DIRECTION REGIONALE
DE L'ENVIRONNEMENT
DE BASSE-NORMANDIE

OBSERVATOIRE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DU CALVADOS

-

COMMUNES DE CRICQUEBŒUF, VILLERVILLE ET BENERVILLE

-

Rapport de synthèse

Octobre 2005

Equipes impliquées :

Géographie Physique et Environnement (Géophen),
UMR CNRS 6554 / UCBN

Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C)
UMR CNRS 6143 / UCBN - Groupe de Recherche sur les Environnements Sédimentaires Aménagés et les Risques Côtiers

Groupe d'Etudes en Géosciences et Environnement Régional

OLA
150

5743

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION ____ *2*

2. LE RÉSEAU DE SURVEILLANCE ____ *3*

2.1. Mise en place du réseau de surveillance et suivi annuel ____ **3**

2.2. Répartition des tâches ____ **5**

2.3. Les données disponibles ____ **5**

3. LES RÉSULTATS POUR LE PAYS D'AUGE ____ *7*

3.1. Détection des mouvements à la nivelle à vis micrométrique ____ **7**

3.1. 1. Sur le site de Bénerville ____ 7

3.1. 2. Sur le site du Cirque des Graves à Villerville ____ 11

3.2. Variations piézométriques des nappes à Villerville et à Bénerville ____ **14**

3.3. Les déplacements de surface à Villerville et Cricqueboeuf ____ **18**

3.4. Evolution du pied de la falaise et du profil de plage ____ **21**

3.4. 1. Localisation des profils ____ 21

3.4. 2. Evolution des profils ____ 22

4. LES RÉSULTATS POUR LE BESSIN ____ *25*

4.1. Méthodologie ____ **25**

4.2. Limites de la méthode ____ **26**

4.3. Résultats obtenus ____ **27**

5. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES ____ *30*

6. BIBLIOGRAPHIE ____ *33*

Liste des photographies et des tableaux ____ *33*

Liste des figures ____ *34*

Annexe 1 : coordonnées et description des deux dernières bornes implantées à Bénerville ____ *35*

1. INTRODUCTION

Les falaises vives et versants littoraux du Calvados s'étendent sur un linéaire cumulé d'environ cinquante kilomètres entre Grandcamp-Maisy à l'Ouest et Honfleur à l'Est. Elles sont le siège de mouvements de terrain réguliers, relativement spectaculaires. La nature, l'ampleur, les conséquences économiques et la dangerosité de ces glissements sont extrêmement variées.

Ces mouvements de terrain sont liés d'une part, à des facteurs de prédisposition favorables, comme la nature géologique du sous-sol, constitué notamment de formations marneuses du Jurassique supérieur, et d'autre part, à des facteurs de déclenchement naturels (fortes et longues précipitations, érosion du pied de versant par la mer, etc.) ou anthropiques (changement d'occupation du sol, drainage peu ou pas adapté, rejet d'eau non maîtrisé, etc.). Ces mouvements de terrain se déclenchent ou se réactivent dans des situations bien particulières par conjonction, superposition de ces différents facteurs sur le long terme.

La Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) de Basse-Normandie a souhaité procéder à un suivi régulier et permanent des falaises et versants littoraux, seul moyen d'affiner la compréhension du fonctionnement de ces mouvements de terrain, en terme de nature des processus, rythme et valeurs des déplacements.

Les services de la DIREN ont fait appel au Groupe d'Etudes en Géosciences et Environnement Régional (GEGER) de l'Université de Caen - Basse-Normandie pour suivre l'évolution des secteurs de côte : (1) fortement urbanisés, à BENERVILLE, VILLERVILLE et CRICQUEBŒUF, sites sensibles, sujets à des mouvements de terrain. Les suivis engagés consistent à mesurer, plusieurs fois au cours d'une année et sur plusieurs années consécutives, les déplacements de repères implantés sur des terrains judicieusement sélectionnés. Parallèlement à ce suivi, l'évolution du profil de plage et du pied de la falaise d'une part et celle du niveau des nappes phréatiques d'autre part, seront surveillées par le biais de mesures topographiques et hydrogéologiques, (2) peu urbanisés des falaises du Bessin entre Grandcamp-Maisy et Arromanches, par simple surveillance par prise de photographies aériennes obliques.

Le GEGER s'est associé au Groupe de Recherche sur les Environnements Sédimentaires Aménagés et les Risques Côtiers (GRESARC) de l'Université de Caen - Basse-Normandie et à l'équipe "Risques Naturels" de l'Institut de Physique du Globe de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (IPGS) puis laboratoire GEOPHEN (Géographie Physique et Environnement, UMR 6554 CNRS depuis septembre 2004, afin de constituer un "Observatoire des Mouvements de terrain du Calvados" dont le rôle sera :

- d'évaluer le risque pour le futur,
- d'aider les responsables à la prise de décision,
- de définir plus précisément les seuils d'alerte sur le long terme,
- de faciliter le diagnostic de secteurs potentiellement instables,
- de contribuer à la mise à jour des documents ou plans d'urbanisme,
- d'adapter les méthodes d'investigation pour la prévision et la prévention,
- d'orienter les études approfondies pour la définition des systèmes de confortement ou pour les divers projets d'aménagement.

L'Observatoire est animé par une équipe de trois enseignants-chercheurs qui étudient la stabilité des falaises vives et versants littoraux du Calvados depuis 1984 :

- Patrick GIGOT, Maître de Conférences à l'Université de Caen, Ingénieur civil des Mines de Paris (géotechnique et géophysique) : responsable scientifique de l'Observatoire ;
- Olivier MAQUAIRE, Professeur à l'Université de Caen Basse-Normandie et chercheur au laboratoire GEOPHEN (Géographie Physique et Environnement, UMR 6554 CNRS) depuis septembre 2004, précédemment Maître de Conférences, Habilité à Diriger la Recherche à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (géomorphologie, géotechnique, topographie, risques naturels) : responsable technique de l'Observatoire ;
- Franck LEVOY, Professeur depuis septembre 2004 à l'Université de Caen Basse-Normandie, précédemment Maître de Conférences, Habilité à Diriger la Recherche, (géomorphologie, topographie, dynamique côtière) : responsable du GRESARC chargé d'une partie des interventions sur le terrain.

2. LE RESEAU DE SURVEILLANCE

2.1. Mise en place du réseau de surveillance et suivi annuel

La chronologie des différentes démarches effectuées et des interventions successives sur le terrain ayant abouti à la pose du réseau de surveillance actuel a été présentée dans un premier rapport remis en décembre 2002 intitulé « OBSERVATOIRE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN SUR LES COTES DU CALVADOS – Communes de Cricquebœuf, Villerville et Bénerville. Compte rendu de l'implantation du réseau de bornes et présentation des résultats des mesures de référence ».

Dans le Pays d'Auge sur les communes de Cricquebœuf, Villerville (Cirque des Graves et Fosses du Macre) et Bénerville, nous rappellerons simplement que cet observatoire comporte :

- un réseau de vingt bornes (huit à Villerville et douze à Bénerville) munies d'embase pour la détection des mouvements de surface par mesure d'inclinaison à la nivelle à vis micrométrique (mesures mensuelles) ;
- un réseau de vingt-deux bornes-repères pour la mesure des mouvements de surface par relevés topométriques au théodolite et distancemètre électro-optique (un à deux relevés par année) ;
- deux limnigraphes pour la mesure en continu des niveaux piézométriques dans deux forages : l'un situé à Bénerville et l'autre à l'amont du cirque des Graves à Villerville. Les données piézométriques ont été calées à l'aide de mesures mensuelles effectuées à la sonde manuelle ;
- deux profils de plage, l'un au droit des Fosses du Macre à Cricquebœuf et l'autre au droit du Cirque des Graves à Villerville.

Le réseau est complété par des données :

- *piézométriques* de deux puits implantés sur le plateau du Pays d'Auge et mesurés depuis 1974 par le BRGM (puits localisés à Danestal, référence : 0121-1X-0037 et à Beaumont, référence : 0121-2X-0089). Ces données sont disponibles en ligne sur la banque de données http://seine-normandie.brgm.fr ;
- *climatologiques* enregistrées à la station Météo France implantée à St Gatien des Bois, à savoir les pluies totales, les températures minimales, maximales et moyennes, et l'évapotranspiration potentielle Penmann pour calculer les pluies efficaces ;
- *topométriques, piézométriques et géomorphologiques* collectées par O. Maquaire depuis 1984 à Villerville-Cricqueboeuf.

Dans le Bessin, l'évolution des falaises est suivie grâce à une couverture photo-aérienne renouvelée à intervalles réguliers (fin hiver, début automne) chaque année (ce choix s'appuie sur des couvertures effectuées ponctuellement depuis une vingtaine d'années). Chaque mission aérienne est complétée, en cas de besoin, d'une mission d'observation sur le terrain. Les informations sont consignées sur plans (géoréférencement sur base de données sous Arcview 3.1.®) et fiches descriptives. Cette démarche permet la quantification des masses mises en mouvement (dans l'espace et dans le temps) et l'évaluation correspondante des risques.

Compte tenu de difficulté d'accès dans certaines propriétés et des possibilités d'y faire facilement les layonnages et élagages nécessaires à l'accès des points de mesures et d'observation, le programme de suivi initialement prévu a été légèrement modifié à Bénerville. Ainsi le relevé topométrique et la cartographie morphologique n'ont pu être réalisés et ont été remplacés par des quatre relevés topométriques des réseaux de Villerville et Cricqueboeuf.

Les différentes bornes de mesures en place en novembre 2002 et instruments de mesures du réseau de surveillance sont décrits dans le compte rendu de décembre 2002 de même que les résultats des premières mesures d'inclinaison des bornes (mesures de référence). Les coordonnées et les photographies des deux dernières bornes implantées en juillet 2003 dans la propriété de M. SADIA à Bénerville sont présentées en annexe n°1 de ce présent rapport.

2.2. Répartition des tâches

Au sein de l'observatoire, les différentes tâches ont été réparties de la manière suivante :

Le GRESARC (responsable F. Levoy) a assuré :

- la mise en place et la remise en état du réseau de mesures et sa description (bornes, installation des limnigraphes, etc…, *cf.* rapport de décembre 2002),
- le suivi mensuel (mesures des embases à la nivelle à vis micrométrique),
- le suivi régulier des limnigraphes et des profils de plage,
- les levés topométriques,
- le dépouillement et mise en forme graphique des données (embases de nivelle, limnigraphes, profils de plage, etc.),
- la rédaction du compte rendu de décembre 2002 et une participation à la rédaction du rapport de synthèse.

L'IPGS puis GEOPHEN (O. Maquaire) a assuré :

- les levés topométriques,
- le dépouillement des données topométriques,
- la mise en forme et la réalisation de documents graphiques synthétiques sur des données de déplacements de surface, climatiques, piézométriques, etc.
- le dépouillement des photographies aériennes des falaises du Bessin,
- la rédaction du rapport de synthèse.

Le GEGER (P. Gigot) a assuré :

- le suivi par photographies aériennes des falaises du Bessin.

2.3. Les données disponibles

Dans le cadre de cet observatoire, après la phase de démarche et d'intervention sur le terrain pour mettre en place le réseau, les données ont été acquises à compter du 9 juillet 2002. Le tableau ci-dessous synthétise la nature des données acquises (données ponctuelles ou en continu) et leurs dates d'acquisition, et celles disponibles par ailleurs.

Les résultats bruts obtenus dans le cadre de ce présent contrat (observatoire des mouvements de terrain) sont d'abord présentés. Ils sont ensuite replacés dans les longues séries de données disponibles et élaborées par O. Maquaire depuis 1984 (Maquaire, 1990 ; 1994 ; 1997 ; 2000 ; 2005) puis analysés en détail.

Les commentaires porteront donc sur les données d'une plus longue série chronologique, permettant de bien montrer le caractère indispensable d'un suivi « en continu » mené sur le long terme pour permettre de bien distinguer les différentes périodes favorables ou non à l'instabilité des versants littoraux, et distinguer des périodes d'alerte.

Type de données	Type de mesures	Lieu et dates ou périodes d'acquisition			
		Villerville	*Cricqueboeuf*	*Bénerville*	*Autres*
Piézométriques	*En continu (horaire)* Orphimèdes OTT	Depuis 19 déc. 2002		Depuis 07 janv. 2003	
	Mensuelle				***Danestal*** > janv. 1974
Profils de plage	*Ponctuelle*	9 janv 2003 23 avr.2003 8 oct. 2003	9 janv 2003 23 avr.2003 8 oct. 2003		
Topométriques	*Ponctuelle* (tachéométrie avec théodolite et distancemètre)	**20 relevés** entre 13 janv. 1985 et 29 mai 2001	**14 relevés** entre 20 nov. 1992 et 30 nov. 2001		
		07 juil. 2002 21 nov. 2002 23 avril 2003 21 nov. 2003 26 avril 2004 15 mars 2003	07 juil. 2002 21 nov. 2002 23 avril 2003 accès interdit 26 avril 2004 15 mars 2003		
Détection des mouvements de surface	*Ponctuelle/mensuelle* (nivelle à vis micrométrique)	22 nov. 2002 07 janv. 2003 10 fév. 2003 10 mars 2003 10 avril 2003 07 mai 2003 10 juin 2003 09 juil. 2003 25 juil 2003 04 sept. 2003 08 oct. 2003		22 nov. 2002 07 janv. 2003 10 fév. 2003 10 mars 2003 10 avril 2003 07 mai 2003 10 juin 2003 09 juil. 2003 25 juil 2003 04 sept. 2003 08 oct. 2003	
Climatiques	*Journalières* (précipitations, T°C moy.) *Décadaires* (précipitations, T°C moy., ETP Penmann, pluie efficace)				**St Gatien des Bois** > janv. 1974
Photographies aériennes	*Séries ponctuelles* Photographies obliques *diapositives*				***Bessin*** 8 séries entre 1984 et 2002
	numériques				5 mai 2003 18 sept. 2004

tableau 1 : types de données acquises, types de mesures, lieux et dates ou périodes d'acquisition dans le Pays d'Auge et le Bessin

3. LES RESULTATS POUR LE PAYS D'AUGE

3.1. Détection des mouvements à la nivelle à vis micrométrique

3.1. 1. Sur le site de Bénerville

Les bornes implantées sur le site de Bénerville (bornes A à L) sont localisées sur l'orthophotoplan du Calvados, en figure 1 page 8.

Les résultats des mesures d'inclinaison des bornes implantées à Bénerville sont présentées sur les figures 2 et 3 des pages 9 et 10. Les douze graphiques montrent l'évolution de l'inclinaison de ces bornes (en radians) en fonction du temps.

Commentaire : les variations de l'inclinaison de l'embase par rapport à l'horizontale indiquent :

- pour dix bornes, les valeurs d'inclinaison sont contenues dans une fourchette de $+/- 20 \times 10^{-4}$ radian. Aucune tendance significative ne peut être mise en évidence. Une très légère augmentation de l'inclinaison de certaines bornes peut toutefois être observée à compter de juillet 2003 ;
- par contre, les variations enregistrées sur la borne E (localisée sur la ligne amont proche des bornes I et C « stables ») et sur la borne G (localisée sur la ligne à l'aval immédiat du CD. 513 et proche de la borne K « stable ») sont plus surprenantes. Si les variations sont non-significatives jusqu'au 10 juin, à compter du 9 juillet et jusqu'au 4 septembre 2003, ces variations atteignent près de $+30 \times 10^{-4}$ en E et de -40×10^{-4} radian en G pour ensuite se stabiliser entre les deux dernières mesures des 4 septembre et 8 octobre 2003.

Il faut ainsi poursuivre les mesures pour savoir s'il s'agit de la détection d'un véritable mouvement du sol naturel ou bien s'il s'agit d'un problème plus localisé lié à l'état des bornes (ainsi, il faudra d'abord vérifier qu'aucune dégradation significative n'affecte ces bornes).

figure 1 : plan de localisation des bornes et du limnigraphe (LIM1) implantés sur le site de Bénerville

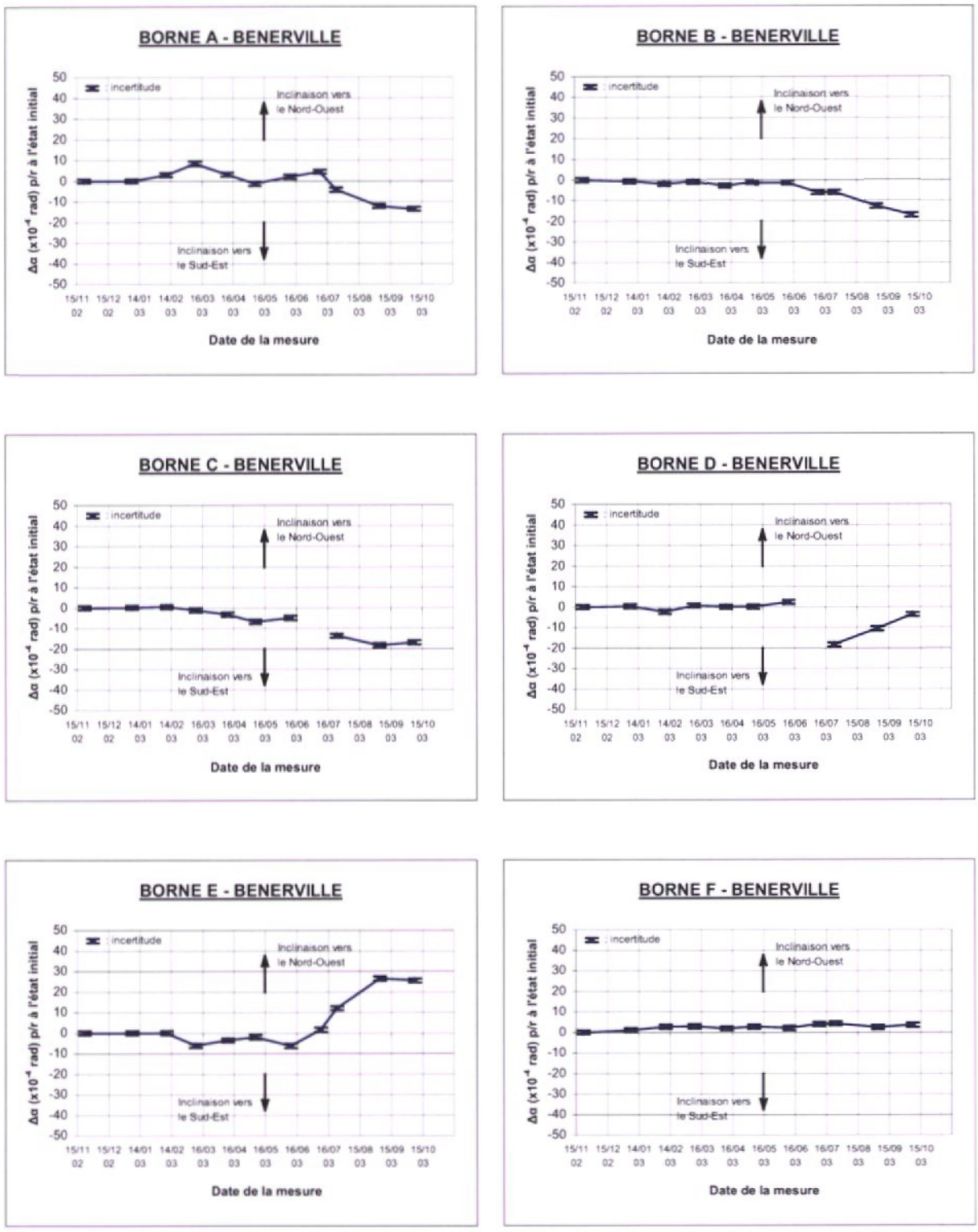

figure 2 : variation de l'inclinaison des bornes A à F de Bénerville, entre novembre 2002 et octobre 2003

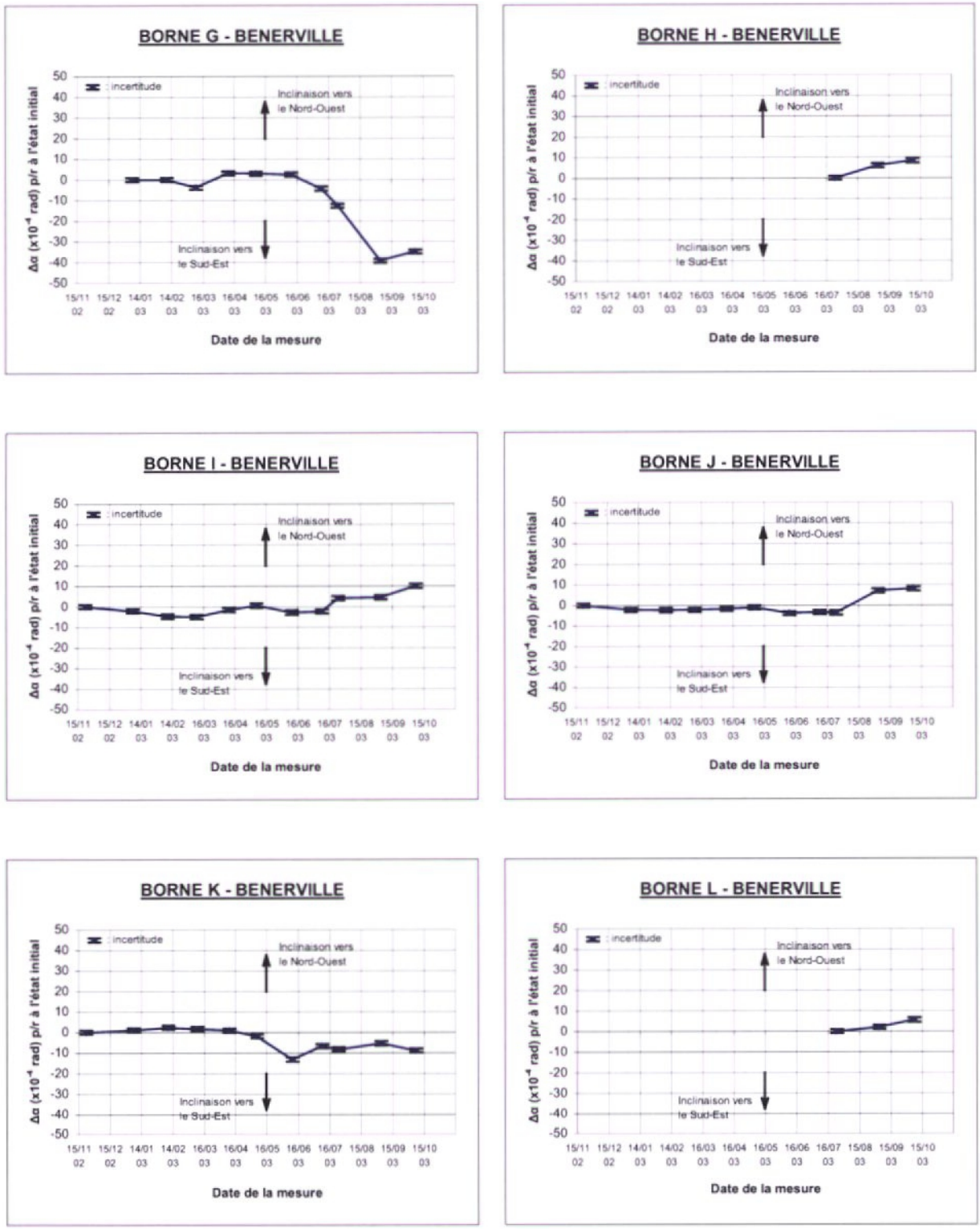

figure 3 : variation de l'inclinaison des bornes G à L de Bénerville, entre novembre 2002 et octobre 2003

3.1. 2. Sur le site du Cirque des Graves à Villerville

Les bornes implantées sur le site de Villerville dans le Cirque des Graves sont localisées sur la figure 6 page 13. Les résultats des mesures d'inclinaison de ces bornes sont présentés sur les figures 4 et 5 ci-après (évolution de l'inclinaison de ces bornes en fonction du temps).

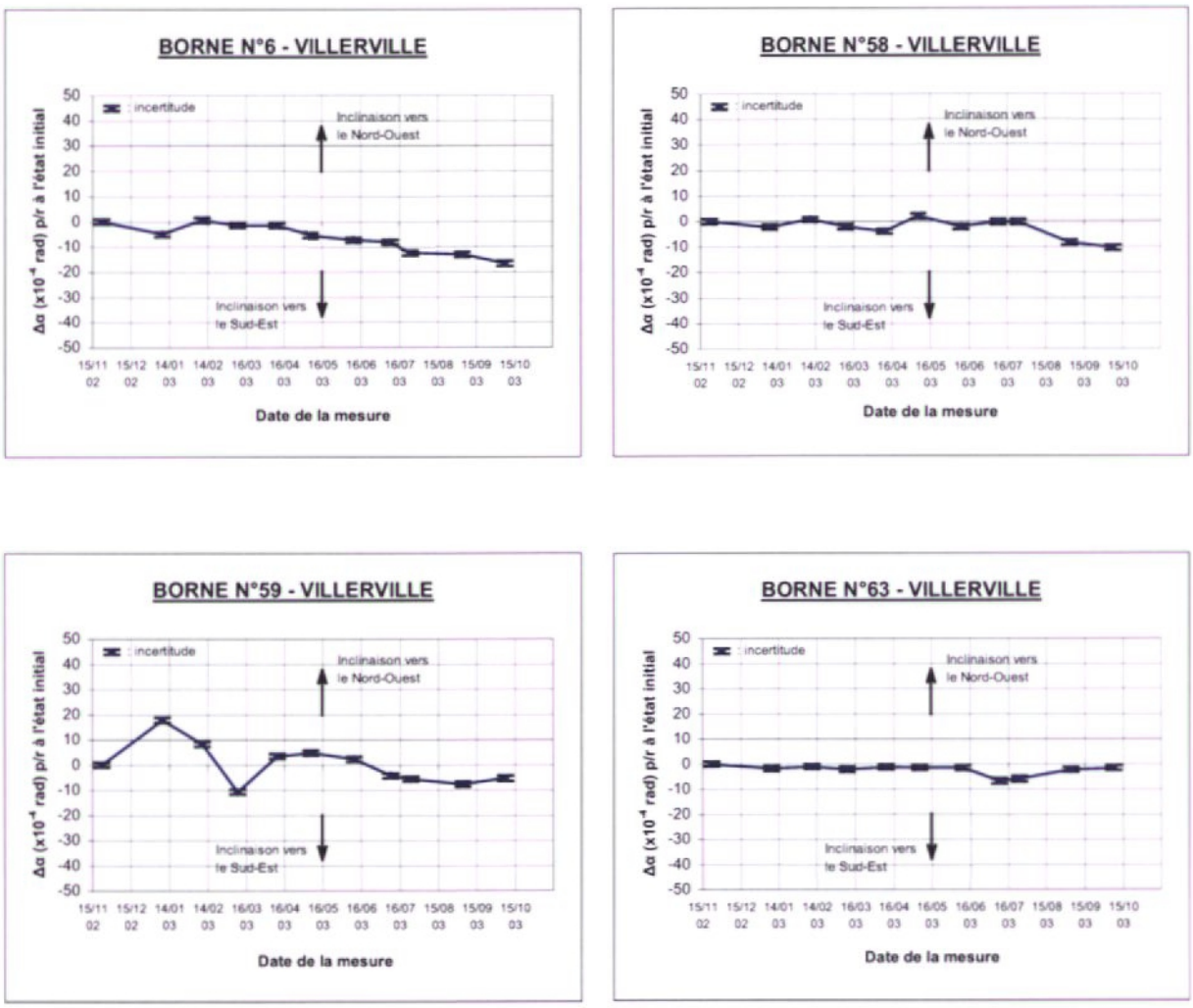

figure 4 : variation de l'inclinaison des bornes n^{os} 6, 58, 59 à 63 de Villerville, entre novembre 2002 et octobre 2003

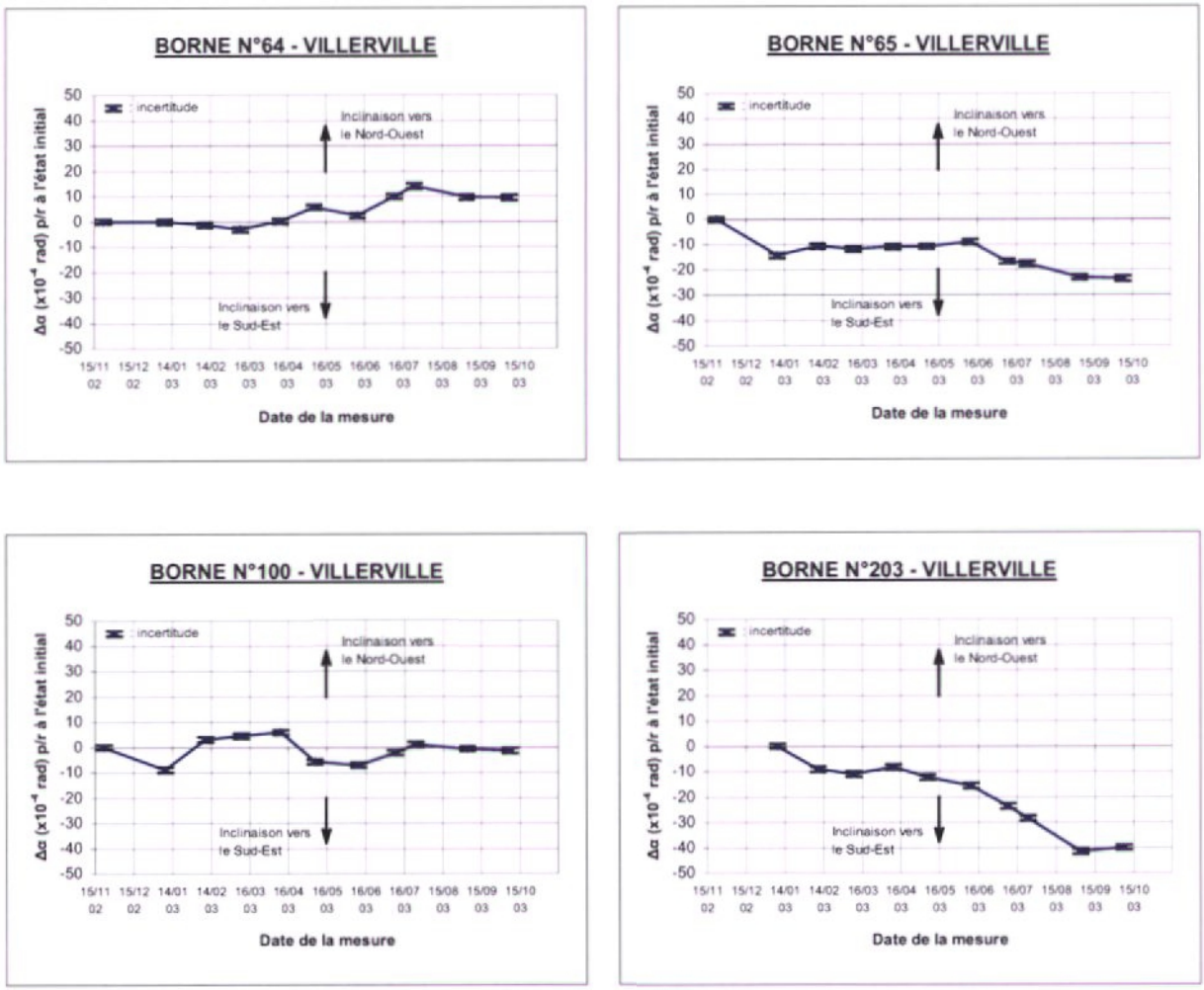

figure 5 : variation de l'inclinaison des bornes n^{os} 64, 65, 100 et 203 de Villerville, entre novembre 2002 et octobre 2003

Commentaire : les variations de l'inclinaison de l'embase par rapport à l'horizontale indiquent :

- la stabilité de la borne n°6 localisée au dessus de l'escarpement principal limitant la zone instable du Cirque des Graves ;
- quelques variations significatives sur les autres bornes localisées en zone instable, en particulier les bornes n^{os}65 et 203 les plus proches du pied de versant.

L'analyse précise de la chronologie des déplacements sera donnée dans la partie synthèse avec les données climatiques, piézométriques et des déplacements de surface.

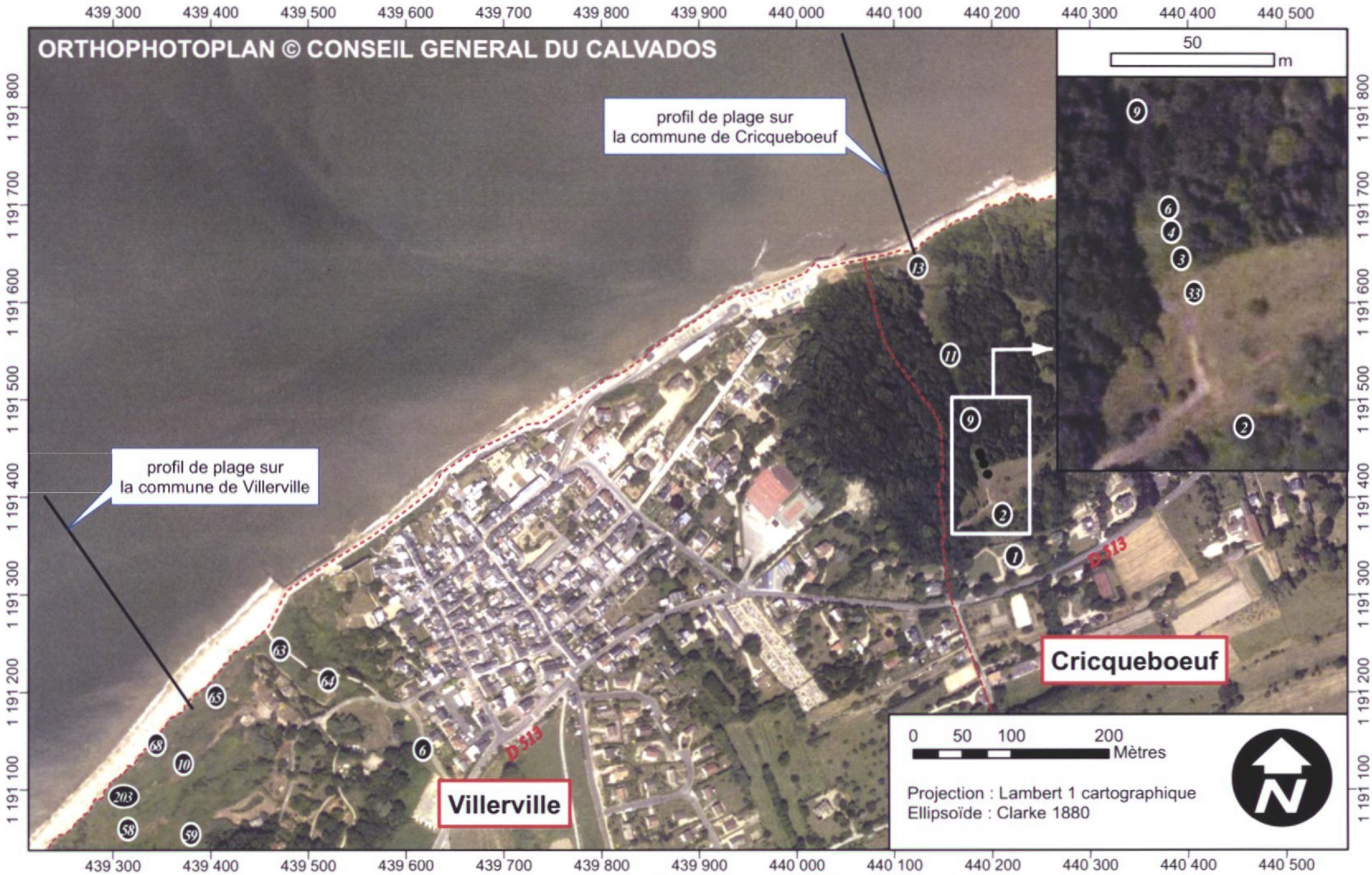

figure 6 : plan de localisation des bornes implantées sur les sites de Villerville et de Cricqueboeuf

3.2. Variations piézométriques des nappes à Villerville et à Bénerville

Un limnigraphe Orphimèdes a été mis en place en novembre 2002 dans un puits de forage situé à Villerville, afin d'enregistrer les battements de la nappe phréatique sur la zone d'étude. Des mesures complémentaires ont été réalisées ponctuellement dans le puits, à la sonde piézométrique, afin de vérifier le calage du limnigraphe. Les données sont exploitables à compter du 19 décembre 2002. Le limnigraphe de Villerville a été calé altimétriquement au niveau de chantier, à partir deux repères de nivellement situés le long de la D513, de part et d'autre du puits, à 900 mètres pour le premier et à 600 mètres pour le second. L'altitude de la tête du puits, dans le système de référence IGN_{69}, est de 70,105 m IGN_{69}.

Un second limnigraphe Orphimèdes a été mis en place dans un puits situé à Bénerville (localisation sur la figure 1). Les données acquises par l'appareil ont été validées par le biais de mesures ponctuelles à la sonde piézométrique. Ces données sont exploitables à partir du 7 janvier 2003. Ce puits a également été calé altimétriquement, au D-GPS, la base GPS se situant à Villers-sur-Mer. L'altitude de la tête du puits de Bénerville est de 50,95 m IGN_{69}.

Les figures 7, 8 et 9 présentent l'évolution de la pluie totale et efficace décadaire (station de S^t Gatien) et les variations piézométriques des deux puits à Villerville et Bénerville pour chacune des années 2003, 2004 et 2005 (jusqu'en septembre). Cette représentation simultanée permet de bien montrer les différentes fluctuations en relations directes avec les précipitations.

A Villerville, pour un niveau moyen de nappe de 67.50 m situé à environ –2.50 m du terrain naturel, les fluctuations au cours de la période de mesures varient de 67.70 à 67.10m.

A Bénerville, la nappe fluctue au cours de la période de mesures entre –0.75 et -2.00 m environ. En dehors de la brusque remontée du 1er juin 2003, les fluctuations de la nappe située très proche de la surface sur ce piézomètre sont beaucoup plus « tamponnées » que sur celui de Villerville. Cela pourrait indiquer un certain colmatage de la crépine de ce tube foré en 1998.

Plus généralement, pour ces deux piézomètres, de brusques remontées suivies immédiatement d'un tarissement sont en relation étroite avec les épisodes pluvieux. L'impact de l'épisode orageux du 1er juin 2003 est particulièrement remarquable. Les fluctuations saisonnières sont conformes : tarissement en période « chaude » et élévation en période « froide » de pluies efficaces positives. On notera, en cette période de relatif déficit hydrique, que les nappes enregistrent leurs niveaux les plus bas au printemps-été 2005 (résultats à comparer avec les autres données pour des périodes d'observation plus étendues (*cf.* synthèse).

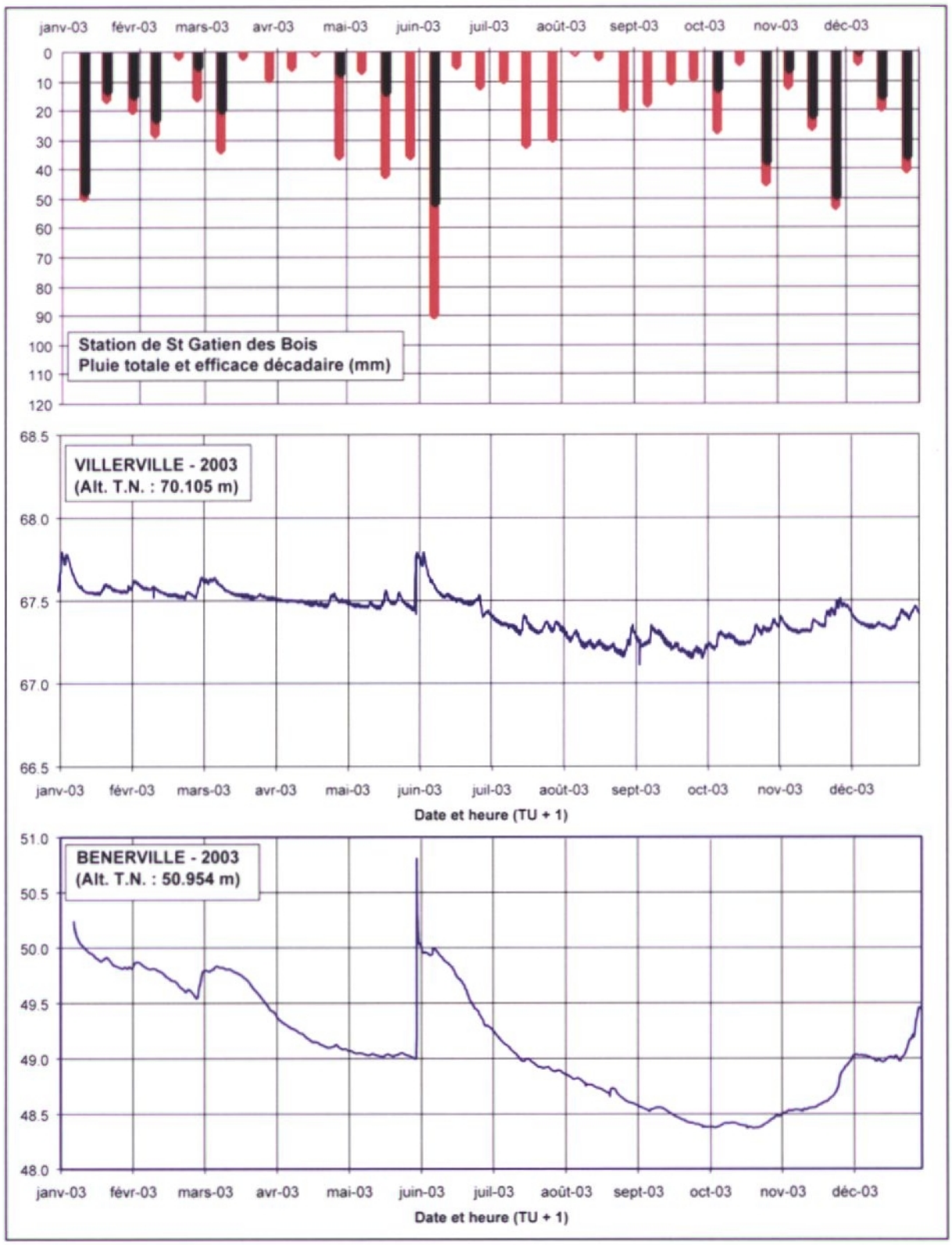

figure 7 : Année 2003 - Pluie totale et efficace décadaire (Station de St Gatien) et variations piézométriques à Villerville et Bennerville

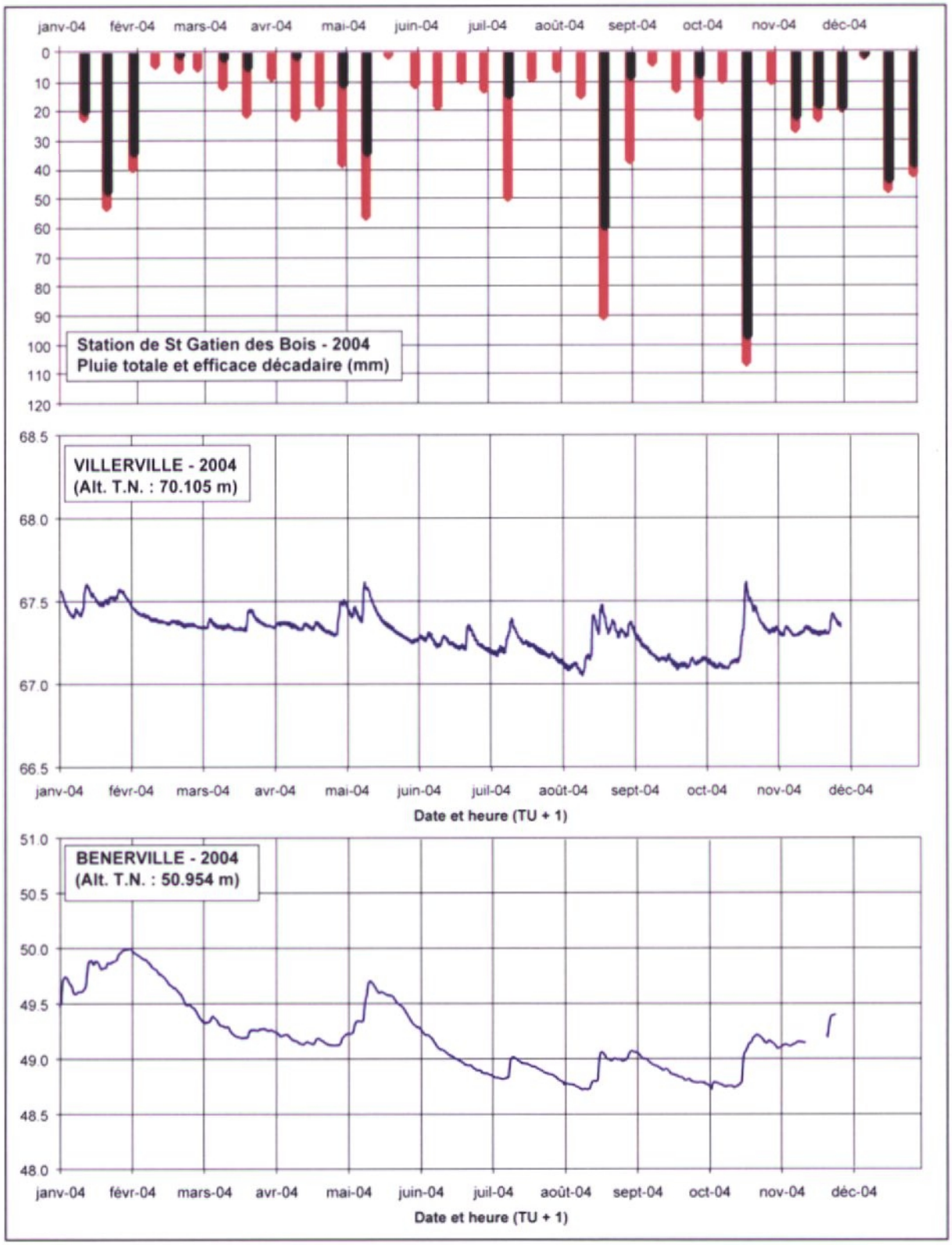

figure 8 : Année 2004 - Pluie totale et efficace décadaire (Station de St Gatien) et variations piézométriques à Villerville et Bénerville

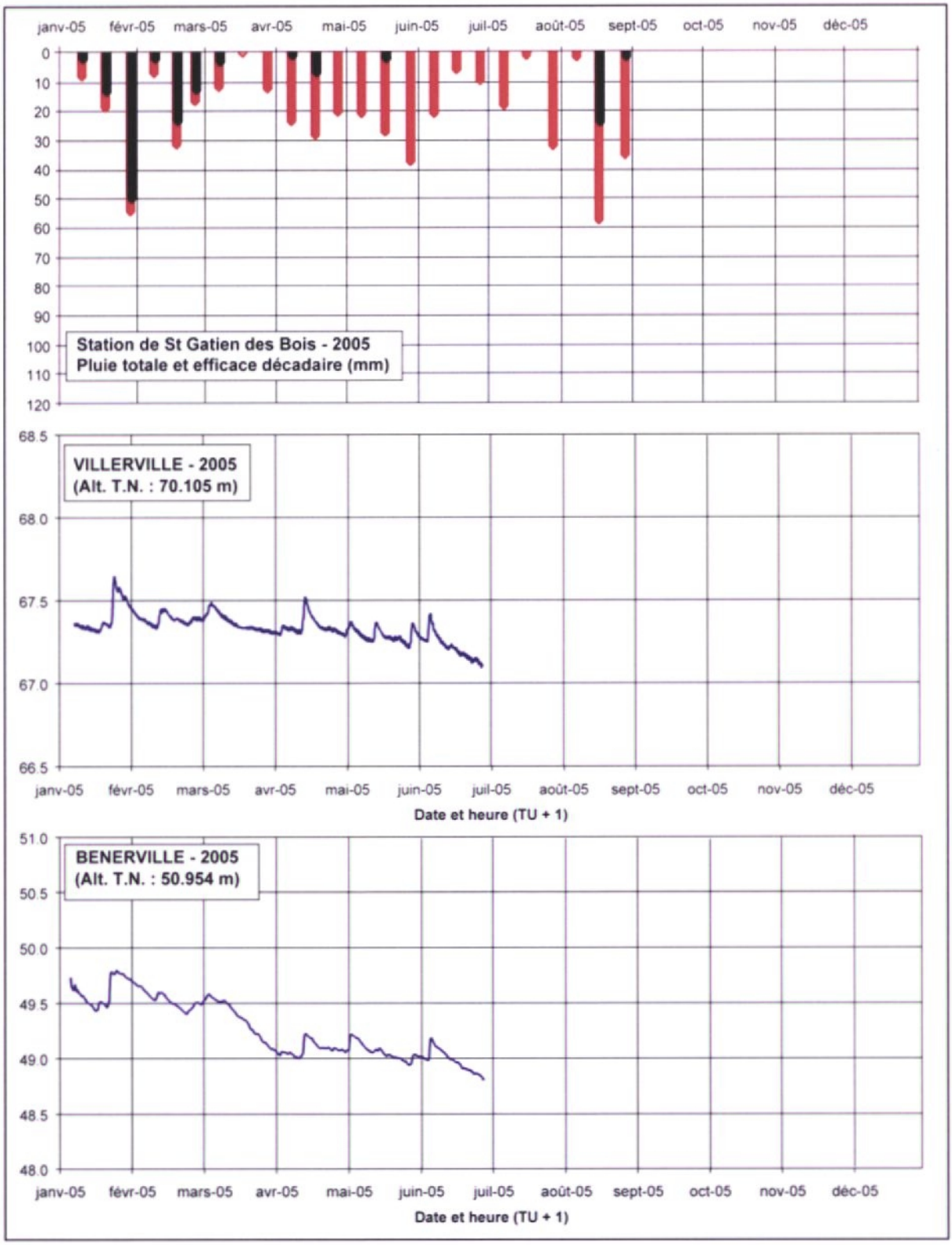

figure 9 : Année 2005 - Pluie totale et efficace décadaire (Station de St Gatien) et variations piézométriques à Villerville et Bénerville

3.3. Les déplacements de surface à Villerville et Cricqueboeuf

Dans le cadre de l'observatoire et comme indiqué dans le tableau de synthèse n°1, six relevés tachéométriques (théodolite et distancemètre infra-rouge) ont été réalisés entre le 7 juillet 2002 et le 15 mars 2005. A noter qu'à Cricquebœuf, le 21 novembre 2003, l'accès au terrain nous a été refusé par le propriétaire. Le réseau est constitué de dix repères à Villerville et de douze à Cricquebœuf.

Compte tenu du mode d'acquisition (une à deux seules stations d'observation) et des distances entre points, les coordonnées des repères sont définies avec une précision estimée à +/-10/15 mm. Les coordonnées successives permettent ensuite de calculer les déplacements horizontaux et verticaux et les vecteurs déplacements correspondants (figure 10).

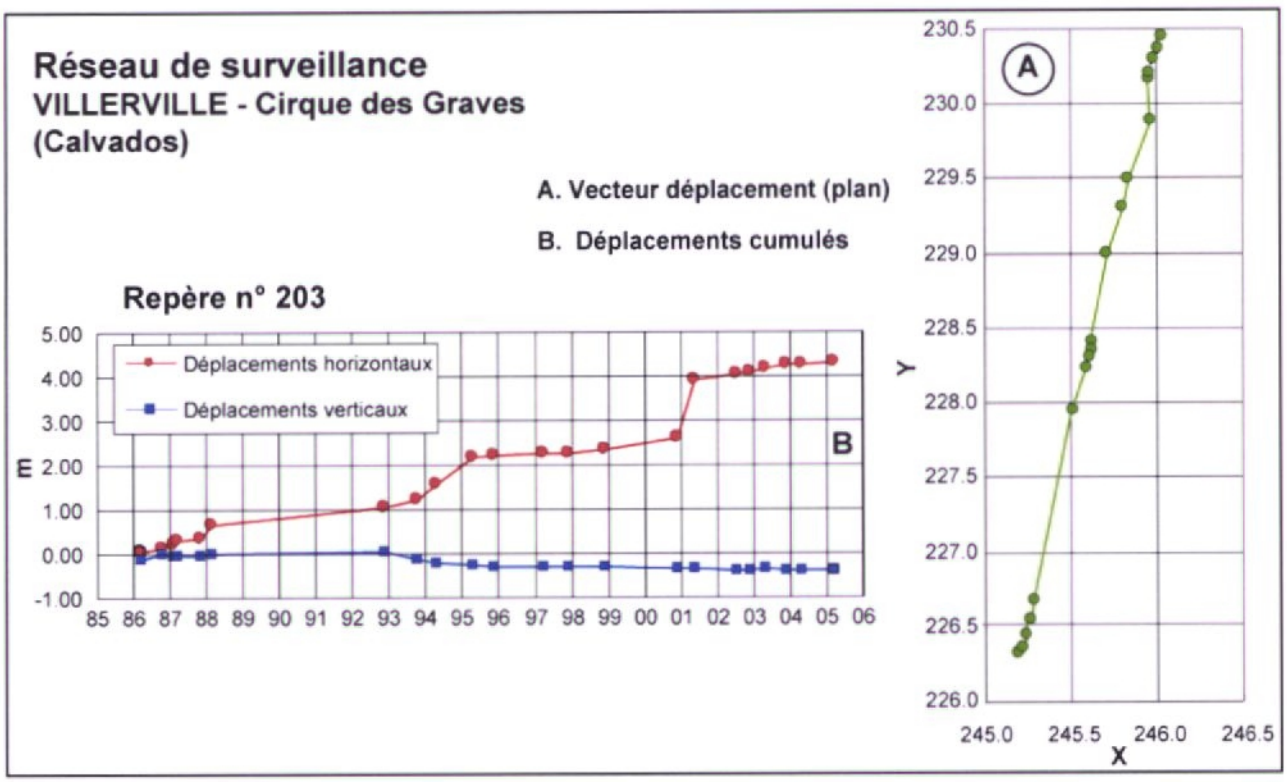

figure 10 : vecteur déplacement « plan » et déplacements cumulés horizontaux et verticaux du repère n°203 à Villerville (Cirque des Graves)

Pour chacun des deux secteurs (Villerville – Cirque des Graves- et Cricquebœuf –Fosses du Macre-), les figures 11 et 12 fournissent, entre janvier 1985 et juin 2005, les déplacements cumulés de surface, la pluie efficace annuelle (St Gatien des Bois) et les variations piézométriques du puits de Danestal.

Sur la période du 7 juillet 2002 au 15 mars 2005, les déplacements cumulés sont relativement faibles :

- A Villerville au Cirque des Graves, les déplacements varient de **10 cm** (n°63N) ou 15 cm (n°59) pour les repères situés en amont du versant à **46 cm** et 27 cm respectivement pour les repères n°68 et n°203 situés au pied du versant dans le secteur le plus actif. La **moyenne de 24 cm** est calculée pour huit repères sur la période considérée ;

- A Cricquebœuf aux Fosses du Macre, ils varient de **3 cm** (n°2) à **17 cm** (n°6 et 7) pour une **moyenne de 10 cm** calculée pour les dix repères surveillés sur la période considérée ;

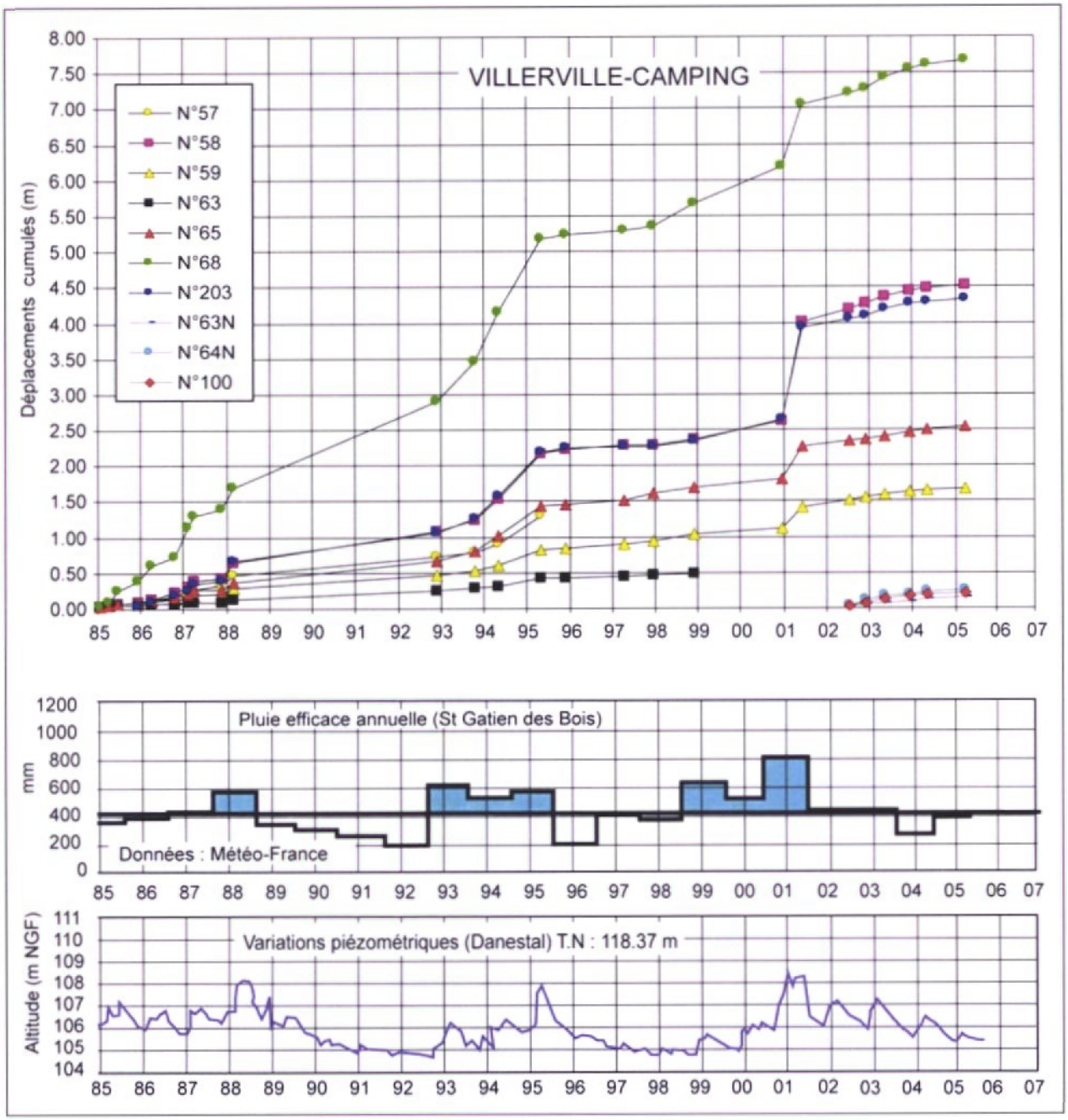

figure 11 : déplacements cumulés de surface au camping des Graves à Villerville, pluie efficace annuelle (St Gatien des Bois) et variations piézométriques du puits de Danestal entre janvier 1985 et juin 2005

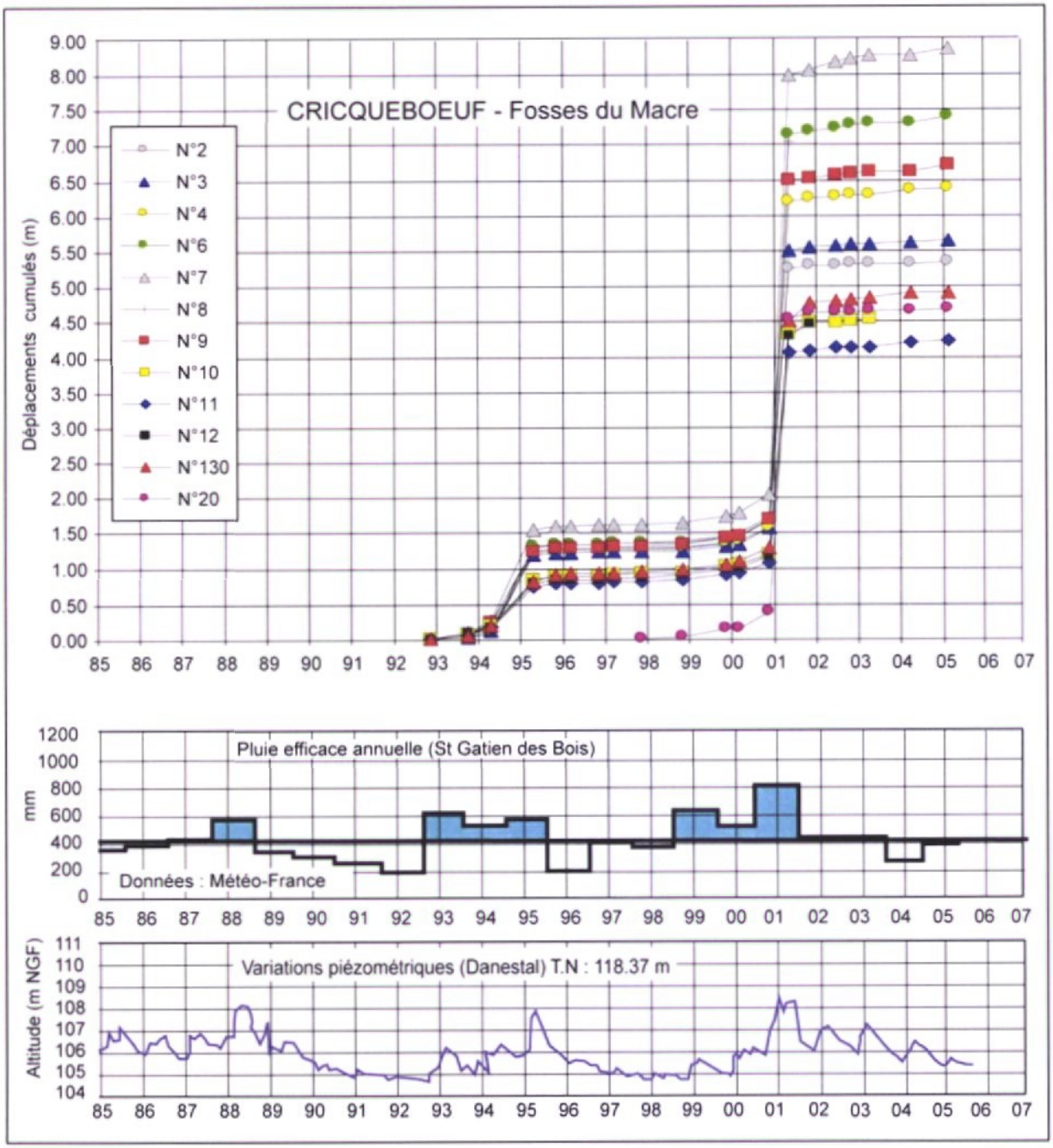

figure 12 : déplacements cumulés de surface aux Fosses du Macre à Cricquebœuf, pluie efficace annuelle (St Gatien des Bois) et variations piézométriques du puits de Danestal entre janvier 1985 et juin 2005

3.4. Evolution du pied de la falaise et du profil de plage

3.4. 1. Localisation des profils

Deux profils de plage, situés au droit des secteurs d'étude de Villerville et de Cricquebœuf, ont été levés au tachéomètre les 9 janvier, 23 avril et 8 octobre 2003. L'objectif de ces levés est de préciser l'évolution du profil de plage et du pied de la falaise, puis de tenter d'établir une corrélation entre cette évolution et le déplacement des terrains situés à l'amont.

Le profil de Cricquebœuf se situe dans l'axe des bornes implantées au NNW de l'habitation (tête de profil) située en bordure de la D513 (figure 6 p.13). A ce niveau, la falaise limoneuse, d'une hauteur de trois mètres, est protégée à sa base par un cordon d'enrochements dont la hauteur au-dessus du terrain naturel est de l'ordre d'un mètre (photographie 1). La longueur des profils levés varie entre 205 et 250 mètres.

photographie 1 : partie supérieure du profil de plage levé à Criquebœuf

Le profil de Villerville se situe immédiatement au SW de la borne n°65 (figure 6 p.13). Sur ce profil, l'estran est essentiellement constitué d'un platier calcaire (photographie 2). Seule la haute plage, d'une largeur très réduite, est recouverte de sables. En pied de falaise limoneuse dont la hauteur n'excède pas 1,5 mètres, se trouvent quelques blocs épars dont l'efficacité est très limitée. La longueur des profils est comprise entre 205 et 270 mètres.

photographie 2 : la partie médiane du profil de Villerville, essentiellement constituée d'un platier rocheux

3.4. 2. Evolution des profils

a / Le profil de Cricquebœuf

A Cricquebœuf, la falaise et la partie supérieure de la haute plage ont relativement peu évolué entre janvier et octobre 2003. La partie inférieure de la haute plage s'est en revanche exhaussée entre janvier et avril 2003 (+25 cm en moyenne), puis abaissée entre avril et octobre 2003 (-70 cm), le bilan se traduisant par un abaissement de ce segment de profil (figure 13). Sur la moyenne plage, une érosion de la partie centrale a été mise en évidence entre janvier et octobre 2003 (-20 cm), avec une redistribution probable des sables vers sa partie supérieure et sa partie inférieure (+10 cm).

b / Le profil de Villerville

A Villerville, le pied de la falaise est resté stable (figure 14). Depuis janvier 2003, la barre sableuse d'une amplitude de l'ordre du mètre qui se situait entre la haute plage et la moyenne plage, s'est totalement effacée. Une partie de ces sables a été redistribuée vers la haute plage, qui s'est exhaussée de +40 cm.

Le suivi topométrique des hautes plages de Cricquebœuf et de Villerville ne couvre qu'une période de neuf mois. Il est donc trop tôt pour extraire de ces données des tendances évolutives, qui ne pourront être précisées qu'après l'analyse des levés ultérieurs.

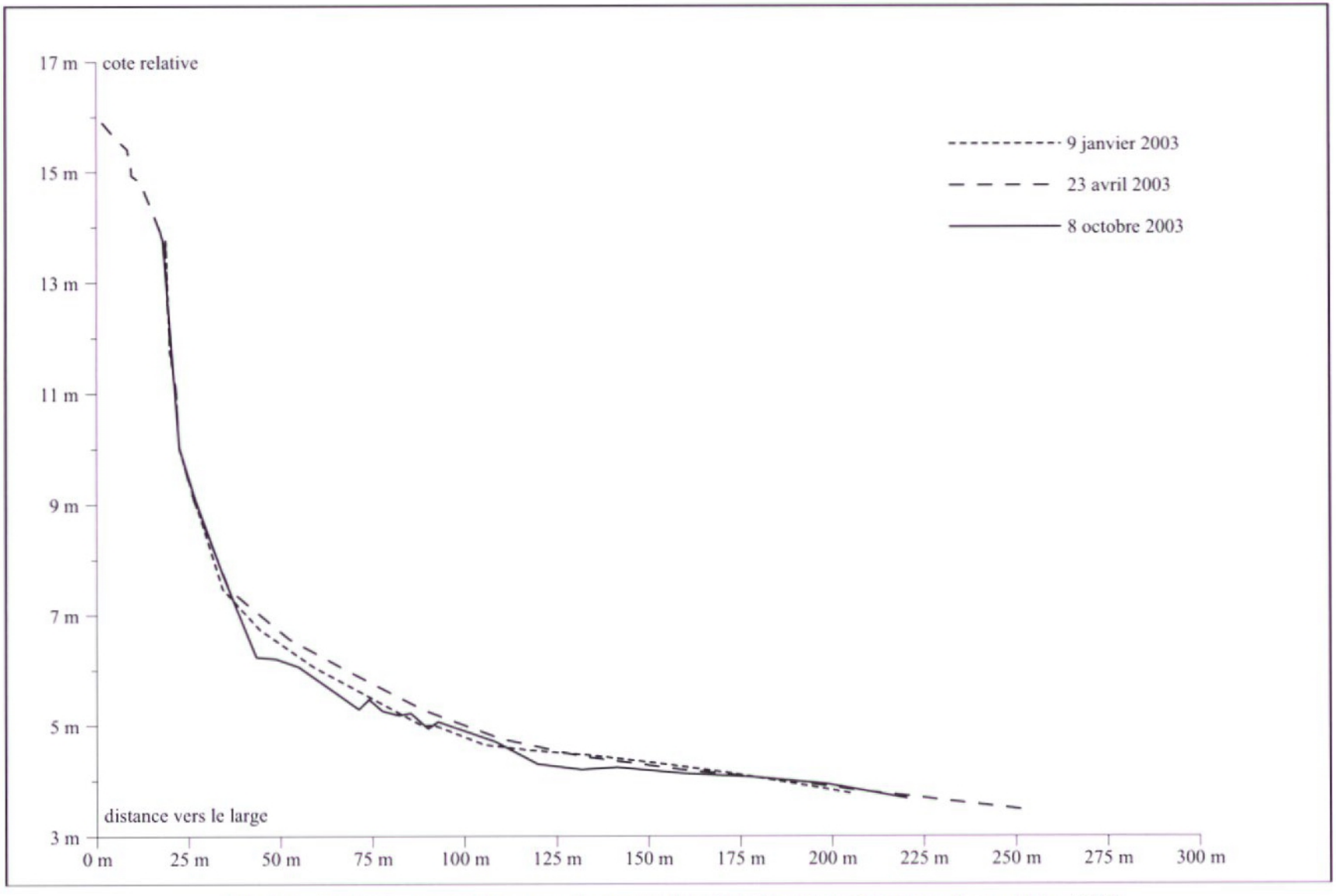

figure 13 : évolution du profil de plage sur la commune de Cricquebœuf entre janvier et octobre 2003

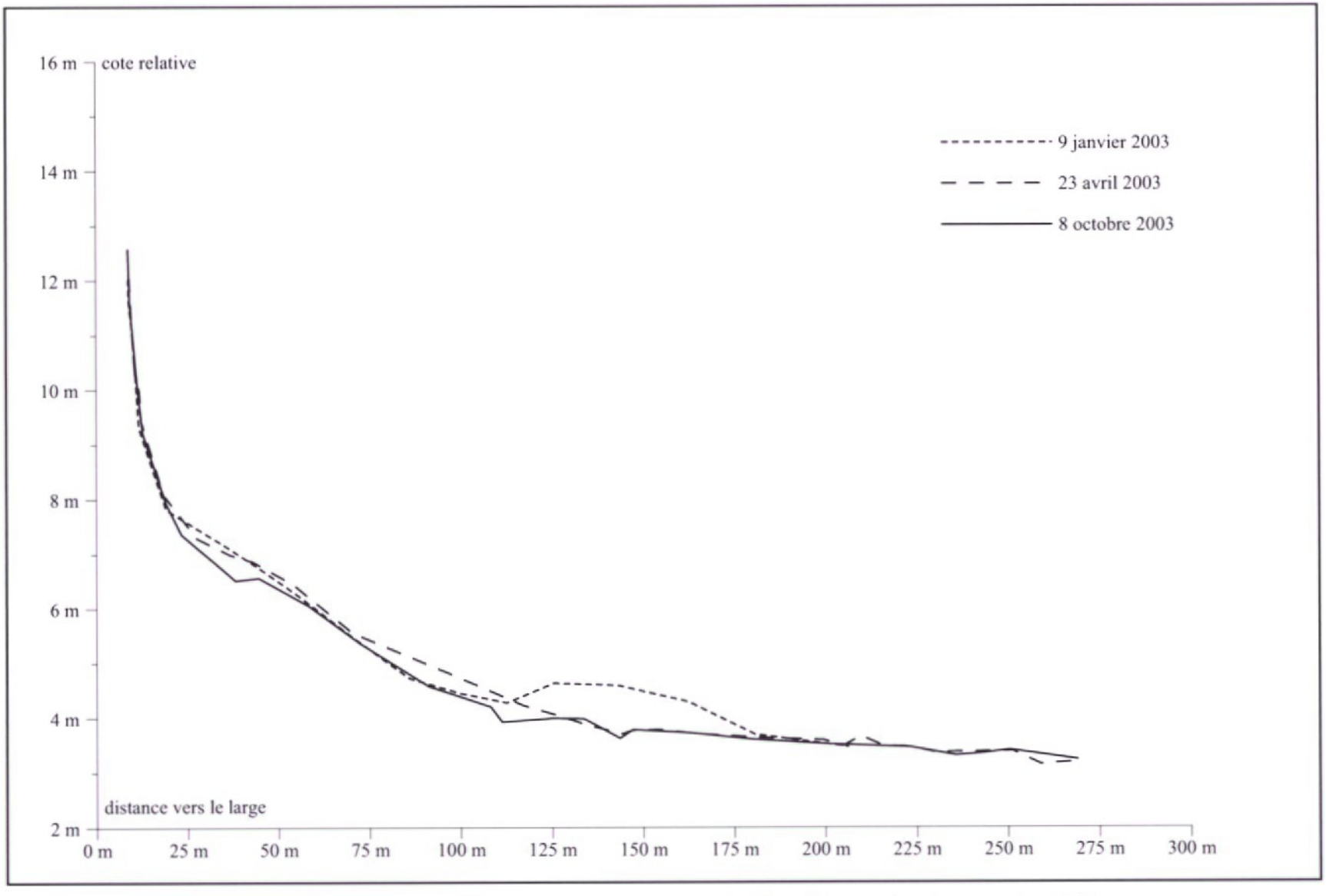

figure 14 : évolution du profil de plage sur la commune de Villerville entre janvier et octobre 2003

4. LES RESULTATS POUR LE BESSIN

Dans le Bessin, l'évolution des falaises a été suivie grâce à deux couvertures de photographies aériennes obliques réalisées le 5 août 2003 et le 18 septembre 2004 (tableau 2).

4.1. Méthodologie

La méthodologie consiste à comparer les images de deux missions successives et à repérer les mouvements majeurs déclenchés dans la période considérée entre les deux séries de prises de vue.

Date et heure de prise de vue	Type	N° des photos	Nombre*	Commentaires :
5 août 2003 17h02 à 17h15	numérique	0730 à 0805	75	Temps couvert (pas d'ombre portée, mais reflets dans la verrière du cockpit), marée haute
18 septembre 2004 17h05 à 17h20	numérique	1824 à 1904	81	Ensoleillé avec ombre portée, marée basse (estran en partie découvert) Photos de très bonne qualité
* : Nombre de photographies disponibles après élimination des photographies ratées ou trop floues pour être exploitables				

tableau 2 : caractéristiques des deux séries de photographies aériennes obliques prises sur les falaises du Bessin en 2003 et 2004

Les informations ont été géoréférencées et consignées dans une base de données gérée sous Arcview 3.1®. La localisation a été rendue plus aisée grâce à l'utilisation de l'orthophoplan de l'année 2001. Une base de données relationnelle est associée à chaque polygone (objet). Elle comporte plusieurs attributs (tableau 3 et figure 15) permettant la quantification des masses mises en mouvement (dans l'espace et dans le temps) pour les différents types de phénomènes.

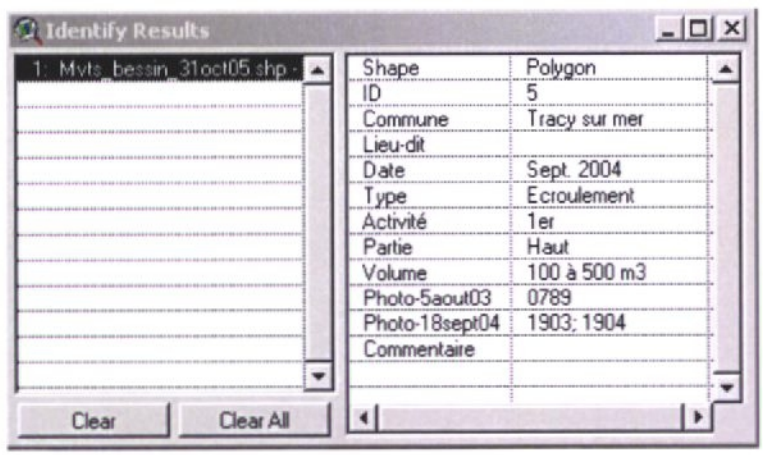

figure 15 : exemple de table d'attributs pour un écroulement de surplomb survenant sur la commune de Tracy-sur-Mer entre août 2003 et septembre 2004.

Attributs	Classes
N° ID (identification)	1 à n
Commune	
Lieu-dit	
Date de repérage	
Type	Ecroulement de surplomb Glissement rotationnel Glissement superficiel Fluage
Activité	1er mouvement Réactivation
Partie de la falaise affectée	Base de la falaise Partie haute Partie médiane Totalité de la falaise
Volume estimée	Inférieur à 100m^3 De 100 à 500 m^3 Supérieur à 500 m^3 Autre volume : xxx m^3
Série 1 (date1)	N° des photos concernées
Série 2 (date2)	N° des photos concernées
Commentaire	

tableau 3 : les différents attributs et classes correspondantes utilisés pour la base de données « mouvements de terrain » dans le Bessin

Pour chaque phénomène recensé, une fiche descriptive a été réalisée : elle comporte généralement les différentes photographies avec en cas de besoin un ou plusieurs zooms sur la zone active, et dans certains cas l'orthophoplan sur lequel est localisé par un polygone de couleur le mouvement de terrain (figure 17 et figure 19).

4.2. Limites de la méthode

Plusieurs facteurs limitent la précision des résultats et la bonne identification des mouvements de terrain :

- **la qualité des prises de vues :** le mode de prise de vue (photographies aériennes obliques) induit une qualité moindre de certaines photographies (flous de bougés, reflets sur la verrière du cockpit, ailes dans le champ, etc.). Les conditions d'ensoleillement influent beaucoup sur la qualité de la prise de vue. En effet, un ciel ensoleillé, de par l'orientation des falaises, entraînera un contre-jour important qui en trompant la cellule de l'appareil photo, plongera la falaise dans l'ombre. Ainsi, un ciel légèrement voilé évite ces ombres ;
- **l'angle de prise de vue :** les prises de vues en oblique, selon l'angle de celles-ci, peuvent entraîner la dissimulation de certains mouvements par les reliefs de la falaise. Il est important de toujours réaliser les missions dans le même sens, c'est-à-dire de l'Ouest vers l'Est pour faciliter la comparaison des photographies ;

- **la marée :** selon les coefficients de marée et les secteurs (avec ou sans cordon sableux ou de galets), une marée haute ne permet pas d'identifier le haut estran (la base de la falaise) sur lequel sont bien visibles, à marée basse, les masses glissées ou écroulées.

Ces différents points sont clairement illustrés par la figure 16 concernant le secteur de la pointe du Hoc.

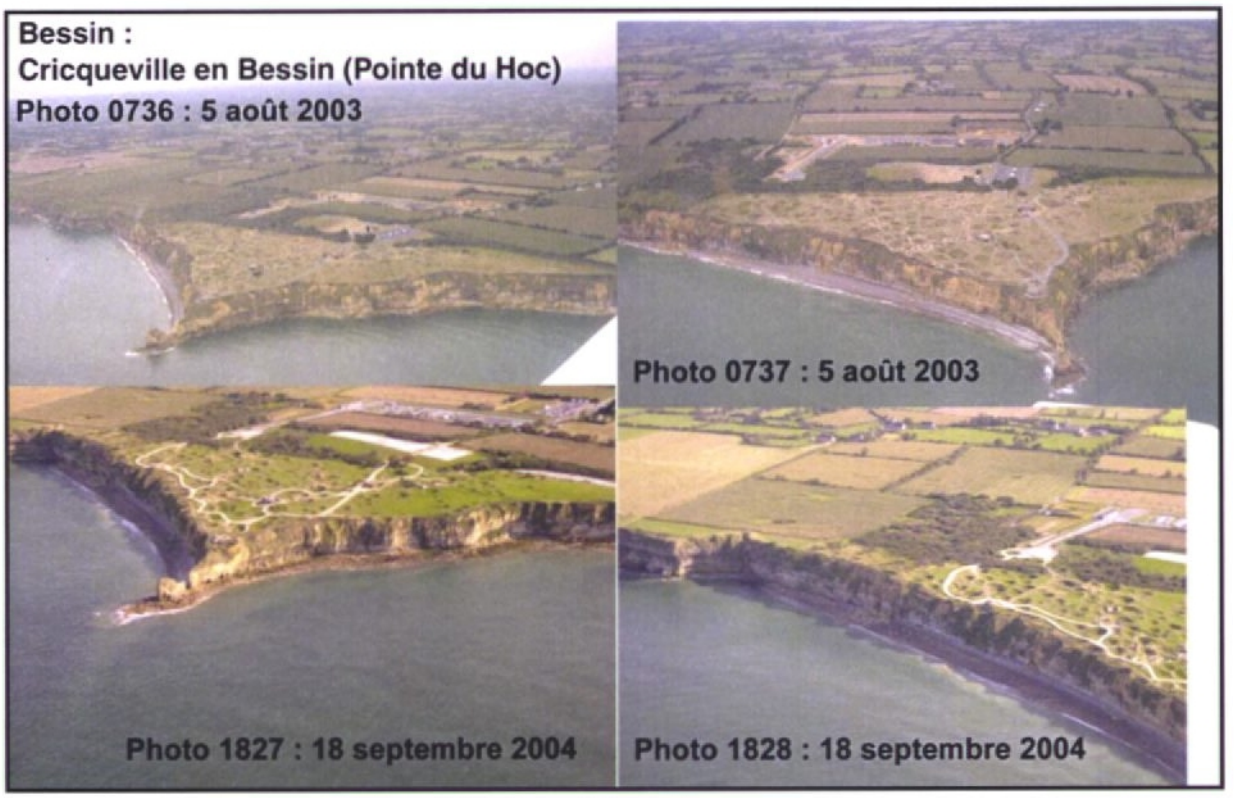

figure 16 : limites de la méthode illustrées dans le secteur de la pointe du Hoc (comparaison des photographies aériennes obliques du 5 août 2003 et du 18 septembre 2004).

4.3. *Résultats obtenus*

Pendant la période considérée du 5 août 2003 au 18 septembre 2004, seuls deux mouvements de terrain de type « écroulement de surplomb » se sont produits : l'un sur la commune de Tracy-sur-mer à l'Ouest immédiat du Cap Manvieux (figure 17) et l'autre sur la commune de Cricqueville en Bessin à quelques centaines de mètres à l'Ouest de la Pointe du Hoc (figure 18 et figure 19). Leurs volumes sont bien significatifs et sont estimés entre 100 et 500 m^3.

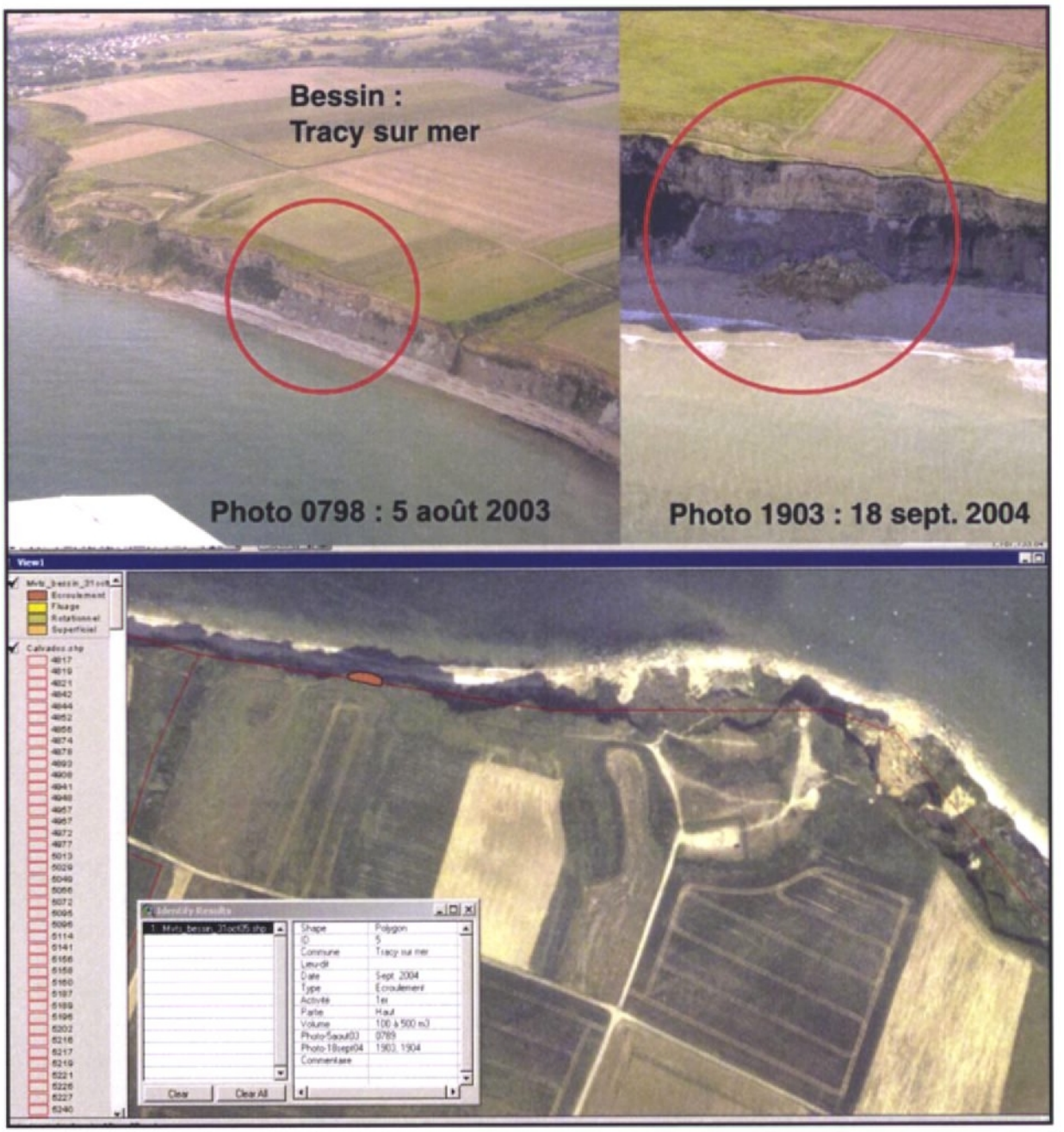

figure 17 : repérage d'un écroulement de surplomb sur la commune de Tracy-sur-mer par comparaison des photographies aériennes obliques du 5 août 2003 et du 18 septembre 2004. Localisation sur la base de données sous Arcview 3.1® avec orthophotoplan.

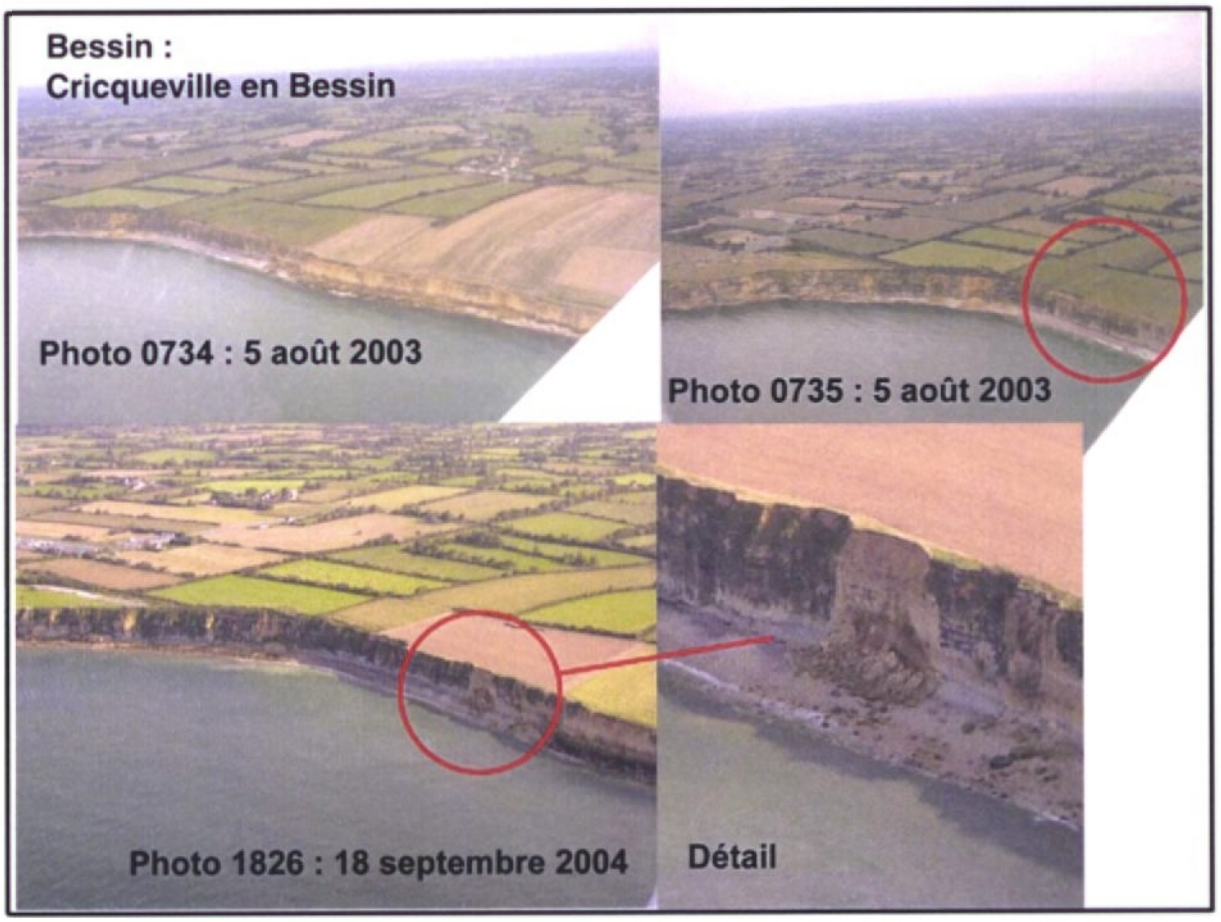

figure 18 : repérage d'un écroulement de surplomb sur la commune de Cricqueville-en-Bessin par comparaison des photographies aériennes obliques du 5 août 2003 et du 18 septembre 2004.

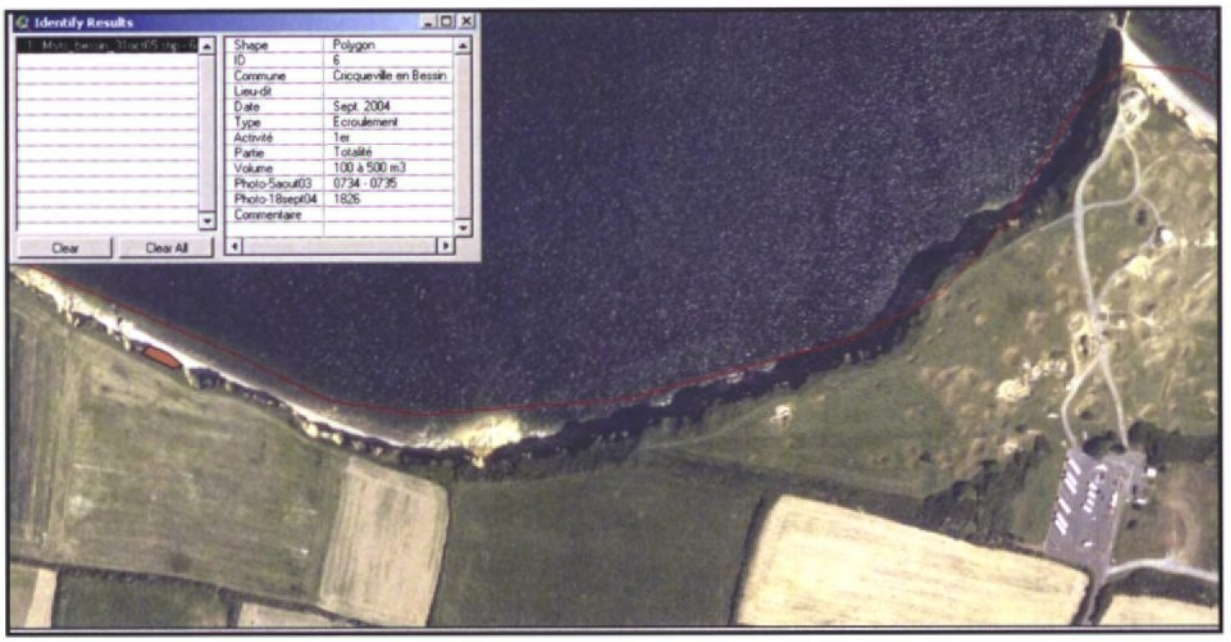

figure 19 : localisation de l'écroulement de surplomb détecté sur la commune de Cricqueville-en-Bessin (base de données sous Arcview 3.1® avec orthophotoplan).

5. SYNTHESE ET PERSPECTIVES

L'observatoire sur les mouvements de terrain du Calvados a été mis en place en 2002 et suivi jusqu'à septembre 2005 dans une ***période de relative faible activité*** correspondant à une situation particulière, mais non unique de déficit pluviométrique. Rappelons que les mouvements observés sur la côte du Calvados sont des glissements de terrain à commande essentiellement hydrologique, auxquels il faut rajouter le rôle de la suppression de butée par la mer (Maquaire, 1990, 1997, 2000, 2005). Nous allons ainsi replacer cette courte période d'observation dans la série plus longue des observations enregistrées depuis janvier 1974.

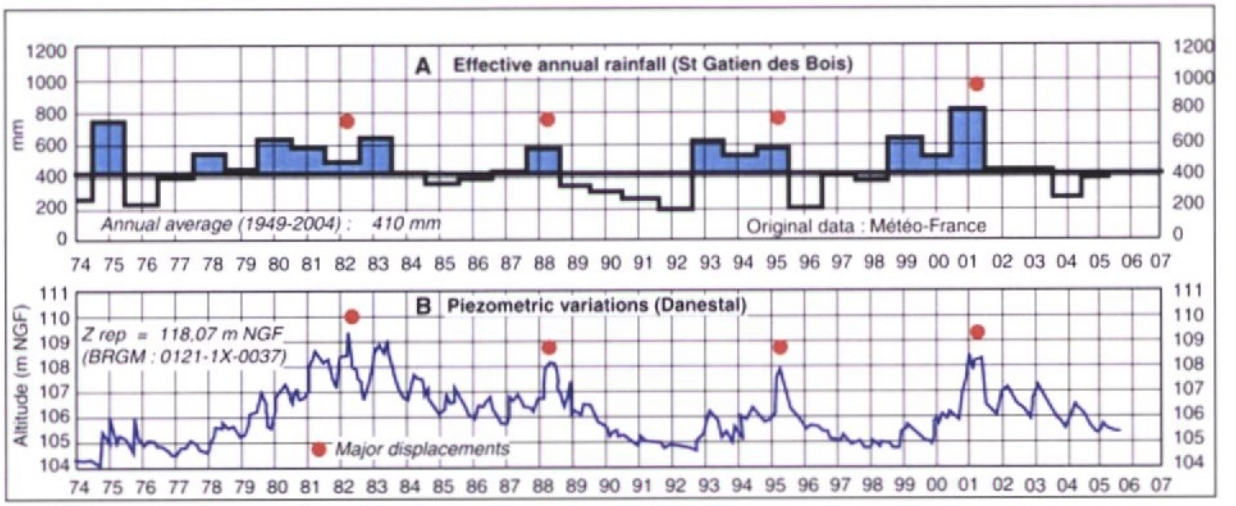

figure 20 : pluie efficace à St Gatien des Bois et variations piézométriques à Danestal entre janvier 1974 et septembre 2005 (d'après Maquaire, 2005).

La figure 20 permet d'identifier les diverses phases d'évolution des glissements de Villerville-Cricquebœuf (phases de déclenchement ou de réactivation) par rapport (1) aux précipitations efficaces (pluie totale déduite de l'évapotranspiration potentielle -ETP Penmann-) de la station de Saint-Gatien-des-Bois, et (2) aux données piézométriques disponibles, sur une longue période 1974-2005, pour un puits situé sur le plateau du pays d'Auge à Danestal à quelques kilomètres en arrière du littoral (Maquaire, 1990 ; 1994 ; 2000 et 2005).

On peut observer que les niveaux piézométriques élevés, et à un moindre degré les niveaux bas, sont plus hauts d'une année à l'autre (figure 20b). Cette élévation pluriannuelle du niveau moyen résulte de l'effet cumulatif des précipitations des années précédentes. L'élévation pluriannuelle qui a commencé en 1978 a continué jusqu'à mars 1982 et avril 1983. Cette augmentation en 1978 correspond parfaitement aux fluctuations annuelles acycliques de pluviométrie (figure 20a), qui correspond à une période de précipitations efficaces très supérieures à la moyenne (1949-2004).

Le mouvement majeur des **10-11 janvier 1982** se produit en période de très hautes eaux (altitude maximale enregistrée sur la période 1974-2005). De la même manière, mais à un degré moindre, la réactivation de **février 1988** se produit après deux années hydrologiques excédentaires par rapport à la moyenne, mais particulièrement après des mois précédents très pluvieux responsables d'une montée brusque et importante de la nappe phréatique. Pour le mouvement de Cricquebœuf de **janvier-février 1995**, une montée rapide du niveau de la

nappe phréatique est favorisée par deux années précédentes très excessives (+54% en 1993 et +28% de 1994) et par trois mois précédents très pluvieux.

En mars 2001, les désordres majeurs se produisent également à la suite d'une **période également exceptionnellement humide**. La pluviométrie totale des trois années précédentes (respectivement 994 mm, 1146 mm et 1155 mm) est **largement excédentaire** par rapport à la moyenne de 859 mm calculée sur la période 1949-2000. Cet excès pluri-annuel est aussi fortement accentué par les fortes pluies mensuelles des mois d'hiver précédant l'événement de mars 2001 : la pluviométrie des mois de janvier et de mars a atteint respectivement 144,8 mm et 178,2 mm, soit le double de la moyenne pour janvier et le triple pour mars. Ces excès sont également bien visibles sur la figure 20a : sur la période automne-hiver 2000-2001, **le total de pluie efficace atteint 811 mm, soit près du double de la moyenne** calculée sur la période 1949-2004.

La conséquence de ces « périodes » exceptionnellement pluvieuses est une **élévation du niveau de la nappe phréatique** et la **création de surpressions interstitielles néfastes**. Les données piézométriques indiquent bien que tous les désordres majeurs se produisent en situation **de nappe haute** (figure 20b) : à savoir janvier 1982, février 1988, janvier-février 1995 et mars 2001. Le niveau haut de mars 2001 est supérieur à celui de mars 1995 et de février 1988.

Les conséquences directes et immédiates se traduisent par des **déplacements exceptionnels pluri-décimétriques à pluri-métriques** avec progression de la zone instable : par exemple, en 2001, destruction de deux habitations et menace directe pour deux ou trois autres situées à quelques mètres en amont de la zone instable. Cela confirme une fois de plus, **le rôle majeur de l'eau** dans le déclenchement de ces mouvements de terrain.

Par contre depuis 2002, soit depuis quatre années hydrologiques, la pluviométrie efficace est égale ou inférieure à la moyenne avec une année 2003-2004 de seulement 399 mm. Ceci se traduit donc fort logiquement par un abaissement pluriannuel des nappes phréatiques qui explique la très faible activité enregistrée, dans le cadre de l'observatoire à la fois dans le pays d'Auge comme dans le Bessin.

Toutefois, dans le Pays d'Auge et en particulier à Villerville, et dans une moindre mesure à Cricquebœuf, malgré une nappe basse, les désordres sont tout de même significatifs : ceci résulte pour une grande part de l'absence de protection efficace de pied de versant avec une suppression de butée par l'érosion de la mer qui ne permet pas au versant d'acquérir un profil d'équilibre (avec un coefficient de sécurité bien supérieur à l'unité). Cela range ces glissements dans la catégorie des **glissement actifs** à **l'activité « continue »** au sens donné par Varnes (1984).

Dans le cadre de l'observatoire, le réseau de surveillance de Villerville-Cricquebœuf a été restauré, complété et étendu à Benerville en 2002. Les données acquises ponctuellement ou en continu sur ces sites peuvent être utilement comparées aux plus longues séries de données disponibles.

Ainsi, l'Observatoire des Mouvements de Terrain du Calvados soutenu financièrement par la DIREN (Direction Régionale de l'Environnement Basse-Normandie) apparaît à présent comme un « **outil** » **opérationnel** permettant un suivi objectif et précis des différents déplacements de surface et des principaux facteurs de déclenchement. La poursuite de ce suivi est essentiel pour plusieurs raisons :

- un effort financier important a été nécessaire pour mettre en place le réseau de surveillance entre 1984 et 1992 et pour sa remise en état en 2002. Ce réseau est à présent actif et opérationnel, mais son entretien régulier doit être assuré (élagage, layonnages, …) ;
- la **forte susceptibilité des terrains** rend très probable, pour des conditions hydro-climatiques pluriannuelles particulières, **la survenance dans les années futures de mouvements majeurs** comme ceux de 1982, 1988, 1995 et 2001 ;
- les **conséquences économiques** de ces glissements **peuvent être considérables** sur les secteurs de côte urbanisés : présence de routes et d'habitations dont certaines nécessitent déjà un entretien régulier en raison de l'instabilité du sous-sol (*cf.* la fermeture à la circulation de la D513, en 2001) ;
- la **compréhension de ces processus complexes** et **de leurs conditions de déclenchement** ne peut être améliorée que grâce à la mise à disposition de banques de données multi-paramètres de longue durée et de bonne qualité renseignées par un **suivi régulier et à long terme**. Ce suivi permettra d'une part une modélisation numérique de ces phénomènes et d'autre part, **une meilleure définition des critères et des seuils d'alerte**.

Fait à Caen, le 31 octobre 2005

O. MAQUAIRE

Prof. O. Maquaire

Prof. F. Levoy

6. BIBLIOGRAPHIE

Maquaire O. (1990). Les mouvements de terrain de la côte du Calvados. Documents du BRGM n° 197, Editions du BRGM, 431 p.

Maquaire O. (1994). The frequency of landslides on the Normandy coast and their behaviour during the present climatic regime. European Science Foundation. Project « European Palaeoclimate and man 12 : rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene », ESF Special issue : Burkhard et al., Ed;, pp. 183-195.

Collectif (1997). Plans de prévention des risques littoraux (PPR) : Guide méthodologique. *La Documentation Française*, Paris, 54 p.

Maquaire O. (1997). *The frequency of landslides on the Normandy coast and their behaviour during the present climatic regime*. European Science Foundation. Project " European Palaeoclimate and man 12 : rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene ", *ESF Special issue* : Burkhard et al. Ed., 183-195.

Maquaire, O. (2000). *Effects of groundwater on the Villerville-Cricqueboeuf landslides. Sixteen years of survey (Calvados, France).* In Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.-L. (Eds): Landslides in Research, Theory and Practice. Proc. 8th Int. Symp. on Landslides, Cardiff, Wales, T. Telford, London, (2), 1005-1010.

GRESARC (2001 à 2005). Baie de Seine. Impacts du projet Port 2000 sur l'évolution du littoral sud. Caractérisation morphosédimentaire des plages en fins de saisons estivale et hivernale et après une agitation de quadrant nord-ouest. Années 1, 2 et 3 (cinq rapports dont deux rapports d'avancement, en 2001, 2002, 2003, 2004 et 2005). *Direction Départementale de l'Equipement du Calvados, Université de Caen.*

GRESARC (2002). Observatoire des mouvements de terrain du Calvados. Communes de Cricqueboeuf, Villerville et Bénerville. Compte rendu de l'implantation du réseau de bornes et présentation des resultats des mesures de reference. *Direction Régionale de l'Environnement de Basse-Normandie, Université de Caen, 36 p.*

GRESARC (2005). Suivi de l'évolution des côtes du département du Calvados. Novembre 1995 – Février 2005. Synthèse. *Conseil Général du Calvados, Université de Caen, 21 p. + http://www.cg14.fr/quotidien/amenagement/littoral/suivi_littoral.asp.*

Maquaire O. (2005). *Geomorphic hazards and natural risks, In:* Koster, E., A. (ed.), *The Physical Geography of Western Europe*, Oxford Regional Environments, Oxford University Press, *Chapter 18,* 354-377.

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

photographie 1 : partie supérieure du profil de plage levé à Criquebœuf ____ 21
photographie 2 : la partie médiane du profil de Villerville, essentiellement constituée d'un platier rocheux ____ 22
photographie 3 et photographie 4 : environnement des bornes H (à gauche) et L (à droite) implantées dans la propriété de M. SADIA à Bénerville. ____ 35

LISTE DES TABLEAUX

tableau 1 : types de données acquises, types de mesures, lieux et dates ou périodes d'acquisition dans le Pays d'Auge et le Bessin ____ 6
tableau 2 : caractéristiques des deux séries de photographies aériennes obliques prises sur les falaises du Bessin en 2003 et 2004 ____ 25
tableau 3 : les différents attributs et classes correspondantes utilisés pour la base de données « mouvements de terrain » dans le Bessin ____ 26
tableau 4 : caractéristiques et coordonnées des bornes H et L implantées sur le site de Bénerville ____ 35

LISTE DES FIGURES

figure 1 : plan de localisation des bornes et du limnigraphe implantés sur le site de Bénerville 8
figure 2 : variation de l'inclinaison des bornes A à F de Bénerville, entre novembre 2002 et octobre 2003 9
figure 3 : variation de l'inclinaison des bornes G à L de Bénerville, entre novembre 2002 et octobre 2003 10
figure 4 : variation de l'inclinaison des bornes n^{os} 6, 58, 59 à 63 de Villerville, entre novembre 2002 et octobre 2003 11
figure 5 : variation de l'inclinaison des bornes n^{os} 64, 65, 100 et 203 de Villerville, entre novembre 2002 et octobre 2003 12
figure 6 : plan de localisation des bornes implantées sur les sites de Villerville et de Cricquebœuf 13
figure 7 : Année 2003 - Pluie totale et efficace décadaire (Station de St Gatien) et variations piézométriques à Villerville et Bennerville 15
figure 8 : Année 2004 - Pluie totale et efficace décadaire (Station de St Gatien) et variations piézométriques à Villerville et Bénerville 16
figure 9 : Année 2005 - Pluie totale et efficace décadaire (Station de St Gatien) et variations piézométriques à Villerville et Bénerville 17
figure 10 : vecteur déplacement « plan » et déplacements cumulés horizontaux et verticaux du repère n°203 à Villerville (Cirque des Graves) 18
figure 11 : déplacements cumulés de surface au camping des Graves à Villerville, pluie efficace annuelle (St Gatien des Bois) et variations piézométriques du puits de Danestal entre janvier 1985 et juin 2005 19
figure 12 : déplacements cumulés de surface aux Fosses du Macre à Cricquebœuf, pluie efficace annuelle (St Gatien des Bois) et variations piézométriques du puits de Danestal entre janvier 1985 et juin 2005 20
figure 13 : évolution du profil de plage sur la commune de Cricquebœuf entre janvier et octobre 2003 23
figure 14 : évolution du profil de plage sur la commune de Villerville entre janvier et octobre 2003 24
figure 15 : exemple de table d'attributs pour un écroulement de surplomb survenant sur la commune de Tracy-sur-Mer entre août 2003 et septembre 2004. 25
figure 16 : limites de la méthode illustrées dans le secteur de la pointe du Hoc (comparaison des photographies aériennes obliques du 5 août 2003 et du 18 septembre 2004). 27
figure 17 : repérage d'un écroulement de surplomb sur la commune de Tracy-sur-mer par comparaison des photographies aériennes obliques du 5 août 2003 et du 18 septembre 2004. Localisation sur la base de données sous Arcview 3.1® avec orthophotoplan. 28
figure 18 : repérage d'un écroulement de surplomb sur la commune de Cricqueville-en-Bessin par comparaison des photographies aériennes obliques du 5 août 2003 et du 18 septembre 2004. 29
figure 19 : localisation de l'écroulement de surplomb détecté sur la commune de Cricqueville-en-Bessin (base de données sous Arcview 3.1® avec orthophotoplan). 29
figure 20 : pluie efficace à St Gatien des Bois et variations piézométriques à Danestal entre janvier 1974 et septembre 2005 (d'après Maquaire, 2005). 30

ANNEXE 1

COORDONNEES ET DESCRIPTION DES DEUX DERNIERES BORNES IMPLANTEES A BENERVILLE

L'autorisation d'implanter les deux dernières bornes (bornes H et L) dans la propriété de M. SADIA à Bénerville n'a été obtenue qu'en été 2003. Ces dernières ont été mises en place le 9 juillet 2003, au N-NE des deux premières implantées le long de la D513, puis protégées par un regard en béton.

Le tableau 4 ci-après précise la localisation de ces deux bornes ainsi que leurs coordonnées. Les photographies 3 et 4 présentent les bornes H et L et leur environnement.

site	n° du repère	nature du repère	Coordonnées du repère (Lambert zone I)		remarques
Site de Bénerville	H	borne ciment avec embase de nivelle + regard en béton	433 233	185 304	située sur la propriété de M. Sadia, le long de la clôture ouest, au droit du terrain de tennis
	L	borne ciment avec embase de nivelle + regard en béton	433 327	1/85 339	située sur la propriété de M. Sadia, le long de la clôture est, au droit du terrain de tennis

tableau 4 : caractéristiques et coordonnées des bornes H et L implantées sur le site de Bénerville

photographie 3 et photographie 4 : environnement des bornes H (à gauche) et L (à droite) implantées dans la propriété de M. SADIA à Bénerville.