus

dangereuse que la portion de la crête principale entre Clermont et Henri-Chapelle, où ne passe aucune faille transverse significative.

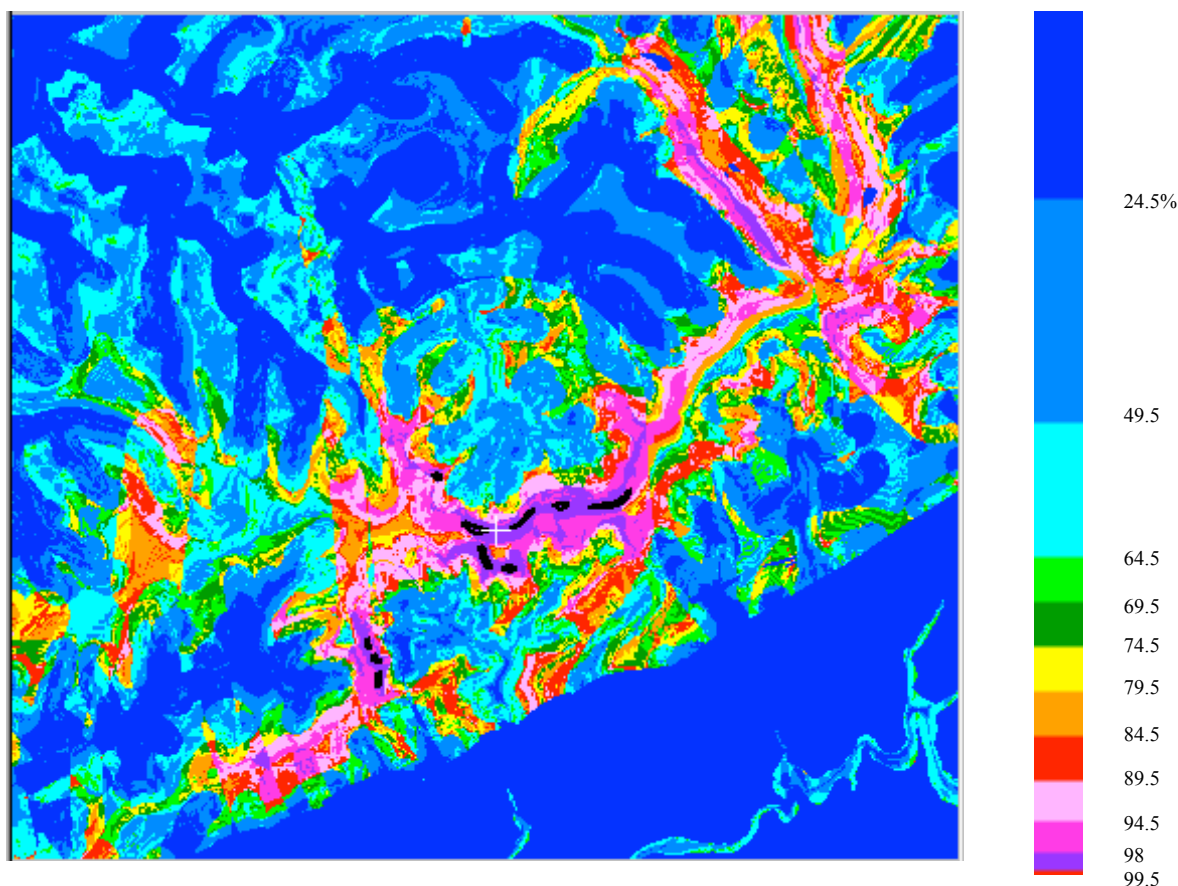


Figure 10.6. Carte du risque de glissement de terrain basée sur 6 couches d'information (incluant la proximité aux failles transverses NNO-SSE). En noir, zones d'arrachement des 10 glissements anciens de la base de données.

On peut interpréter les différentes cartes de prédiction de la manière suivante. Il a déjà été dit que la carte basée sur les probabilités conditionnelles bivariées modifiées en fonction de notre connaissance de terrain n'a pu être validée en termes de prédiction et qu'elle est par conséquent la moins appropriée à l'objectif poursuivi ici. La carte reposant sur la base de données objective des glissements répertoriés et sur toutes les couches d'information, y compris la proximité aux failles, admet l'hypothèse que ces dernières sont responsables, par le biais de leur activité sismique, du déclenchement des glissements de terrain. Elle classe donc les pixels de la zone d'étude en fonction du risque qu'ils présentent d'être affectés par un futur glissement de terrain **lié à un séisme**. Elle est ainsi beaucoup plus restrictive que la carte de la figure 10.2 qui ne prend pas en compte l'information "proximité des failles NNO-SSE", et qui évalue donc plus largement le risque de glissement futur en fonction des seules conditions environnementales (topographiques, lithologiques et, partiellement, hydrologiques via l'information "proximité du réseau"), toutes causes, anthropiques autant que naturelles, étant confondues. Cette dernière carte est clairement celle qui doit être retenue.

Il est aussi utile de préciser pourquoi les documents fournis se contentent de classer les pixels en fonction de la probabilité d'un futur glissement de terrain plutôt que d'attribuer à chacun d'eux simplement sa valeur estimée de probabilité conditionnelle. En réalité, ces valeurs "absolues" ne fournissent qu'une indication peu fiable. Prenons par exemple le cas des probabilités calculées en tenant compte de la proximité aux failles. Les valeurs calculées reposent en dernière analyse sur le

nombre de pixels appartenant aux zones d'arrachement des glissements répertoriés et qui sont repris dans les diverses classes distinguées au sein de chaque couche d'information. Or, les glissements répertoriés datent d'il y a près de 2000 ans, et les probabilités obtenues caractériseraient donc le risque de glissement dans les 2000 ans à venir, une période hors de propos dans la demande à laquelle répond cette Convention. Si on voulait évaluer le risque à supporter dans les 100 ans à venir, il faudrait diviser les probabilités calculées par 20, **en faisant l'hypothèse de leur linéarité dans le temps**. Ceci apparaît d'autant moins justifié que la probabilité d'un glissement futur est, dans ce cas, liée à celle d'un séisme à venir. Or, nous n'avons à ce jour aucune information précise sur la récurrence des séismes susceptibles d'engendrer des glissements de terrain et qui pourraient prendre place sur les divers segments de failles actives parcourant la région étudiée. Bien plus, les divers segments en question ont chacun un taux d'activité sismique et un séisme caractéristique différents. Il faut en outre tenir compte du fait que les zones déjà affectées par un glissement ancien sont beaucoup plus sensibles et présentent une période de retour des événements de réactivation plus petite que celle des séismes à l'origine des glissements premiers. Ceci montre bien qu'il est tout à fait illusoire de vouloir quantifier le risque local de glissements de terrain d'origine sismique. Si on considère maintenant le risque de glissement toutes causes confondues, l'opération est encore plus vaine puisqu'un des facteurs essentiels potentiellement responsables de futurs glissements est l'intervention humaine sur le milieu naturel, qui ne répond évidemment pas à des lois probabilistes mais à des processus de décision que la Région Wallonne cherche précisément à réglementer aux fins d'un bon et durable aménagement du territoire.

Plutôt que de vouloir à tout prix quantifier un risque inquantifiable, il est préférable, comme le fait la carte de la figure 10.2, base de la carte finale de zonation du risque que nous proposerons, de simplement pointer les zones où le danger de voir se développer un futur glissement de terrain est le plus grand. La grandeur relative de ce risque dépend de la combinaison plus ou moins défavorable des divers paramètres pris en compte (les 5 couches d'information environnementales utilisées), mais un glissement ne s'y déclenchera éventuellement que soit si une cause naturelle d'ampleur suffisante survient (avec une probabilité indéterminable à ce jour), soit si une intervention humaine inadéquate y aggrave encore le danger potentiel au-delà d'un seuil également difficilement chiffrable (et qui nécessite donc l'introduction des règles de précaution discutées au chapitre 11).

## 4. Conclusion

Tenant compte à la fois de la carte de prédiction du risque de glissement de terrain dans le Pays de Herve proposée ci-dessus et du fait que les zones des glissements déjà existants sont beaucoup plus sensibles à de nouveaux mouvements de masse, nous proposons une zonation reconnaissant cinq classes de risque:

- **zone A (risque très élevé):** zones affectées par les glissements anciens profonds et de grandes dimensions (tous les glissements répertoriés dans cette étude sauf les n° 7, 15, 16 et 17), actuellement en mouvement ou susceptibles d'être remis en marche assez aisément. On reprend ici non seulement la zone d'arrachement mais également la zone d'accumulation de ces glissements.
- **zone B (risque élevé):** zones reprenant les pixels de valeur 98.5 à 99.5% sur la carte de la figure 10.2, représentant le 1.5% de la zone d'étude où le risque de nouveau glissement est le plus élevé en fonction des paramètres lithologiques, topographiques et hydrologiques. La courbe de prédiction de la figure 10.3 montre qu'il y a 50% de chances pour que le prochain glissement de terrain dans le Pays de Herve apparaisse dans cette zone. On reprendra en outre dans la zone B les glissements répertoriés n° 7 et 16.
- **zone C (risque moyen):** zones reprenant les pixels de valeur 95 à 98% sur la carte de la figure 10.2, représentant les 3.5% suivants les plus risquants de la zone d'étude. Sont également repris dans la zone C les glissements répertoriés n° 15 et 17. La probabilité est de 100% que le prochain glissement de terrain survienne dans la zone C ou dans une zone de risque plus élevé (sur base des paramètres considérés).
- **zone D (frange d'accumulation):** il est essentiel de se souvenir que les pixels retenus dans les zones B et C le sont en tant que partie de la zone d'arrachement d'un glissement potentiel. Si



celui-ci se déclenche effectivement, une zone d'accumulation sera également touchée à l'aval de la zone de départ. Cet élément doit donc aussi apparaître dans la carte de zonation du risque. Puisque l'ensemble des classes B et C constitue l'aire dans laquelle la probabilité est de 100% que le prochain glissement survienne, une seule zone d'accumulation sera définie. La limite de cette zone d'accumulation a été placée à une distance de 200 m à l'aval de la limite de la zone de risque C.

- **zone E (risque faible ou nul)**: le reste de la zone d'étude, soit environ 95% du territoire considéré.

## **XI. Mesures de prévention pour la réduction du risque de glissement de terrain**

Bien que les causes ayant déterminé l'apparition des glissements de terrain du Pays de Herve soient, étant donné leur ancienneté, indépendantes de l'action humaine, l'homme peut maintenant par des mesures inappropriées modifier d'une manière dramatique les conditions naturelles et déclencher des événements dont les conséquences peuvent être désastreuses. Nous présentons ci-dessous des précautions à prendre pour ne pas déterminer la formation de nouveaux glissements ou la remise en marche de glissements anciens.

Le problème n'est pas différent s'il s'agit de prévention ou de stabilisation de glissements actuels. Dans un cas comme dans l'autre, les mesures se basent sur les mêmes principes et visent soit à diminuer l'effort de cisaillement, soit à accroître la résistance à la rupture. Le texte ci-dessous se rapporte donc aussi bien au danger de remise en marche de glissements anciens qu'au risque de déclenchement de nouveaux glissements dans des zones où il n'en existe pas encore. Toutefois, comme notre recherche nous a amenés à supposer que les premiers déclenchements des glissements étudiés pourraient bien avoir été provoqués par des tremblements de terre, nous dirons à la fin du présent chapitre quelques mots à propos de la difficulté d'intervenir à ce niveau.

### **1. Considérations générales**

#### **1.1. La maîtrise de l'eau**

La première tâche à réaliser quand il s'agit de stabiliser un glissement de terrain ou de prévenir son apparition est de collecter les eaux de surface et de les conduire en dehors de la zone dangereuse, c'est-à-dire de limiter autant que possible toute infiltration (Hutchinson, 1984; Romana, 1991). Il est donc indispensable:

1) de favoriser autant que possible l'écoulement superficiel des eaux de pluie. Ceci implique par exemple que les eaux collectées sur les routes doivent être conduites en dehors des zones dangereuses et ne se perdent pas à la surface du sol. Des pentes doivent être conservées pour que les eaux s'écoulent, et il est dangereux de multiplier les surfaces horizontales qui favorisent l'infiltration. Le labour des terres est aussi défavorable puisqu'il augmente l'infiltration entre les sillons, du moins tant que ceux-ci sont bien marqués.

2) de conduire les eaux usées, tout comme les eaux de pluie, en dehors des zones dangereuses. Si une épuration individuelle est adoptée, les eaux qui proviennent des installations d'épuration doivent être collectées et surtout pas envoyées dans des puits perdants.

3) de veiller à conserver un réseau d'égouttage étanche.

4) de surveiller le réseau d'adduction d'eau pour repérer les fuites qui pourraient apparaître.

Comme l'instabilité réelle de chaque glissement reconnu est impossible à estimer dans le cadre de cette étude et que des précipitations très exceptionnelles peuvent survenir, l'application stricte des mesures préconisées ne garantit pas que des mouvements de terrain ne se produiront pas. Il faut en effet se rendre compte qu'une précipitation de 126 mm comme celle tombée les 14 et 15 septembre 1998 à Thimister correspond, pour le glissement de Manaihan qui couvre 6,8 ha, à environ 8600 m<sup>3</sup> d'eau qui se distribuent sur tout le glissement.

En comparaison avec de tels chiffres, les quantités d'eaux usées délivrées par des habitations en égouttage individuel peuvent paraître faibles. Toutefois, si on évalue grossièrement le volume d'eaux usées d'une famille à 200 m<sup>3</sup>/an pour un terrain occupé de 1000 m<sup>2</sup>, cela représente l'infiltration d'une tranche d'eau de 200 mm/an. Cette valeur doit être mise en balance avec les 900 mm de précipitations reçues par le Pays de Herve en moyenne par an, dont environ 500 mm partent en évapotranspiration (après infiltration temporaire pour la partie transpirée, mais quasi sans report d'un an sur l'autre), de

l'ordre de 150-200 mm sont évacués par ruissellement direct et 200 mm seulement aboutiront aux cours d'eau en écoulement de base après infiltration (Gellens & Roulin, 1998; F. Petit, communication orale). Bien sûr, les 200 mm d'eau infiltrée via les puits perdants sont aussi partiellement évapotranspirés, spécialement durant la saison végétative. Mais, durant 5 mois d'hiver et de repos de la végétation, l'eau infiltrée dans le sol via les puits perdants (dont on peut considérer le débit comme assez régulier sur l'année) semble représenter près de la moitié du total des eaux de percolation, tout au moins dans le Pays de Herve et en tenant compte d'une densité de 10 maisons/ha. Localement, l'installation d'un lotissement par exemple peut ainsi avoir des répercussions non négligeables sur la quantité d'eau infiltrée et éventuellement sur le risque de remise en mouvement si l'infiltration accrue mène l'eau vers les plans de cisaillement d'anciens glissements de terrain.

A côté des mesures légères énoncées ci-dessus concernant les eaux de surface, une autre possibilité d'intervention consiste dans le drainage des eaux souterraines. C'est évidemment beaucoup plus difficile et beaucoup plus coûteux. Deux approches peuvent être utilisées: la première consiste à intercepter l'eau du sol à faible profondeur avant qu'elle n'atteigne la zone de glissement; la seconde consiste à assécher directement les surfaces de glissement en drainant le sol à plus grande profondeur.

La première technique peut être efficace si une nappe aquifère existe souvent près de la surface du sol, et en tout cas à moins de 2 m de profondeur. Elle consiste à creuser des tranchées disposées selon la ligne de plus grande pente et à les remplir avec du matériel grossier permettant une libre circulation des eaux. Ces drains sont normalement creusés à la pelle mécanique jusqu'à une profondeur de 3 à 5 m et sont espacés de 6 à 20 m. A l'extrémité inférieure de la zone dangereuse, les eaux provenant des drains sont collectées et évacuées.

La deuxième approche est plus efficace mais plus difficile à mettre en oeuvre; elle vise à l'assèchement des surfaces de glissement. Lorsque celles-ci se trouvent à grande profondeur, la technique la meilleure consiste à creuser des galeries drainantes le plus près possible des surfaces de glissement. De tels travaux sont toutefois hasardeux et les galeries peuvent être détruites par une remise en marche du terrain. Dans le cas du Pays de Herve, si de tels travaux devaient être réalisés, les galeries devraient être creusées dans la partie sommitale du Houiller à proximité de la base des sables d'Aachen. Une technique de stabilisation fort semblable consiste en la réalisation de forages jusqu'au niveau où la nappe doit être abaissée et en l'exécution de pompages dans ces forages. A la place d'installer des galeries drainantes, il est encore possible de forer des drains subhorizontaux qui doivent bien entendu être équipés de filtres et qui se raccordent à des puits verticaux de faible diamètre (1-1.5 m) servant à collecter les eaux sur toute l'épaisseur de la masse à drainer.

La réalisation de tels ouvrages pour stabiliser des glissements de terrain est évidemment extrêmement onéreuse et ne se justifie que pour protéger des constructions ou des ouvrages importants. Ces méthodes sont indiquées ici pour faire prendre conscience au lecteur qu'il est toujours malaisé et extrêmement coûteux de stabiliser des glissements de terrain. Il est de ce fait infiniment préférable de prendre des précautions pour éviter de provoquer une déstabilisation des versants.

## **1.2. Les modifications du profil du versant par la réalisation d'excavations et l'installation de remblais**

Des modifications malencontreuses du profil d'un versant peuvent être aussi à l'origine du déclenchement de glissements de terrain. Vis-à-vis de tout glissement existant ou potentiel, et notamment dans le cas de glissements rotationnels comme ceux qui nous occupent dans le Pays de Herve, toute charge nouvelle à la partie supérieure et toute excavation à la partie inférieure d'un versant (ou d'un glissement, s'il existe déjà) vont accroître l'effort de cisaillement, tandis que toute excavation à la partie supérieure du versant et toute charge apportée à la partie inférieure réduiront cet effort. Si la surface basale d'un glissement rotationnel caractéristique est reconnue, on peut définir la zone neutre séparant la partie supérieure où la masse pousse au déplacement et la partie inférieure qui s'oppose à celui-ci; ce faisant, on circonscrit les zones où aucun remblaiement ne peut être accepté et celles où un remblaiement est au contraire souhaitable.

Il convient donc d'éviter scrupuleusement de remblayer la partie supérieure d'un glissement. La tentation est très grande pour une personne non avertie de vouloir rétablir par des remblais le profil

*Figure 11.1. Eléments défavorables à la stabilité d'un site construit sur un versant.*

antérieur au mouvement du sol en déversant des terres sur la zone de départ affaissée. Pareille recharge à la tête du glissement est toujours extrêmement néfaste; elle accroît l'effort de cisaillement et provoquera inévitablement un nouveau déplacement. Il est très vraisemblable, comme nous l'avons montré, que les déplacements récents des glissements de Manaihan (n° 14) et de la Croix Polinard (n° 3) sont les conséquences directes de semblables recharges.

Il est donc dangereux de modifier sans réfléchir le profil d'un versant susceptible de glisser, et plus dangereux encore de changer le profil d'un versant qui a déjà subi un glissement de terrain. En effet, le glissement s'est arrêté lorsque les forces intervenant dans l'effort de cisaillement ont été compensées par la friction sur le plan de glissement. L'équilibre est de ce fait précaire et des recharges et excavations ne peuvent être entreprises sans disposer d'une bonne connaissance de la localisation des plans de glissement. On peut évidemment ajouter que pour stabiliser des glissements de terrain, il est possible d'intervenir sur le profil du terrain en excavant et remblayant aux endroits convenables. De telles interventions nécessitent le déplacement de grands volumes de terre et ne peuvent être appliquées que dans des cas exceptionnels.

### **1.3. Ancrages**

L'installation d'ancrages au travers de la masse en train de glisser pour l'amarrer au sous-sol stable sous-jacent est une autre technique utilisée quelquefois pour stabiliser des pentes. Parfois aussi, des injections en profondeur de masses de ciment sont réalisées. Nous ne nous attarderons pas ici sur ces techniques de génie civil.

### **1.4. Tremblements de terre et mesures de prévention**

Enfin rappelons que les premiers mouvements des glissements de terrain étudiés pourraient bien être d'origine sismique. Si tel est le cas, il est sans doute impossible de s'en prémunir. Seul un abaissement de la nappe phréatique qui se trouve dans les sables d'Aachen (bien difficile à réaliser) pourrait constituer une contre-mesure s'opposant à des mouvements dépendant de la liquéfaction des niveaux sableux. Le risque de voir se produire pareil phénomène serait particulièrement grand si une secousse sismique d'intensité suffisante et d'épicentre "favorablement" localisé survenait immédiatement après une période de fortes précipitations, soit au moment où la résistance au cisaillement du massif est diminuée. La conjonction de ces circonstances (intensité et localisation du séisme, précipitations abondantes) est heureusement fort rare: statistiquement, nous ne disposons

actuellement que d'une observation en 2000 ans (l'événement daté de 100 AD) et on soulignera notamment qu'à ce jour, les datations  $^{14}\text{C}$  n'ont pas permis de mettre en évidence une quelconque incidence du séisme de Verviers (1692) sur les glissements, malgré une intensité épiscopale estimée à VIII. Remarquons par ailleurs que, si des mesures parasismiques permettent aux immeubles de mieux résister aux vibrations, ces mesures n'offrent cependant aucune protection contre les glissements de terrain. La possibilité de se prémunir contre des mouvements du sol liés à des secousses sismiques est de ce fait limitée. Il est toutefois évident que toutes les précautions relatives à la gestion de l'eau et à la conservation du profil du terrain ne peuvent être que favorables à la stabilité des versants dans ce cas de figure également.

En résumé, les recommandations à retenir dans le cadre d'un bon aménagement du territoire concernent seulement la gestion de l'eau et les modifications éventuelles du profil des versants. Les mesures de stabilisation des glissements de terrain sont généralement des mesures lourdes et difficiles à appliquer. Elles nécessitent avant d'être entreprises des études détaillées comprenant des sondages, des observations géophysiques et des essais de laboratoire ainsi que l'installation de piézomètres pour rassembler des informations sur l'eau dans le sol. Ces considérations soulignent combien il est important de ne pas modifier les équilibres naturels. Les remises en marche des glissements de Manaihan (n° 14) et de la Croix Polinard (n° 3) résultent bien sûr de pluies exceptionnelles, mais aussi de recharges inconsidérées au sommet des glissements.

## **2. Mesures préconisées dans les zones de risques définies pour le Pays de Herve**

### **2.1. Zones de classe A (figurées en rouge)**

Nous recommandons que toute zone de classe A, déjà affectée d'un glissement ancien de grande ampleur et à surface basale profonde, soit dorénavant **totalement inconstructible**. Cela vaut tant pour toute habitation familiale nouvelle que pour toute autre construction, y compris l'enfouissement de conduites de toute nature, l'édification de pylones, ... Des permis de bâtir ne devraient plus être délivrés pour la construction d'annexes (en ce compris les annexes agricoles) aux bâtiments existant actuellement dans ces zones. L'expérience quadruplement malheureuse de Manaihan (dommages à des biens privés, rupture de l'égout industriel de l'AIDE, fermeture de la station Distrigaz, problèmes de conduites à partir du château d'eau de la SWDE) devrait suffire à persuader de la nécessité de ces mesures.

### **2.2. Zones de classe B (figurées en orange), C (figurées en jaune) et D (figurées en hachuré orange et jaune)**

Les aires reprises en classe B sont celles qui, actuellement dépourvues de trace de glissement ancien, présentent, d'après la carte de prédiction, le plus haut risque d'être affectées par un futur glissement de terrain. Concrètement, cela signifie qu'elles réunissent les conditions lithologiques, topographiques et hydrologiques les plus semblables à celles des zones où d'anciens glissements ont déjà eu lieu, et qu'une intervention humaine même mineure est susceptible de déstabiliser les versants concernés.

Les zones appartenant à la classe C présentent un risque de glissement de terrain qui, pour être moins grand qu'en classe B, n'en reste pas moins significatif. La différence réside probablement surtout dans l'ampleur plus limitée des glissements qui pourraient s'y développer. Pour ce qui concerne les précautions à recommander vis-à-vis des modifications au profil de versant, la situation est ici plus complexe. Dans ces zones, la décharge des terrains devrait en effet être autant évitée que leur recharge car, si elles sont identifiées comme zones de départ potentiel d'un glissement, elles constituent aussi le soutien naturel des pentes encore plus dangereuses de la classe B, situées plus haut sur le versant.

Quant aux zones de classe D (frange d'accumulation), elles correspondent fréquemment à une aire d'affleurement des sables d'Aachen, dont la liquéfaction est très probablement le facteur déclenchant des glissements dans les marnes et smectites de la formation de Vaals sus-jacente. Il convient donc d'y rester spécialement attentif à une gestion rigoureuse des eaux de surface.

Malgré les risques élevés, on ne peut interdire la construction dans les zones de classe B, C et D. Toutefois, toute demande de permis de bâtir et/ou de modification du relief devrait faire l'objet d'une étude géotechnique précisant les précautions et les mesures à prendre pour assurer la stabilité des constructions et les contraintes à respecter pour éviter toute influence sur la stabilité des zones voisines. Cette étude géotechnique veillera ainsi à satisfaire l'ensemble des précautions présentées dans la section 1 ci-dessus ("considérations générales") relativement à la maîtrise des eaux et au profil de versant.

Il serait par ailleurs souhaitable, afin de minimiser les modifications des conditions naturelles, que la densité de l'habitat soit limitée dans ces zones et que, par exemple, elle n'y dépasse pas 5 maisons/ha.

Il conviendrait également de porter à la connaissance de tout candidat propriétaire le risque important de glissement de terrain auquel il pourrait avoir à faire face.

En cas d'égouttage individuel, les puits perdants seront totalement proscrits, les eaux épurées et les eaux pluviales devant impérativement être collectées et évacuées à l'aval de la zone dangereuse. Du point de vue géologique, dans le contexte des crêtes du Pays de Herve, il serait même souhaitable que ces eaux n'aient pas l'occasion de s'infiltrer dans les sables d'Aachen qui affleurent le plus souvent en pied de versant et ne sont néanmoins pas toujours englobés dans les zones de classe B, C ou D.

Les conduites d'adduction d'eau seront spécialement conçues pour rester étanches même en cas de mouvement léger du sol.

### **2.3. Zones de classe E (aucun figuré)**

Aucune restriction liée au risque de glissement de terrain.

## **XII. Conclusions**

L'étude des glissements de terrain du Pays de Herve a montré que les formes de grande ampleur, pouvant engendrer des dégâts considérables, sont exclusivement localisées sur les flancs de la crête de Battice – Henri-Chapelle et d'une crête secondaire, là où la superposition "sables d'Aachen – argiles de Vaals" est à l'affleurement sur des pentes de 5 à 20%.

Les diverses observations et analyses effectuées nous ont amené à considérer comme fort possible une origine sismique des grands glissements de terrain, dont par contre les diverses réactivations seraient essentiellement liées à des épisodes de précipitations exceptionnelles. L'honnêteté nous oblige toutefois à apporter une précision importante quant à l'acceptation de la thèse sismique pour expliquer le déclenchement des glissements. En effet, E. Poty, J.M. Marion et L. Barchy souhaitent se démarquer clairement des positions prises par A. Demoulin et A. Pissart dans la mesure où ils estiment que le faisceau d'arguments présenté par ces derniers à l'appui de l'interprétation sismique n'est pas suffisant. Ils pensent en effet que des observations d'égale valeur peuvent soutenir une explication purement climatique de l'origine des grands glissements et ne veulent en conséquence privilégier à l'heure actuelle aucune interprétation. Ils se demandent entre autres si le fait que les glissements de terrain se concentrent tous dans la partie de la crête dépourvue des craies de Gulpen n'est pas un indice d'une influence hydrologique prépondérante, et donc si l'hypothèse climatique n'en est pas renforcée. Clairement, la question de l'origine des grands glissements reste donc ouverte, et il n'est pas opportun de la discuter plus avant ici puisqu'aussi bien ce point est fort académique et n'intéresse que médiocrement les mesures à prendre par la Région Wallonne relativement à l'aménagement du territoire dans les zones touchées par les glissements.

Le suivi des mouvements actuels et récents du glissement de Manaihan a pour sa part mis en lumière leur importance et a démontré qu'il est absolument nécessaire de circonscrire les zones du Pays de Herve affectées par le risque de mouvements de masse et d'assortir la définition de ces zones d'un certain nombre de mesures préventives. La définition des zones de risque a été réalisée au départ d'une carte de prédiction du risque réalisée en collaboration avec le Dr C.F. Chung du *Laboratory of Spatial Data Analysis* du *Geological Survey of Canada*. Le document retenu est basé sur l'estimation des probabilités conditionnelles conjointes liant le risque de glissement à la combinaison des paramètres suivants: lithologie, valeur et orientation des pentes, proximité du réseau hydrographique et altitude. Cinq classes de risque ont été définies, et des recommandations ont été formulées relativement à chacune d'entre elles. Ces recommandations peuvent paraître passablement sévères par rapport à la probabilité d'occurrence d'un grand glissement à moyen terme (par exemple 100 ans). Toutefois, la faible probabilité du risque est contrebalancée par l'importance des dégâts que ces glissements causeraient s'ils avaient lieu et par le fait que, précisément, les interventions humaines qui sont limitées par les prescriptions recommandées augmenteraient sensiblement cette probabilité. D'autre part, la procédure suivie pour l'élaboration de la carte de prédiction est tout à fait rigoureuse et objective, la seule limitation à la validité des résultats étant liée au choix des paramètres pris en compte. Néanmoins, le remarquable taux de prédiction obtenu est garant de la représentativité de ces paramètres.

Dans la mesure où les surfaces notées comme zones d'habitat ou d'extension d'habitat au plan de secteur sont encore bien loin d'être entièrement construites, nous considérons qu'il est raisonnable d'être très restrictif dans les zones où la contrainte physique liée au risque de glissement de terrain est indubitable. Finalement, les zones potentiellement bâtissables concernées par les prescriptions et interdictions recommandées dans le Pays de Herve ne couvrent qu'une surface très minime.

### **XIII. Bibliographie**

- Ancion C. & Evrard E., 1957 - Contribution à l'étude des failles Monty, Mouhy et d'Ostende dans la partie orientale du massif de Herve. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **80**: B477-488.
- Brunsdon D. & Ibsen M.L., 1994a - The temporal causes of landslides on the south coast of Great Britain. In European Community Programme EPOCH, Contract 90 0025, *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. Final report*, Part 2, Case studies of the temporal occurrence of landslides in the European Community: 339-384.
- Brunsdon D. & Ibsen M.L., 1994b - The spatial and temporal distribution of landslides on the south coast of Great Britain. In European Community Programme EPOCH, Contract 90 0025, *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. Final report*, Part 2, Case studies of the temporal occurrence of landslides in the European Community: 385-423.
- Buma J. & van Asch T., 1996 - Slide (rotational). In *Landslide recognition. Identification, movement and causes*, R. Dikau, D. Brunsdon, L. Schrott & M.L. Ibsen Eds. Wiley, Chichester: 43-61.
- Camelbeeck T., 1993 - Mécanisme au foyer des tremblements de terre et contraintes tectoniques: le cas de la zone intraplaque belge. *Thèse de doctorat inédite*, Louvain-la-Neuve, 343 p.
- Camelbeeck T., Alexandre P., Vanneste K., Martin H. & Demoulin A., 1998 - The Hockai fault zone. An active fault in the Ardenne massif? *Field guide. Summer School on "Active faulting and paleoseismology" held at Munsbach (GD Lux.), 10-22 July 1998*, Observatoire Royal de Belgique, 18 p.
- Chung C.F. & Fabbri A., 1993 - The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable resources*, 2: 122-139.
- Chung C.F., Fabbri A. & van Westen C., 1995 — Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Carrara A. & Guzzetti F. Eds., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht: 107-133.
- Chung C.F. & Leclerc Y., 1994 - A quantitative technique for zoning landslide hazard. *Papers and extended abstracts for technical programs of IAMG'94*, International Association for Mathematical Geology Annual Conference, Mont Tremblant, Québec: 87-93.
- Crozier M., 1992 - Determination of paleoseismicity from landslides. In *Landslides (glissements de terrain)*. D. Bell Ed., Int. Symp., 6<sup>th</sup>, Christchurch, New Zealand. Balkema, Rotterdam, **2**: 1173-1180.
- Delmonaco G., Margottini C. & Serafini S., 1999 - Climate change impact on frequency and distribution of natural extreme events: an overview. In *Floods and landslides: integrated Risk Assessment*, R. Casale & C. Margottini Eds, Springer Verlag: 45-66.
- Dikau R. & Schrott L., 1999 - The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. *Geomorphology*, 30: 1-12.
- Forir H., 1906 - Le pays de Herve. Essai de géographie physique. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **33**: M163-171.
- Gellens D. & Roulin E., 1998 - Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *J. of Hydrology*, **210**: 242-258.
- Gostelow T., 1991a — Properties of soils relevant to natural slope stability. In *Prevention and control of landslides and other mass movements*, M. Almeida-Teixeira, R. Fantechi, R. Oliveira & A. Gomes Coelho Eds., Commission of the European Communities, Report EUR 12918 EN: 37-51.
- Gostelow T., 1991b — Rainfall and landslides. In *Prevention and control of landslides and other mass movements*, M. Almeida-Teixeira, R. Fantechi, R. Oliveira & A. Gomes Coelho Eds., Commission of the European Communities, Report EUR 12918 EN: 139-161.
- Graulich J.M., 1959 - Sur le prolongement méridional du graben de La Minerie (Pays de Herve). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **83**: 55-61.



- Graulich J.M., 1969 - La géologie de l'autoroute Liège-Aachen entre Herve et La Saute (Clermont). *Prof. Paper Serv. Géol. Belg.*, **5**, 61 p., 25 pl.
- Hansen W., 1965 - Effects of the earthquake of March 27, 1964, at Anchorage, Alaska. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, **542-A**, 68 p.
- Hutchinson J., 1984 - Landslides in Britain and their countermeasures. *Journal of Japan Landslide Society*, **21**: 1-24.
- Jibson R., 1996 - Using landslides for paleoseismic analysis. In *Paleoseismology*, J. McCalpin Ed. Acad. Press, San Diego: 397-438.
- Jibson R. & Keefer D., 1993 - Analysis of the seismic origin of landslides. Examples from the New Madrid seismic zone. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **105**: 521-536.
- Keefer D., 1984 - Landslides caused by earthquakes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **95**: 406-421.
- Lee H. & Edwards B., 1986 - Regional method to assess offshore slope stability. *J. Geotech. Eng.*, **112**: 489-509.
- LGIH (Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique), s.d. - Tucrail s.a. TGV. Tronçon José-Welkenraedt. Reconnaissances géologiques, géophysiques et géotechniques. *Rapport d'expertise TUC 954*, 119 p.
- Monjoie A., Schroeder C., Chazard P. & Thoirion P., 2000 – Glissement de terrain à Thimister. Reconnaissances par géophysique et calculs préliminaires de stabilité. *Rapport non publié, rendu à l'occasion d'un avenant à la présente Convention*, 22 p. + 4 pl.
- Perrin N. & Hancox G., 1992 - Landslide-dammed lakes in New Zealand. Preliminary studies on their distribution, causes and effects. In *Landslides (glissements de terrain)*. D. Bell Ed., Int. Symp., 6<sup>th</sup>, Christchurch, New Zealand. Balkema, Rotterdam, **2**: 1457-1466.
- Romana M., 1991 - Correction methods for soil instability in natural slopes. In *Prevention and control of landslides and other mass movements*, M. Almeida-Teixeira, R. Fantechi, R. Oliveira & A. Gomes Coelho Eds., Commission of the European Communities, Report EUR 12918 EN: 181-201.
- Seed H., 1968 - Landslides during earthquakes due to soil liquefaction. *J. Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, **94**: 1055-1122.
- Selby M., 1970 – Slope and slope processes. *Publ. n°1 of the Waikito branch of the New Zealand Geogr. Society*, 59 p.
- Sharpe C., 1938 – Landslide and related phenomena. Columbia Univ. Press, New York, 137 p.
- Starkel L., 1966 - The palaeogeography of mid- and eastern Europe during the last cold stage and West European comparisons. *Phil. Trans. Royal Soc. London*, **B280**: 351-372.

## XIV. Résumé non technique

### **1. Introduction**

De grands glissements de terrain ont été découverts récemment sur les versants de la crête du Pays de Herve entre Battice et Clermont. Un des glissements au lieu-dit Manaihan, au sud de Battice, actuellement en mouvement, a entraîné l'apparition de dégâts dans des immeubles situés à la tête du glissement et a provoqué la rupture d'un égout industriel géré par l'AIDE.

Vu l'importance des dégradations qu'occasionnent aux constructions et aux installations humaines les glissements de terrain, la reconnaissance des zones où peuvent apparaître ces phénomènes est de la plus grande importance pour l'aménagement du territoire. Il convient en effet de ne pas autoriser l'installation de constructions sur des terrains instables ou susceptibles de le devenir. En ces endroits, les immeubles sont en effet en danger de destruction et, à la limite, la vie de leurs habitants pourrait être menacée. L'Administration de l'Aménagement du Territoire doit de ce fait connaître le plus précisément possible les zones menacées par les glissements, caractériser l'importance du risque et définir les précautions à prendre dans les zones dangereuses. C'est dans ce but que la présente étude a été réalisée.

Nous avons tout d'abord recherché la localisation de tous les glissements du Pays de Herve. Ils n'existent que dans une zone peu étendue située dans la région de Battice – Thimister, où ils couvrent cependant près de 90 ha. Nous nous sommes préoccupés ensuite de déterminer l'âge de ces glissements de terrain et de rechercher les causes qui les ont déclenchés. Une cartographie des zones à risque a été ensuite établie, cartographie qui distingue les risques de remise en mouvement des glissements anciens et ceux de voir apparaître de nouveaux glissements. Enfin, des recommandations sont fournies précisant les précautions à prendre pour éviter la remise en marche de ces glissements.

Le plan du présent travail est donné ci-dessous:

1. Introduction. Le but de l'étude. Présentation du plan du rapport.
2. Quelques généralités sur les glissements de terrain.
3. La géologie de la région. Présentation des différentes formations géologiques et de leurs caractéristiques géotechniques.
4. La recherche des glissements de terrain. Etude des photos aériennes: les vols examinés, leurs caractéristiques. Les vérifications de terrain. La cartographie des glissements de terrain reconnus.
5. Les caractéristiques externes des grands glissements de terrain observés. Aspect extérieur; localisation dans la topographie, exposition.
6. Les caractéristiques internes des glissements. Les fouilles réalisées: présentation des coupes. Les recherches géophysiques et leurs résultats.
7. L'âge des glissements de terrain. Les datations <sup>14</sup>C à Sérezé et à la Croix Polinard.
8. Les facteurs ayant déclenché les glissements de terrain. Tremblements de terre ou événements climatiques? Rôle de la lithologie.
9. Les mouvements actuels. Le glissement de Manaihan: témoignages; suivi GPS; déplacements entre 1953 et 1999; causes des déplacements observés. Les mouvements dans d'autres glissements.
10. Cartographie des risques. Le risque de remise en mouvement des glissements reconnus. Cartographie et estimation des risques dans toute la région étudiée.
11. Les mesures de prévention. Contrôle de l'eau; modifications de profil des versants; recommandations proposées.
12. Conclusions.

13. Bibliographie.

14. Résumé non technique.

## **2. Généralités sur les glissements de terrain**

Quelques notions indispensables pour comprendre le présent rapport sont données dans ce deuxième chapitre.

### **2.1. Les types de glissements**

La figure 2.1 montre les principaux types de glissements de terrain. Les glissements du Pays de Herve auxquels est consacré notre travail sont du type rotationnel mais la réalité est complexe et se rapproche de la figure 2.2.

Les éléments favorisant les glissements de terrain peuvent être divisés en facteurs susceptibles d'accroître l'effort de cisaillement (facteurs accroissant la poussée de la masse vers le bas) et en facteurs diminuant la résistance à la rupture (facteurs facilitant le glissement). Nous faisons apparaître en gras dans le tableau ci-dessous les facteurs principaux qui sont intervenus dans les glissements du Pays de Herve et dont il sera question longuement par la suite: surcharges, tremblements de terre et précipitations.

#### **Facteurs susceptibles d'accroître l'effort de cisaillement.**

1. Enlèvement de supports latéraux:

- a) érosion fluviale
- b) accroissement de la pente par les glissements de terrain
- c) excavations humaines

2. Surcharges:

- a) neige, eau
- b) **accumulation anthropique**

3. Efforts temporaires:

- a) **tremblement de terre**
- b) vibrations anthropiques

4. Enlèvement de supports sous-jacents:

- a) érosion souterraine par dissolution ou transfert des éléments fins
- b) activités minières

5. Pression latérale:

- a) eau pénétrant latéralement
- b) augmentation de volume d'une argile s'hydratant

#### **Facteurs susceptibles de diminuer la résistance à la rupture.**

1. Composition et granulométrie des matériaux:

- a) faible cohérence des matériaux, pouvoir élevé de rétention de l'eau
- b) matériaux faiblement compactés
- c) grains de forme lisse, minéraux tendres aplatis, tels que mica, serpentine,...

**2. Pénétration de l'eau dans les argiles (pluies violentes, remontée de la nappe, etc.):**

- a) nature des argiles ( en relation avec leur hydratation potentielle)
- b) présence de cations échangeables
- c) séchage des argiles (ouvrant des fissures et permettant la pénétration d'eau)

**3. Effet de l'eau comprise dans les pores du matériau:**

- a) effet de la poussée d'Archimède

b) réduction de la tension capillaire

#### 4. Structure générale:

- a) discontinuités comme celles dues aux failles, à la stratification, aux joints,.. spécialement quand elles sont en pente vers la paroi
- b) alternance de couches perméables et imperméables.

### 2.2. Précipitations exceptionnelles ou tremblements de terre?

De fortes précipitations amènent dans le sol des quantités d'eau importantes. L'infiltration de cette eau, lorsqu'elle sature le sol, enlève la cohésion qui est due au-dessus de la nappe aquifère aux films capillaires qui existent entre les grains du sol. La pression qui était négative (qui collait les grains entre eux) devient alors, si beaucoup d'eau s'infiltre, positive et facilite ainsi l'apparition d'un glissement de terrain. Ce phénomène (illustré par la figure 2.4) ainsi que l'augmentation de la plasticité des argiles, déclenche des glissements de terrain au moment des fortes précipitations.

Il est fort important pour estimer le risque de voir apparaître de nouveaux glissements de savoir si les premiers mouvements ont été provoqués par des tremblements de terre ou par des précipitations anormales. Il en sera question plus tard.

### 2.3. Premier glissement ou remise en marche d'un ancien glissement?

Il convient de distinguer ces deux cas. En effet le premier déclenchement d'un glissement de terrain demande un effort de cisaillement beaucoup plus important que celui qui est nécessaire pour la remise en mouvement de glissements anciens. La figure 2.5 illustre ce phénomène. Il en résulte que les mouvements initiaux des glissements de terrain dus aux précipitations sont souvent catastrophiques car rapides. Ils s'étendent sur plusieurs dizaines de mètres en aval. Par contre, les remises en mouvement de glissements anciens (qui se produisent plus facilement que les glissements initiaux) sont généralement lentes et les déplacements sont inférieurs à 1 m par an.

### 2.4. Relations empiriques entre la durée des précipitations et les glissements de terrain

Des données empiriques sur les relations entre les précipitations et les glissements de terrain sont données (d'après Gostelow, 1991). Elles montrent le danger de précipitations mensuelles dépassant 250 mm, de précipitations journalières de 100 mm et d'intensités dépassant 70 mm/h.

## 3. Géologie et géotechnique

### 3.1. Géologie

#### 3.1.1. Les sources de renseignement considérées

Ont été prises en compte dans la présente étude les cartes géologiques anciennes et nouvelles (dont certaines non encore publiées), les données recueillies lors des études géologiques détaillées réalisées avant la construction de l'autoroute et du TGV, ainsi que les données sur les anciennes exploitations minières, conservées au Corps des Mines.

#### 3.1.2. La structure géologique et la stratigraphie

La coupe géologique donnée sur la figure 3.5 permet de visualiser la structure géologique de la région étudiée. Ce profil fait apparaître:

1. A la partie inférieure, des formations paléozoïques (Houiller) fortement plissées.
2. Reposant sur le Paléozoïque, les formations meubles du Crétacé qui correspondent aux parties les plus élevées et qui sont affectées par les glissements de terrain.
- 3) Au dessus de ces formations, des dépôts quaternaires généralement limoneux mais toujours peu épais.

Les **roches primaires** de la zone concernée sont uniquement des roches du Houiller (schistes, grès et couches de charbon) qui sont altérées directement sous le Crétacé. Aucune exploitation houillère connue n'existe en-dessous des glissements de terrain.

**Tableau lithostratigraphique**

| <i>Groupe</i>      | <i>Système</i> | <i>Sous-système</i> | <i>Etage</i>  | <i>Formation</i> | <i>Lithologie</i>                                             |
|--------------------|----------------|---------------------|---------------|------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Quaternaire</b> |                |                     |               |                  | Limons, dépôts de pente, alluvions                            |
| <b>Tertiaire</b>   | Oligocène      |                     | Tongrien (?)  |                  | Sables moyens à fins et graviers                              |
| <b>Secondaire</b>  | Crétacé        | Sénonien            | Maastrichtien |                  | Argile à silex résiduelle (tuffeau de Maastricht)             |
|                    |                |                     | Campanien     | Gulpen           | Craie                                                         |
|                    |                |                     |               | Vaals            | Argile marneuse glauconifère (smectite de Herve)              |
|                    |                |                     | Santonien     | Aachen           | Sables jaunes et blancs souvent fins, silts, niveaux argileux |
| <b>Primaire</b>    | Carbonifère    | Silésien            | Westphalien   |                  | Shales et siltites à lits de grès et niveaux de houille       |
|                    |                |                     | Namurien      |                  | Shales et siltites avec bancs de grès et de quartzite         |

Les **terrains secondaires**, subhorizontaux, qui sont affectés par les glissements de terrain, comprennent de bas en haut:

- les sables d'Aachen: sables blancs et jaunes, fins à grossiers, à stratification entrecroisée et oblique et à horizons oxydés et charbonneux et niveaux indurés
- la formation de Vaals, appelée souvent "smectite de Herve", constituée d'argiles glauconifères marneuses, parfois sableuses avec des niveaux indurés
- la formation de Gulpen, principalement composée de craie blanche avec ou sans silex. Quand la craie a été entièrement dissoute, des argiles à silex subsistent, semblables aux résidus de la formation de Maastricht également entièrement dissoute dans la zone considérée.

Les **terrains tertiaires** ne comprennent que des vestiges résiduels de matériaux sableux avec des lentilles d'argile sableuse et parfois des graviers.

Le **Quaternaire** est représenté par des limons éoliens, des colluvions et des dépôts de solifluxion superficiels.

### 3.2. Tectonique

Actuellement, seules les failles d'orientation NNO-SSE établies durant l'orogénèse varisque sont susceptibles d'être actives et d'engendrer des tremblements de terre. C'est notamment le cas des failles bordant le petit graben de La Minerie, dont la limite orientale se trouve dans le prolongement septentrional de la zone faillée de Hockai.

### 3.3. Propriétés géotechniques des différentes formations

Les formations géologiques du secteur étudié ont presque toutes de mauvaises caractéristiques géomécaniques: les schistes houillers altérés, la formation argileuse de Vaals, les résidus de dissolution des formations de Gulpen et de Maastricht et même les dépôts quaternaires qui remanient les formations précédentes, tous ces dépôts sont des formations dans lesquelles, vu leur nature argileuse, peuvent se produire des glissements de terrain.

Les sables d'Aachen compris entre le Houiller et la formation de Vaals ont aussi de très mauvaises propriétés géotechniques, présentant entre autres des risques élevés de boulanges qui ont compliqué la construction de l'autoroute.

## **4. L'identification des glissements de terrain**

### **4.1. Les documents consultés**

La recherche des glissements de terrain dans tout le Pays de Herve a été réalisée par étude stéréoscopique de photos aériennes. Parmi les différents vols consultés, les photos IGN prises en 1947 à l'échelle du 1/10000 se sont révélées les meilleures. Toutes les observations ont été vérifiées sur le terrain, ce qui nous a conduit à écarter de nombreux phénomènes qui se sont révélés au sol comme des formes de taille trop réduite ou des erreurs d'interprétation.

### **4.2. Description sommaire des glissements observés**

Les figures 4.2, 4.3 et 4.4 donnent la localisation des glissements observés. Les figures suivantes de ce chapitre montrent avec précision sur des extraits de carte au 1/5000 résultant d'agrandissements de la nouvelle carte IGN au 1/10000 les limites des glissements reconnus. En outre, nous reproduisons des photos aériennes obliques prises à basse altitude montrant les caractéristiques de la majorité de ces glissements de terrain.

## **5. Les caractéristiques externes des grands glissements de terrain**

### **5.1. Classement des glissements observés**

Le tableau qui suit présente les caractéristiques principales des glissements de terrain reconnus. Leur superficie totale est d'environ 90 ha. Dix glissements (1, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14), qui comprennent tous les glissements étendus, ont des caractères très semblables: une zone d'arrachement abrupte et nette, des rides grossièrement perpendiculaires à la ligne de plus grande pente dans le tiers supérieur du glissement de terrain, un talus terminal marqué. Ce dernier caractère fait toutefois défaut au glissement n°14 (Manaihan). Ces glissements sont tous des glissements rotationnels multiples, c'est-à-dire présentant plusieurs blocs glissés formant les rides signalées précédemment.

Le glissement n° 4, d'environ 5 ha, est particulier. Il semble dû au glissement d'un panneau qui a découvert le matériau sous-jacent. L'extension véritable vers l'aval de la masse glissée n'a pas pu être délimitée. Ce glissement paraît très ancien.

Les glissements moins caractéristiques et différents de ceux que nous venons de décrire sont marqués d'une astérisque dans le tableau. Ils ne couvrent que 8 % de la surface totale des glissements reconnus.

Enfin, les glissements 15 et 17, peu caractéristiques, sont restés douteux.

### **5.2. Localisation dans la topographie exposition, pente**

Tous les glissements de la première catégorie sont localisés de part et d'autre de la crête principale du Pays de Herve et du diverticule qui s'étire vers Dison, au sud. Les zones d'arrachement se situent toutes aux environs de 300 m, près du sommet des crêtes. A première vue, les versants qui portent des glissements ne montrent aucune exposition préférentielle. Les pentes moyennes des glissements sont comprises entre 7 et 17%. C'est le glissement actuellement en mouvement de Manaihan (n° 14) qui présente la pente la plus faible (7%). Les glissements les plus caractéristiques ont des pentes comprises entre 15 et 17%, sauf le glissement n° 6, incliné de 8 à 12%.

| <i>N°</i> | <i>Abrupt de départ</i>                                  | <i>Masse du glissement</i>                 | <i>Abrupt terminal</i> | <i>Aire approxim.</i> | <i>Pente moyenne approxim.</i> |
|-----------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 1         | net, courbe, peut-être retouché par l'homme              | ondulations parallèles à la zone de départ | bien marqué            | 3.4 ha                | 15 à 17 %                      |
| 2         | très peu marqué                                          | pas de rides                               | local                  | 1.9 ha*               | 6 à 10 %                       |
| 3         | très développé, > 10 m                                   | rides caractéristiques                     | très marqué            | 13.3 ha               | 16 à 17 %                      |
| 4         | net, légèrement courbe                                   | rides apparentes                           | absent ou mal marqué   | 5.1 ha                | 10 %                           |
| 5         | net, courbe                                              | une ride marquée                           | pas net                | 5.6 ha                | 9 %                            |
| 6         | net, courbe, élevé                                       | rides marquées                             | net et élevé           | 21.8 ha               | 8 à 12 %                       |
| 7         | peu élevé                                                | irrégulière, sans rides                    | peu marqué             | 1.0 ha*               | 16 à 17 %                      |
| 8         | absent                                                   | ondulations                                | absent                 | 1.7 ha*               | 11 %                           |
| 9         | net, courbe                                              | rides très marquées                        | très net               | 5.6 ha                | non mesurable                  |
| 10        | très élevé au S du chemin de fer, limite incertaine au N | rides marquées                             | très net               | 12 ha                 | 15 à 17 %                      |
| 11        | courbe                                                   | une ride peu nette                         | peu élevé              | 1.3 ha*               | 15 %                           |
| 12        | marqué et élevé                                          | une ride nette                             | présent                | 2.4 ha                | 8 %                            |
| 13        | marqué et élevé                                          | irrégularités                              | présent                | 2.1 ha                | 16 %                           |
| 14        | important et élevé                                       | rides très apparentes                      | absent                 | 6.8 ha                | 7 %                            |
| 15        | peu élevé                                                | irrégularités faibles                      | absent                 | 0.9 ha*               | 15 %                           |
| 16        | absent                                                   | irrégularités locales                      | net                    | 2.9 ha*               | 7 %                            |
| 17        | inexistant                                               | ravinements                                | absent                 | 1.1 ha*               | 5 à 8 %                        |

## 6. Les caractéristiques internes des glissements

### 6.1. Les fouilles réalisées

Des tranchées ont été creusées à l'extrémité de deux glissements de terrain importants, à savoir les glissements n° 3 (Croix Polinard) et 10 (Sérezé). Ces fouilles n'ont dévoilé que sur une vingtaine de mètres la structure de ces glissements, dont l'extension est de plusieurs centaines de mètres. Elles ne peuvent donc pas faire apparaître la structure d'ensemble des glissements, que nous attendons plutôt de l'étude géophysique qui sera décrite plus loin. Ces dégagements ont fourni cependant quelques éléments intéressants que nous décrirons maintenant. Ils ont aussi permis de recueillir des éléments organiques (bois, charbon de bois) enfouis lors de la progression des glissements et dont la teneur en <sup>14</sup>C était mesurable. Des datations de phases de progression de ces glissements ont été ainsi obtenues, que nous discutons au chapitre 7.

#### 6.1.1. Les coupes dans le glissement de terrain n°3 (Croix Polinard)

Ces coupes sont localisées sur la figure 4.3 par des traits de couleur verte portant les chiffres 1, 2 et 3.

##### A. Coupe 1

Le dessin de la coupe est donné sur la figure 6.1.

Cette coupe a donné les résultats suivants: la surface du sol antérieure au recouvrement par le glissement de terrain a été retrouvée. Des matériaux datables par  $^{14}\text{C}$  ont été recueillis à ce niveau. La partie inférieure du glissement se serait mise en place suite à un mouvement plastique. Des masses glissées ont chevauché ensuite les matériaux déjà déposés.

#### B. Coupe 2

Le dessin de la coupe est donné sur la figure 6.2.

Interprétation: ici encore, la surface du sol antérieure au glissement a été retrouvée. Les matériaux organiques retrouvés à ce niveau n'étaient toutefois pas en quantité suffisante pour être datés. Au-dessus de couches limoneuses et argileuses constituant la base du glissement apparaissent des plans de cisaillement très nets selon lesquels se sont avancées des masses de sables d'Aachen dont la stratification est conservée (figure 6.5).

#### C. Coupe 3

Une troisième coupe non dessinée a été excavée, toujours à l'extrémité du glissement de terrain. A 1,80 m de profondeur est apparue, sous les argiles glissées, une masse tourbeuse contenant des débris de bois qui étaient à la surface du sol avant l'arrivée du glissement de terrain.

### 6.1.2. Les coupes dans le glissement de terrain n°10 (Sérezé)

#### A. Coupe 1

Le dessin de la coupe est donné sur la figure 6.6.

Interprétation: cette coupe a également mis à jour le sol originel sous le glissement de terrain et a montré l'existence de plusieurs plans de cisaillement dans une masse de matériaux glissés s'étant déplacée probablement comme un tout mais ayant subi des réactivations partielles par la suite. Du charbon de bois a pu être recueilli pour datation à différents niveaux, et notamment dans le sol originel.

#### B. Coupe 2

Une seconde coupe a été effectuée à quelques dizaines de mètres au sud de la précédente, à l'endroit où un petit vallon incise le pied du glissement. Beaucoup plus petite, elle a consisté en un simple trou qui a recoupé à 2.4 m de profondeur un sol ancien où on retrouve encore de façon remarquablement fraîche la couverture herbeuse couchée et laminée par la masse d'un petit glissement récent qui a remobilisé quelques dizaines de  $\text{m}^3$  de matériaux dans le creux du vallon.

## **6.2. Reconnaissance géophysique**

Le glissement de Sérezé (n° 10) a fait l'objet d'une reconnaissance géophysique afin de déterminer sa structure et notamment de préciser la profondeur de sa surface basale. Cette étude a été réalisée par le Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique de l'Université de Liège. Elle a consisté en une tomographie électrique de 315 m de long suivant la pente du glissement, de trois sondages électriques et de 2 sondages en sismique réfraction.

Les diverses techniques mises en œuvre convergent pour fournir les résultats principaux suivants (figure 6.10):

- les limites des différentes assises géologiques en présence (bedrock houiller, formation argileuse de Vaals, argiles à silex et limons de pente superficiels) ont été clairement identifiées dans la zone non perturbée à l'amont du glissement.. Seuls les sables d'Aachen ne peuvent être individualisés au niveau de la tomographie. Les épaisseurs de ces assises sont ainsi précisées.
- La structure du glissement a aussi été reconnue. Elle est marquée dans la partie supérieure par deux blocs principaux qui ont subi un mouvement de rotation et dont la base descend à environ 25 m de profondeur. Dans la moitié inférieure du glissement, on identifie une masse épaisse de près de 10 m qui semble s'être déplacée en planche.

## **6.3. Calcul de stabilité**



Réalisés au sein du même laboratoire, les calculs de stabilité appliqués à la pente du glissement de Sérezé ont montré qu'en conditions normales (notamment de nappe), seules certaines lignes de glissement sont critiques et présentent un facteur de sécurité  $\leq 1$  dans les conditions topographiques actuelles du glissement (figure 6.11). Toutefois, les lignes les plus proches de la surface basale du glissement originel présentent un facteur de sécurité proche de 1.5. Par contre, l'adjonction d'une accélération verticale et horizontale de 0.1 g (pour simuler un séisme) aux calculs amène l'ensemble des lignes de glissement modélisées dans le domaine d'instabilité, quelle que soit la position de la nappe phréatique que l'on considère.

## 7. Les datations au $^{14}\text{C}$

Huit échantillons de matière organique ont été récoltés dans les diverses coupes réalisées afin de fournir des datations radiométriques ( $\text{C}^{14}$ ) des différents événements enregistrés par les séquences sédimentaires étudiées. Le tableau ci-dessous résume l'origine des échantillons et les dates qu'ils ont fournies.

| Echantillon | Lieu de prélèvement                                                                                | Intervalle à 95%        |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 134713      | <u>Sérezé</u> , coupe 1: sol non dérangé sous le glissement (x = [3-5.5])                          | 190 BC - 390 AD         |
| 134712      | <u>Sérezé</u> , coupe 1: sol repoussé sous le glissement (x = 9.5-10.2])                           | 75-430 AD               |
| 134711      | <u>Sérezé</u> , coupe 1: niveau gris à charbon de bois dans le glissement (x = [10-10.8], y = 3.4) | 1205-1405 AD            |
| 134714      | <u>Sérezé</u> , coupe 2: base de la fouille (et d'une masse glissée secondaire)                    | 1040-1290 AD            |
| 134715      | <u>Croix Polinard</u> , coupe 1: sol non dérangé sous le glissement (x = 11.8)                     | 645-900 AD              |
| 134716      | <u>Croix Polinard</u> , coupe 1: sol repoussé sous le glissement (x = [8.8-9.6])                   | 600-775 AD              |
| 134717      | <u>Croix Polinard</u> , coupe 1: sol repoussé sous le glissement (x = 6.6)                         | 55 BC - 225 AD          |
| 134718      | <u>Croix Polinard</u> , coupe 3: base de la fouille (et du glissement)                             | 265-290 AD + 325-540 AD |

L'ensemble des données chronologiques récoltées à Sérezé et à la Croix Polinard permet d'y reconnaître quatre événements de glissement. Le plus ancien est aussi le seul qui soit observé dans les deux glissements étudiés; il survient aux alentours de 100 AD. Ensuite, une première reprise du glissement de la Croix Polinard est notée vers 400 AD, et une seconde vers 700 AD. Enfin, à Sérezé, une loupe de glissement secondaire est datée d'environ 1250 AD. Cependant, alors que les diverses réactivations des glissements sont datées sans équivoque, les âges les plus anciens obtenus sur les deux sites ne résolvent pas la question fondamentale de l'âge du déclenchement originel des glissements. En effet, même si les échantillons qui les ont fournis sont ceux qui se situent le plus loin vers l'amont sous les glissements, les coupes exposées ne reprennent que la partie distale des masses glissées. Plusieurs éléments suggèrent toutefois que l'âge de ~100 AD pourrait correspondre à l'époque du premier déclenchement, de nature catastrophique, des glissements de Sérezé et de la Croix Polinard.

Par ailleurs, certaines phases de mouvement (spécialement celle datée du 13<sup>e</sup> siècle) coïncident avec des périodes pour lesquelles les conditions climatiques sont supposées favorables aux glissements en Angleterre ou, plus généralement, en Europe.

## **8. Mécanisme et causes des glissements de terrain**

### **8.1. Le mécanisme des glissements**

L'analyse morphologique révèle la présence quasi-systématique dans les grands glissements d'un escarpement de départ important et de plusieurs rides allongées parallèlement au versant dans la moitié supérieure de la masse glissée. Ceci témoigne du développement de glissements rotationnels multiples. Par ailleurs, la zone d'accumulation aval est généralement fort allongée et atteste clairement que les glissements considérés sont de nature composite. L'étude géophysique menée à Sérezé confirme pleinement ces indications. Les fouilles effectuées à hauteur du talus terminal des glissements de Sérezé et de la Croix Polinard ont mis en évidence l'existence de plans de cisaillement importants. Les masses de matériaux qu'ils séparent ont très souvent conservé intacte leur structure interne, confortant l'interprétation qui voit en la partie aval des glissements le résultat d'un glissement translationnel de blocs cohérents. On constate aussi que les escarpements de départ de tous les glissements répertoriés dans la zone de Battice sont situés en des endroits où affleurent les argiles glauconifères de la formation de Vaals, ou à la limite d'affleurement de la formation crayeuse de Gulpen. Toutefois, dans tous les cas, la formation sableuse d'Aachen se situe approximativement à hauteur de la semelle des glissements.

Ceci nous incite à voir dans la liquéfaction des sables d'Aachen le facteur décisif du déclenchement originel des grands glissements de terrain. Pour expliquer les mouvements de masse observés, le mécanisme suivant est proposé: pour une cause à préciser, des niveaux sableux de la formation d'Aachen sont subitement liquéfiés, enlevant momentanément tout support aux formations surincombantes, spécialement en pied de versant où affleure la formation d'Aachen. Ceci déclenche d'abord un glissement translationnel de blocs cohérents de la formation de Vaals dans la partie basse et en pente relativement faible du versant, lequel mouvement engendre à son tour par évolution rétrogressive les mouvements rotationnels de plusieurs blocs appartenant à la partie haute, en pente plus forte, du versant, où se forme alors l'escarpement raide observé dans la plupart des cas (figure 6.10). Ce mécanisme impliquerait donc que l'ensemble des formes majeures constituant les glissements seraient apparues simultanément à l'occasion d'un événement de nature catastrophique. Par la suite, des réactivations d'ampleur limitée de ces glissements ont pu avoir lieu. La nature des réactivations locales est forcément différente de celle des glissements originels. Elles résultent en effet maintenant en premier lieu de l'existence de plans de faiblesse dans la masse glissée.

### **8.2. Les facteurs déterminants du glissement**

Parmi les facteurs locaux déterminant l'apparition des glissements de terrain, nous envisageons la lithologie (nature, épaisseur, pendage) des formations affleurantes et la pente des versants affectés.

La répartition des formes et le mécanisme proposé montrent que la combinaison lithologique nécessaire à l'apparition de glissements de terrain est constituée de la superposition des sables d'Aachen et des argiles marneuses de Vaals. En effet, les caractéristiques géotechniques de l'un et l'autre matériau sont très défavorables. Par ailleurs, curieusement, la zone de la crête de Battice affectée par les glissements de terrain est aussi celle où la formation crayeuse de Gulpen fait défaut. Le pendage des couches crétacées dans le Pays de Herve, quoiqu'il ne soit pas déterminant, a certainement aussi favorisé l'apparition de la majorité des glissements recensés. De façon générale, ce pendage présente une valeur de  $\sim 1.5\%$  vers le NNO, qui correspond effectivement à une zone d'orientation préférentielle des zones d'arrachement des glissements répertoriés.

Enfin, du point de vue topographique, on peut considérer que la pente des versants a joué un rôle dans la localisation et le déclenchement des glissements de terrain. L'inclinaison des pentes affectées par ceux-ci reste toutefois toujours fort modérée, comprise entre  $4$  et  $9.5^\circ$ , quoique, assez localement, la zone d'étude présente des pentes dépassant  $12^\circ$ .

### **8.3. La cause première des glissements**

La recherche de la cause première des grands glissements de terrain du Pays de Herve est rendue fort délicate par une autre observation relative à leur répartition: presque tous les glissements répertoriés se concentrent dans une aire d'environ  $4 \times 5$  km dans et à proximité immédiate du graben

de La Minerie, une structure géologique active (figure 3.1). Cette proximité des glissements et de failles actives va de pair avec le fait qu'apparemment, à l'est de Clermont où plus aucun mouvement de masse n'est repéré, les conditions topographiques ne changent pas particulièrement. Du point de vue lithologique par ailleurs, la formation de Vaals continue à présenter une prédominance du faciès argileux au moins jusqu'au cimetière militaire d'Henri-Chapelle vers le nord. Seule l'apparition des craies de la formation de Gulpen en sommet de crête marque un changement d'ordre lithologique à partir de Clermont. L'alternative à trancher est donc la suivante: doit-on attribuer une origine climatique ou sismique aux glissements de terrain du Pays de Herve?

La question ne se pose évidemment que pour le déclenchement originel des grands glissements. Pour les réactivations mineures ultérieures, une origine climatique liée à des épisodes de très fortes précipitations ne fait le plus souvent aucun doute.

Pour l'ensemble des grands glissements de terrain par contre, l'analyse proposée du mécanisme et les datations disponibles suggèrent qu'ils résultent d'un événement catastrophique, éventuellement unique (en 100 AD?). Il est bien entendu qu'un événement climatique exceptionnel pourrait être responsable de ces glissements. Sur ce plan, plusieurs études concernant des glissements de terrain en Europe suggèrent que la période 2500-2000 BP fut éminemment favorable à leur développement du fait d'une nette dégradation climatique. Cependant, la signification réelle de cette phase reste incertaine. Mais, pour admettre une origine purement climatique des glissements étudiés, il faut surtout comprendre les caractéristiques de leur répartition spatiale. La limite orientale de la zone des glissements est notamment difficilement justifiable par le contexte géologique et topographique. Ceci nous pousse en conséquence à examiner les particularités des glissements susceptibles de leur faire attribuer une origine sismique. Parmi celles-ci, on retiendra (i) leur répartition centrée sur le graben actif de La Minerie, (ii) la liquéfaction des sables d'Aachen à l'origine de la mise en mouvement, (iii) l'ampleur disproportionnée des grandes formes de glissement en comparaison des réactivations induites par des épisodes pluvieux exceptionnels, (iv) la position des escarpements de départ dans la partie haute de versants de pente modérée, (v) le type et les dimensions des glissements et (vi) l'existence d'un petit escarpement de faille à proximité immédiate du glissement de Sérezé. De plus, les indications données par les calculs de stabilité et les datations  $^{14}\text{C}$  peuvent s'accorder à l'hypothèse sismique.

Quoique ne constituant bien sûr en aucun cas une preuve, les arguments en faveur de cette hypothèse sont assez nombreux pour qu'elle mérite d'être considérée avec attention et qu'un document évaluant le risque de glissement de terrain dans la région en tienne compte. Tant le type des glissements observés que l'extension de leur aire de répartition (environ 20 km<sup>2</sup>) et que la distance maximale d'environ 2 km entre le glissement le plus éloigné et la zone de rupture du séisme (par hypothèse, la faille d'Ostende à hauteur de Thimister-Sérezé) convergent parfaitement vers une magnitude  $M_s$  d'environ 4.8 - 5.0 pour le séisme responsable. Une secousse de cette ampleur paraît tout à fait acceptable pour la zone faillée de Hockai.

NB. Dans l'état actuel de la question, A. Demoulin et A. Pissart privilégient la thèse de l'origine sismique des glissements, mais E. Poty, J.M. Marion et L. Barchy pensent que les observations disponibles ne permettent pas de choisir entre les hypothèses climatique et sismique.

## **9. Activité actuelle des glissements de terrain**

### **9.1. Le glissement de Manaihan**

Le glissement de terrain n° 14, à Manaihan, a connu depuis septembre 1998 une série d'épisodes de mouvement fort importants. Ce sont les pluies exceptionnelles des 14 et 15 septembre 1998 qui ont déclenché cette période d'intense activité du glissement. Elles ont occasionné le développement d'escarpements vifs de près de 1 m de haut en tête du glissement ainsi qu'au sein des masses glissées. Peu de temps après, une station Distrigaz a dû être fermée à hauteur de l'escarpement de départ (01.11.98) et l'égout industriel traversant le glissement s'est cassé en deux endroits (avec déplacement de 1 à 2 m), causant des effondrements en surface (03.99). Les témoignages recueillis ont toutefois permis d'apprendre que les terrains ne sont pas stables et que le relief du sol se modifie depuis environ 20 ans.

Un suivi des mouvements par GPS a commencé en mars 1999, les dernières mesures datant de mars 2000. Les données recueillies montrent qu'au printemps 1999, la zone surveillée du glissement a subi un déplacement horizontal de près de 20 cm tandis que le bloc affaissé en tête de glissement en septembre 1998 descendait encore d'environ 10 cm (figure 9.4). Puis, les mouvements ont tout à fait cessé durant la bonne saison 1999 pour reprendre avec une ampleur un peu moins grande au cours de l'hiver 1999-2000 (10 cm de déplacement horizontal et 6 cm d'affaissement en tête de glissement).

Une autre évaluation des mouvements subis par le site a été effectuée en comparant le relief du glissement en 1953 et 1999. Pour la situation de 1953, un modèle numérique de terrain a été constitué par stéréophotogrammétrie à partir de photos aériennes au 1/15000. Pour 1999, le modèle numérique de terrain résulte d'un levé GPS en mode cinématique. La comparaison des deux états a montré qu'en 50 ans, dans la partie centrale du glissement, les différents bourrelets qui marquent la topographie de la masse glissée se sont déplacés de 5 à 7 m vers l'aval (figures 9.6 et 9.7).

Quant aux causes des mouvements actuels à Manaihan, la comparaison des épisodes de déplacements récents avec les précipitations journalières à Thimister démontre que ce sont les très fortes pluies qui sont tombées à plusieurs reprises depuis septembre 1998 qui sont directement responsables des mouvements. On notera toutefois que la précipitation de 126 mm tombée en moins de 24 h durant la nuit du 14 au 15 septembre 1998 a une période de retour supérieure à 100 ans. Par ailleurs, la réactivation du glissement depuis 1980 pourrait bien être liée aux diverses recharges que l'on a effectuées périodiquement en tête du glissement depuis cette époque.

## **9.2. Les autres glissements**

Des mouvements récents de moindre ampleur ont également été observés dans les glissements de la Croix Polinard (n° 3) ainsi que très localement dans celui de Sérezé (n° 10). On rappellera aussi que le glissement n° 9 fut remis en mouvement lors de la construction de l'autoroute à la fin des années '60.

Par ailleurs, la carte de Ferraris (18<sup>e</sup> siècle) montre que pratiquement aucun bâtiment de l'époque n'était localisé sur les glissements cartographiés. Seuls trois bâtiments étaient installés, et existent toujours, apparemment sans dommage, sur le glissement de Borbou (n° 6).

# **10 Cartographie du risque de glissement de terrain**

## **10.1. Risque de remise en mouvement des glissements de terrain: inventaire**

Etant donné l'accord unanime des auteurs sur le risque accru de remise en mouvement du sol aux endroits où un glissement de terrain existe déjà, l'examen individuel de chaque glissement identifié est effectué et le danger potentiel y est estimé. On en arrive à la conclusion que l'ensemble des glissements répertoriés, à l'exception des n° 7, 15, 16 et 17, présentent un risque très élevé de remise en mouvement.

## **10.2. Prédiction de glissements futurs**

Afin de préciser le risque de glissement de terrain dans l'ensemble de la zone étudiée du Pays de Herve, une cartographie prédictive a été réalisée sur base d'une analyse probabiliste. Cette analyse a été réalisée au *Spatial Data Analysis Laboratory* du *Geological Survey of Canada*, par le Dr C.J. Chung. Les paramètres pris en compte pour déterminer les zones de risque sont les suivants: lithologie, valeur et orientation de pente, proximité du réseau hydrographique et altitude. La base de données inclut aussi les zones d'arrachement des grands glissements de terrain répertoriés, dont on mesure la distribution géographique vis-à-vis des différentes classes établies pour chaque paramètre envisagé. L'établissement de probabilités conditionnelles conjointes, qui donnent en quelque sorte l'importance du risque en chaque point suivant la combinaison de paramètres qui le caractérise, permet de classer en fonction du degré de risque les pixels (de dimensions 30 x 30 m) constituant la carte (figure 10.2). On ne définit donc pas la grandeur absolue (la probabilité) du risque de glissement, on prédit plutôt que tel pixel sera plus probablement affecté par un futur glissement de terrain que tel autre. Après validation croisée, la courbe de prédiction du document ainsi obtenu est extrêmement favorable: statistiquement, sur base des paramètres environnementaux considérés, le prochain glissement de terrain susceptible de se déclencher dans le Pays de Herve a 100% de chances

d'apparaître dans les 4% de pixels classés comme les plus dangereux (figure 10.2). Ceci est vrai quelle qu'en serait la cause, ou la conjonction de causes, naturelles et anthropiques. On indique donc bien sur ce document les zones où les modifications que l'homme pourrait apporter aux conditions naturelles seraient les plus dommageables pour la stabilité des versants.

### 10.3. Zonation du risque de glissement de terrain

Tenant compte à la fois de la carte de prédiction du risque de glissement de terrain dans le Pays de Herve proposée ci-dessus et du fait que les zones des glissements déjà existants sont beaucoup plus sensibles à de nouveaux mouvements de masse, nous proposons donc une zonation reconnaissant cinq classes de risque:

- **zone A (risque très élevé):** zones affectées par les glissements anciens profonds et de grandes dimensions (tous les glissements répertoriés dans cette étude sauf les n° 7, 15, 16 et 17), actuellement en mouvement ou susceptibles d'être remis en marche assez aisément. On reprend ici non seulement la zone d'arrachement mais également la zone d'accumulation de ces glissements.
- **zone B (risque élevé):** zones reprenant les pixels de valeur 98.5 à 99.5% sur la carte de la figure 10.2, représentant le 1.5% de la zone d'étude où le risque de nouveau glissement est le plus élevé en fonction des paramètres lithologiques, topographiques et hydrologiques. La courbe de prédiction de la figure 10.3 montre qu'il y a 50% de chances pour que le prochain glissement de terrain dans le Pays de Herve apparaisse dans cette zone. On reprendra en outre dans la zone B les glissements répertoriés n° 7 et 16.
- **zone C (risque moyen):** zones reprenant les pixels de valeur 95 à 98% sur la carte de la figure 10.2, représentant les 3.5% suivants les plus risquants de la zone d'étude. Sont également repris dans la zone C les glissements répertoriés n° 15 et 17. La probabilité est de 100% que le prochain glissement de terrain survienne dans la zone C ou dans une zone de risque plus élevé (sur base des paramètres considérés).
- **zone D (frange d'accumulation):** il est essentiel de se souvenir que les pixels retenus dans les zones B et C le sont en tant que partie de la zone d'arrachement d'un glissement potentiel. Si celui-ci se déclenche effectivement, une zone d'accumulation sera également touchée à l'aval de la zone de départ. Cet élément doit donc aussi apparaître dans la carte de zonation du risque. Puisque l'ensemble des classes B et C constitue l'aire dans laquelle la probabilité est de 100% que le prochain glissement survienne, une seule zone d'accumulation sera définie. La limite de cette zone d'accumulation a été placée à une distance de 200 m à l'aval de la limite de la zone de risque C.
- **zone E (risque faible ou nul):** le reste de la zone d'étude, soit environ 95% du territoire considéré.

## 11. Mesures de prévention

### 11.1. Considérations générales

Des interventions humaines inappropriées peuvent quelquefois déclencher des glissements de terrain. Le danger est très sérieux pour les glissements anciens dont la stabilité est toujours précaire. Il convient de veiller en conséquence dans tout aménagement de la zone (i) à ne pas diminuer la résistance du sol au cisaillement, c'est-à-dire principalement à ne pas laisser s'infiltrer de l'eau en profondeur et (ii) à ne pas accroître l'effort de cisaillement en modifiant le profil des versants, comme cela se produit par accumulation de remblais à la partie supérieure d'un glissement.

#### 11.1.1. La maîtrise de l'eau

Les glissements de terrain se déclenchent toujours parce que de l'eau s'infiltré dans le sol et favorise le mouvement des terres. Pour stabiliser des glissements anciens ou prévenir l'apparition de nouveaux glissements, la première action à accomplir est donc de limiter l'infiltration de l'eau dans le sol, en veillant principalement:

- à favoriser l'écoulement des eaux de pluie, c'est-à-dire principalement en les rassemblant et les évacuant en dehors de la zone dangereuse
- à collecter et évacuer les eaux usées (les puits perdants doivent être interdits)
- à conserver étanche le réseau d'égouttage
- à surveiller le réseau d'alimentation en eau.

Il est aussi possible de collecter les eaux qui s'infiltreront dans le sol. Les interventions à ce niveau sont cependant toujours coûteuses et nécessitent des terrassements importants. La technique la plus simple (dont le résultat n'est toutefois pas garanti) consiste en l'installation de drains profonds de 3 à 5 m dirigés selon la ligne de plus grande pente. Ces drains doivent être espacés de moins de 20 m. Les interventions à plus grande profondeur pour assécher la surface de glissement elle-même nécessitent des moyens beaucoup plus importants puisqu'il s'agit de creuser des galeries, des puits et de réaliser des sondages, ... De tels travaux ne se justifient que dans des cas exceptionnels.

#### 11.1.2. Les modifications de profil du terrain

Un remblaiement ou une excavation réalisés dans une zone affectée par des glissements de terrain peuvent être extrêmement dangereux ou au contraire accroître la stabilité selon l'emplacement où ils se situent. Il convient de ne permettre aucun remblaiement à la partie supérieure des glissements de terrain car la masse ajoutée va accroître l'effort de cisaillement et contribuer à la remise en marche du glissement. De la même manière, une excavation à la partie inférieure, qui décharge le pied du glissement servant de butée à la masse susceptible de se déplacer, est à proscrire.

Toute modification du profil d'un versant reconnu comme dangereux doit, en conséquence, être examinée avant toute réalisation quant aux effets qu'elle pourra avoir sur la stabilité du versant.

#### 11.1.3. Tremblements de terre et mesures de prévention

Notre recherche a montré que ce sont peut-être des tremblements de terre qui ont déclenché les glissements de terrain. De tels événements sont heureusement extrêmement rares. Il est quasi impossible de se prémunir contre l'apparition de glissements de terrain déterminés par des secousses sismiques. La seule mesure susceptible d'avoir des résultats serait le drainage de la formation de base du Crétacé (les sables d'Aachen). L'importance des travaux qu'il faudrait accomplir pour y parvenir rend cette intervention impensable. Toutefois les recommandations données précédemment concernant la maîtrise de l'eau et les modifications de profil du terrain, sont très favorables à la stabilité, même en cas de secousses sismiques.

### **11.2. Recommandations applicables aux zones de risque définies dans le Pays de Herve**

#### 11.2.1. Zones de classe A (figurées en rouge)

Nous recommandons que toute zone de classe A, déjà affectée d'un glissement ancien de grande ampleur et à surface basale profonde, soit dorénavant **totalemt inconstructible**. Cela vaut tant pour toute habitation familiale nouvelle que pour toute autre construction, y compris l'enfouissement de conduites de toute nature, l'édification de pylones, ... Des permis de bâtir ne devraient plus être délivrés pour la construction d'annexes (en ce compris les annexes agricoles) aux bâtiments existant actuellement dans ces zones. L'expérience quadruplement malheureuse de Manaihan (dommages à des biens privés, rupture de l'égout industriel de l'AIDE, fermeture de la station Distrigaz, problèmes de conduites à partir du château d'eau de la SWDE) devrait suffire à persuader de la nécessité de ces mesures.

#### 11.2.2. Zones de classe B (figurées en orange), C (figurées en jaune) et D (figurées en hachuré orange et jaune)

Les aires reprises en classe B sont celles qui, actuellement dépourvues de trace de glissement ancien, présentent, d'après la carte de prédiction, le plus haut risque d'être affectées par un futur glissement de terrain. Concrètement, cela signifie qu'elles réunissent les conditions lithologiques, topographiques et hydrologiques les plus semblables à celles des zones où d'anciens glissements ont

déjà eu lieu, et qu'une intervention humaine même mineure est susceptible de déstabiliser les versants concernés.

Les zones appartenant à la classe C présentent un risque de glissement de terrain qui, pour être moins grand qu'en classe B, n'en reste pas moins significatif. La différence réside probablement surtout dans l'ampleur plus limitée des glissements qui pourraient s'y développer. Pour ce qui concerne les précautions à recommander vis-à-vis des modifications au profil de versant, la situation est ici plus complexe. Dans ces zones, la décharge des terrains devrait en effet être autant évitée que leur recharge car, si elles sont identifiées comme zones de départ potentiel d'un glissement, elles constituent aussi le soutien naturel des pentes encore plus dangereuses de la classe B, situées plus haut sur le versant.

Quant aux zones de classe D (frange d'accumulation), elles correspondent fréquemment à une aire d'affleurement des sables d'Aachen, dont la liquéfaction est très probablement le facteur déclenchant des glissements dans les marnes et smectites de la formation de Vaals sus-jacente. Il convient donc d'y rester spécialement attentif à une gestion rigoureuse des eaux de surface.

Malgré les risques élevés, on ne peut interdire la construction dans les zones de classe B, C et D. Toutefois, toute demande de permis de bâtir et/ou de modification du relief devrait faire l'objet d'une étude géotechnique précisant les précautions et les mesures à prendre pour assurer la stabilité des constructions et les contraintes à respecter pour éviter toute influence sur la stabilité des zones voisines. Cette étude géotechnique veillera ainsi à satisfaire l'ensemble des précautions présentées dans la section 1 ci-dessus ("considérations générales") relativement à la maîtrise des eaux et au profil de versant.

Il serait par ailleurs souhaitable, afin de minimiser les modifications des conditions naturelles, que la densité de l'habitat soit limitée dans ces zones et que, par exemple, elle n'y dépasse pas 5 maisons/ha.

Il conviendrait également de porter à la connaissance de tout candidat propriétaire le risque important de glissement de terrain auquel il pourrait avoir à faire face.

En cas d'égouttage individuel, les puits perdants seront totalement proscrits, les eaux épurées et les eaux pluviales devant impérativement être collectées et évacuées à l'aval de la zone dangereuse. Du point de vue géologique, dans le contexte des crêtes du Pays de Herve, il serait même souhaitable que ces eaux n'aient pas l'occasion de s'infiltrer dans les sables d'Aachen qui affleurent le plus souvent en pied de versant et ne sont néanmoins pas toujours englobés dans les zones de classe B, C ou D.

Les conduites d'adduction d'eau seront spécialement conçues pour rester étanches même en cas de mouvement léger du sol.

#### 11.2.3. Zones de classe E (aucun figuré)

Aucune restriction liée au risque de glissement de terrain.

## **12. Conclusions**

L'étude des glissements de terrain du Pays de Herve a montré que les formes de grande ampleur, pouvant engendrer des dégâts considérables, sont exclusivement localisées sur les flancs de la crête de Battice – Henri-Chapelle et d'une crête secondaire, là où la superposition "sables d'Aachen – argiles de Vaals" est à l'affleurement sur des pentes de 5 à 20%.

Les diverses observations et analyses effectuées nous ont amené à considérer comme possible une origine sismique des grands glissements de terrain, dont par contre les diverses réactivations seraient essentiellement liées à des épisodes de précipitations exceptionnelles. Toutefois, E. Poty, J.M. Marion et L. Barchy ne partagent l'avis de A. Demoulin et A. Pissart quant à la valeur des arguments qui étayaient la thèse sismique. Clairement, la question de l'origine des grands glissements reste donc ouverte, et il n'est pas opportun de la discuter plus avant ici puisqu'aussi bien ce point est fort académique et n'intéresse que médiocrement les mesures à prendre par la Région Wallonne relativement à l'aménagement du territoire dans les zones touchées par les glissements.

Le suivi des mouvements actuels et récents du glissement de Manaihan a pour sa part mis en lumière leur importance et a démontré qu'il est absolument nécessaire de circonscrire les zones du Pays de Herve affectées par le risque de mouvements de masse et d'assortir la définition de ces zones d'un certain nombre de mesures préventives. La définition des zones de risque a été réalisée au départ d'une carte de prédiction du risque réalisée en collaboration avec le Dr C.F. Chung du *Laboratory of Spatial Data Analysis* du *Geological Survey of Canada*. Le document retenu est basé sur l'estimation des probabilités conditionnelles conjointes liant le risque de glissement à la combinaison des paramètres suivants: lithologie, valeur et orientation des pentes, proximité du réseau hydrographique et altitude. **Cinq classes de risque ont été définies**, et des recommandations ont été formulées relativement à chacune d'entre elles. Ces recommandations peuvent paraître passablement sévères par rapport à la probabilité d'occurrence d'un grand glissement à moyen terme (par exemple 100 ans). Toutefois, la faible probabilité du risque est contrebalancée par l'importance des dégâts que ces glissements causeraient s'ils avaient lieu et par le fait que, précisément, les interventions humaines qui sont limitées par les prescriptions recommandées augmenteraient sensiblement cette probabilité. D'autre part, la procédure suivie pour l'élaboration de la carte de prédiction est tout à fait rigoureuse et objective, la seule limitation à la validité des résultats étant liée au choix des paramètres pris en compte. Néanmoins, le remarquable taux de prédiction obtenu est garant de la représentativité de ces paramètres.

Nous considérons qu'il est raisonnable d'être très restrictif dans les zones où la contrainte physique liée au risque de glissement de terrain est indubitable. Finalement, les zones potentiellement bâtissables concernées par les prescriptions et interdictions recommandées dans le Pays de Herve ne couvrent qu'une surface très minime.



## Table des matières

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>I. Introduction</b>                                                                | <b>1</b>   |
| <b>II. Quelques notions de base sur les glissements de terrain</b>                    | <b>3</b>   |
| 1. Types de glissements                                                               | 3          |
| 2. Les facteurs favorisant l'apparition de glissements de terrain                     | 3          |
| 3. Précipitations exceptionnelles ou tremblements de terre?                           | 6          |
| <b>III. Géologie et géotechnique</b>                                                  | <b>8</b>   |
| 1. Géologie                                                                           | 8          |
| 2. Propriétés géotechniques des différentes formations                                | 16         |
| <b>IV. Identification des glissements de terrain</b>                                  | <b>18</b>  |
| 1. Les documents consultés                                                            | 18         |
| 2. Description sommaire des glissements observés                                      | 18         |
| <b>V. Les caractéristiques extérieures des grands glissements de terrain observés</b> | <b>40</b>  |
| <b>VI. Les caractéristiques internes des glissements</b>                              | <b>43</b>  |
| 1. Les fouilles réalisées                                                             | 43         |
| 2. Reconnaissance géophysique                                                         | 52         |
| 3. Calculs de stabilité                                                               | 59         |
| <b>VII. Les datations au C<sup>14</sup></b>                                           | <b>69</b>  |
| <b>VIII. Mécanisme et causes des glissements de terrain</b>                           | <b>81</b>  |
| 1. Le mécanisme des glissements                                                       | 81         |
| 2. Les facteurs déterminants du glissement                                            | 82         |
| 3. La cause première des glissements                                                  | 83         |
| <b>IX. Activité actuelle des glissements de terrain</b>                               | <b>87</b>  |
| 1. Le glissement de terrain de Manaihan                                               | 87         |
| 2. Les autres glissements de terrain                                                  | 99         |
| 3. Conclusion                                                                         | 106        |
| <b>X. Prédiction et cartographie du risque de glissement de terrain</b>               | <b>108</b> |
| 1. Introduction                                                                       | 108        |
| 2. Risque de remise en mouvement des glissements anciens: inventaire                  | 108        |
| 3. Prédiction de futurs glissements de terrain dans le Pays de Herve                  | 110        |
| 4. Conclusion                                                                         | 120        |

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>XI. Mesures de prévention pour la réduction du risque de glissement de terrain</b> | <b>122</b> |
| 1. Considérations générales                                                           | 122        |
| 2. Mesures préconisées dans les zones de risques définies pour le Pays de Herve       | 125        |
| <b>XII. Conclusions</b>                                                               | <b>127</b> |
| <b>XIII. Bibliographie</b>                                                            | <b>128</b> |
| <b>XIV. Résumé non technique</b>                                                      | <b>130</b> |

---