



DOCUMENT PUBLIC

## *Étude du littoral Cauchois (Haute-Normandie, Picardie)*

*Méthode descriptive des falaises côtières crayeuses à partir  
de photos aériennes obliques, dans l'optique de l'évaluation  
de leur sensibilité à l'érosion*

Programme financé par les fonds européens INTERREG II

septembre 2000  
BRGM/RP-50670-FR





DOCUMENT PUBLIC

## *Étude du littoral Cauchois (Haute-Normandie, Picardie)*

*Méthode descriptive des falaises côtières crayeuses à partir  
de photos aériennes obliques, dans l'optique de l'évaluation  
de leur sensibilité à l'érosion*

Programme financé par les fonds européens INTERREG II

J. L. Vila

septembre 2000  
BRGM/RP-50670-FR



Mots clés : Falaises, Craie, Littoral, Platier, Photos aériennes obliques, Erosion, Sensibilité à l'érosion, Effondrement, Méthode descriptive, Lexique, Caux, Haute-Normandie, Picardie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Vila J.L. (2000) - Étude du littoral Cauchois (Haute-Normandie, Picardie). Méthode descriptive des falaises côtières crayeuses à partir de photos aériennes obliques, dans l'optique de l'évaluation de leur sensibilité à l'érosion. BRGM/RP-50670-FR, 37 p., 8 fig., 1 tabl., 2 cartes.

© BRGM, 2000, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## **Synthèse**

**M**is en place sur les Fonds Européens de Développement Régional dans le cadre des « Initiatives Communautaires Interreg II », le programme ROCC (Risk Of Cliff Collapse) propose une recherche sur « la sensibilité à l'érosion des falaises côtières crayeuses de l'espace Rives-Manche ».

Le rapport présente le travail effectué sur quelques 450 photos aériennes obliques des falaises crayeuses du littoral Cauchois entre le Cap d'Antifer (Seine-Maritime ; photo 070) et Ault (Somme ; photo 493) en Haute-Normandie et Picardie, France. La mise au point d'une grille de lecture des falaises permet, par l'application d'un lexique selon une méthode descriptive précise, de relever les éléments susceptibles d'apporter des explications à leur érosion et, en particulier, leur effondrement. La finalité est de voir si cette technique permet la segmentation (identification de segments de côte en tant qu'unités homogènes) du littoral et la création d'une carte de sensibilité à l'érosion des falaises.

Outre la méthode, le rapport donne donc la démarche adoptée pour l'interprétation des photos, les résultats obtenus ainsi qu'un test de reproductibilité. Ce dernier renseigne sur la constance ou l'évolution du travail effectué en comparant les interprétations réalisées à deux dates différentes d'une même photo.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	7
<b>2. Le programme ROCC</b> .....	9
<b>3. Géologie générale</b> .....	11
3.1. Structure géologique (carte 2) .....	11
3.2. Lithostratigraphie .....	11
<b>4. Les photos et leur apport dans la problématique</b> .....	13
<b>5. Lexique</b> .....	17
5.1. Lexique .....	17
5.2. Remarques générales .....	23
<b>6. Procédure technique concernant le travail sur les photos aériennes obliques des falaises du pays de Caux (Seine-Maritime/Somme - France)</b> .....	25
6.1. Vérification des photos .....	25
6.2. Préparation des photos .....	25
6.3. Mosaïquage des photos .....	27
6.4. Dessin .....	29
<b>7. Résultats et reproductibilité du travail</b> .....	31
7.1. Résultats .....	31
7.2. Test de reproductibilité de l'interprétation .....	31
<b>8. Conclusion</b> .....	35
<b>Bibliographie</b> .....	37

## Liste des illustrations

Fig. 1 - Photo aérienne de falaise du pays de Caux en vue oblique (photo n° 446 au sud-ouest du « Tréport »).....	14
Fig. 2 - Travail préparatoire des photos sans rotation.....	26
Fig. 3 - Travail préparatoire des photos avec rotation. ....	26
Fig. 4 - Calage des photos (photo n).....	27
Fig. 5 - Calage des photos (photo n et n + 1).....	29
Tabl. 1 - Qualité des photos aériennes obliques du littoral Cauchois.....	23
Carte 1 - Localisation géographique du littoral Cauchois (Haute-Normandie, Picardie)...	10
Carte 2 - Carte géologique du pays de Caux et légende simplifié.....	13



## 1. Introduction

Les falaises côtières crayeuses de Haute-Normandie, de Picardie et de l'East Sussex en Angleterre inquiètent responsables et décideurs car elles sont le lieu de phénomènes d'érosion qui se traduisent, notamment, par des chutes de blocs de craie imprévisibles et inéluctables. De petits événements (blocs de quelques décimètres cubes) restent anodins et passent souvent inaperçus, mais des phénomènes de plus grande ampleur (plusieurs milliers de mètres cubes) se manifestent régulièrement par de grands effondrements le long des côtes de l'espace Rives-Manche, comme à Ault (Somme) en octobre 1998, à Beachy Head (Sussex, Angleterre) en janvier 1999, à Veules-les-Roses (Seine-Maritime) en juillet 1999 et plus récemment à proximité de Dieppe (Seine-Maritime) en mai 2000.

Conséquents ou non, ces effondrements posent un problème pour la sécurité du public dans les zones fréquentées telles que : Étretat en France ou Brighton en Angleterre mais aussi pour l'intégrité des structures en place. Cette érosion est dangereuse pour les personnes, les biens et nuit évidemment au tourisme.

La gestion de ce type de littoral est difficile et les ouvrages de protection classique utilisés (enrochements en pied de falaise, épis pour retenir les galets dont l'accumulation peut constituer un amortisseur de houle...) restent ponctuels, souvent mal adaptés et inefficaces à long terme. Ils sont cependant toujours coûteux. C'est pourquoi les services techniques et responsables de collectivités territoriales ont besoin, pour guider leurs choix de gestion, d'une image globale du littoral, de l'évolution de sa sensibilité à l'érosion ainsi que les facteurs terrestres et marins qui y contribuent.

Les falaises crayeuses font actuellement l'objet d'un programme, mené dans le cadre du Contrat Plan Inter-régional du Bassin de Paris (CPIBP), qui a pour objectif de dresser un constat sur l'évolution historique du trait de côte et des stocks de galets. Mais cette approche reste insuffisante car elle accorde une importance primordiale aux effets de la houle alors que, sans en connaître tenants et aboutissants, il est désormais acquis que d'autres facteurs impliquant la structure du massif (fissuration...) et/ou les conditions climatiques (pluie, vent, gel...) par exemple, conduisent au déclenchement d'effondrements et à une érosion plus générale.

C'est dans ce contexte qu'est né le projet franco-anglais ROCC (*Risk Of Cliff Collaps*) développé dans le cadre d'Interreg II (programme inter-régions) dont les deux objectifs sont de comprendre et d'identifier les facteurs conduisant au déclenchement des effondrements et la création d'une carte de sensibilité à l'érosion des falaises associée à un SIG compilant les informations. Ce travail s'inscrit dans ce projet et devrait apporter des éléments de réponse quant au recul des falaises par la détermination d'objets liés à l'érosion en général et aux effondrements en particulier.

Le rapport présente donc l'analyse de photos aériennes obliques du littoral. La mise au point de cette méthode de description des éléments (objets structurels ou engendrés par l'érosion, observables sur les photos) en relation avec les effondrements, nous a permis d'élaborer un lexique. Cet outil est une sorte de grille de lecture de la falaise qui, appliquée sur la totalité du linéaire, devrait permettre la segmentation du trait de côte en grandes unités répondant à des processus d'érosion similaires.

Un travail d'élaboration de la grille de lecture avait été réalisé (J.L. Vila, *Étude du littoral Cauchois*, juillet 2000, rapport de DESS, BRGM) dans un premier temps sur une zone d'essais de quelques kilomètres aux environs de Dieppe. Ce rapport présente donc l'analyse complète des photos obliques prises entre la Valleuse d'Antifer (Nord-Ouest du Tilleul) et Ault.

## **2. Le programme ROCC**

Mis en place sur les Fonds Européens de Développement Régional dans le cadre des « Initiatives Communautaires Interreg II », le programme ROCC (Risk Of Cliff Collapse) est un exemple de collaboration franco-anglaise qui propose une recherche sur « la sensibilité à l'érosion des falaises côtières crayeuses de l'espace Rives-Manche ».

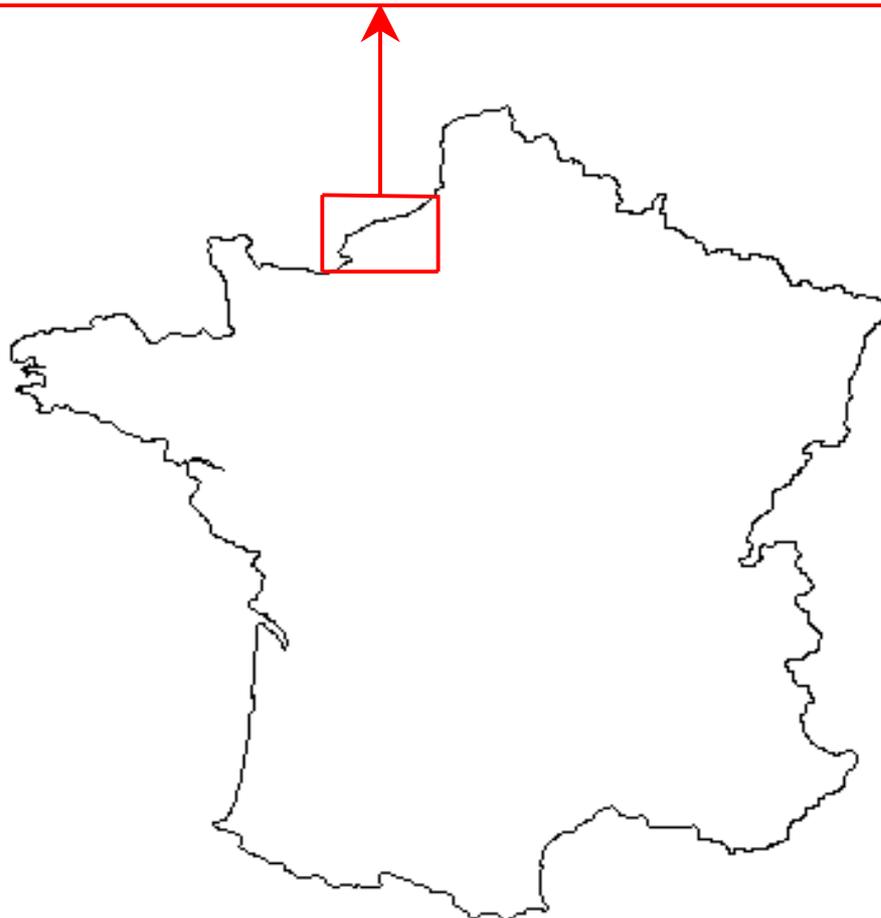
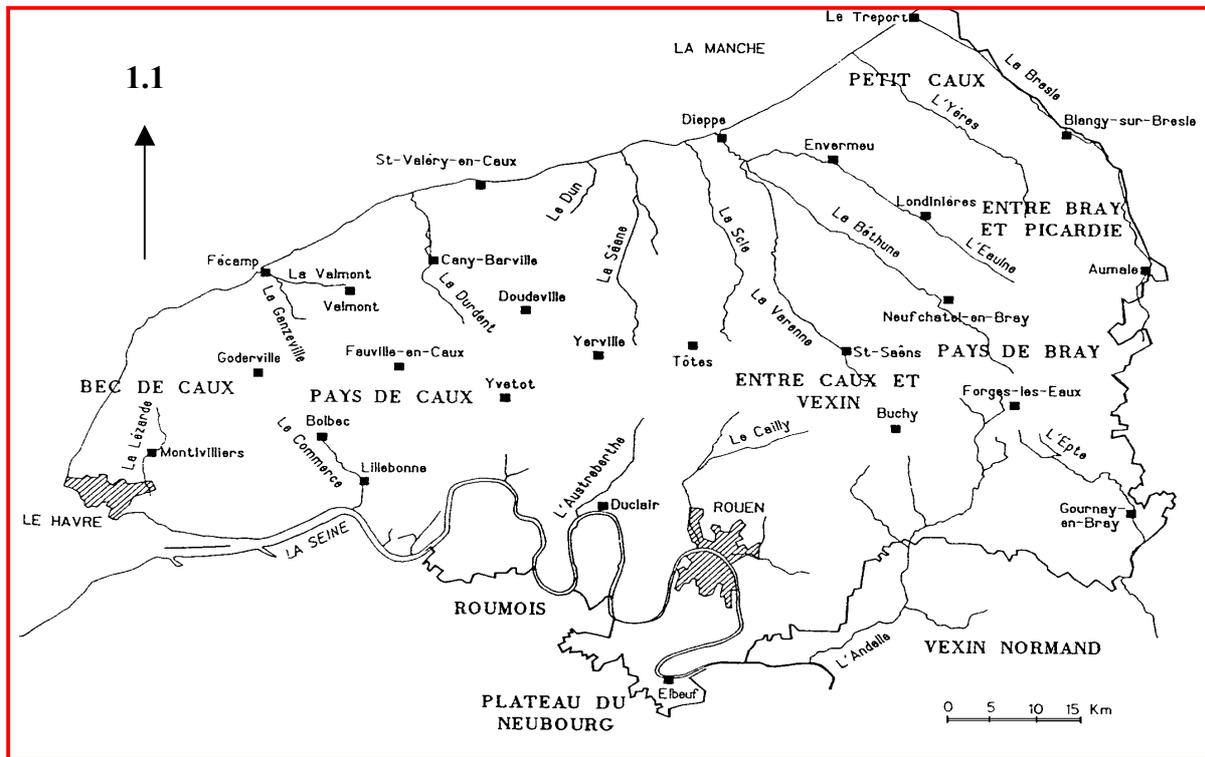
L'originalité de ces falaises réside dans le fait que les phénomènes d'érosion qui les affectent sont à la fois liés à des paramètres endogènes (propres au massif crayeux) et exogènes (climatique, marin...). Ainsi, la stabilité dépend de leurs caractéristiques structurelles (lithofaciès, fracturation), de leurs caractéristiques mécaniques et hydrauliques et des sollicitations d'origines diverses (contraintes tectoniques locales). Ceci est associé aux paramètres externes liés au climat (pluie, vent, gel, soleil...) et à la mer (marées, houle, cordon de galets, morphologie du platier...), le tout conduisant, notamment, à la fissuration (par fatigue, décompression, alternances sec-humide, contrastes thermiques...) et la fragilisation du matériau par infiltration d'eau (mise en charge, dissolution, gélifraction).

Ce sujet, particulièrement complexe, nécessite des compétences scientifiques très diverses (géologie, géotechnique, géophysique, hydrogéologie, géomorphologie, mécanique, océanographie), réunies au sein de l'équipe pluridisciplinaire du programme ROCC. Labellisé par le comité scientifique INSU (Institut National des Sciences de l'Univers)/CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) du PNRN (Programme National sur les Risques Naturels), le projet associe, entre autres, le BRGM et les universités du Havre, de Rouen, d'Amiens et de Brighton.

Les zones d'étude concernées par ce projet sont les littoraux à falaises crayeuses du pays de Caux (Haute-Normandie, Picardie : carte 1) et de l'East Sussex (Sud de l'Angleterre). À l'issue de l'étude, les chercheurs devront proposer une classification selon la sensibilité à l'érosion de l'ensemble du linéaire côtier en identifiant, par segment de littoral, le ou les facteurs prépondérants. Ceci est actuellement envisagé par une méthode de type SIG combinant les différents paramètres et permettant de connaître avec plus de certitude les zones critiques et de prévoir leur mise en sécurité.

En résumé, ROCC doit fournir aux gestionnaires et aménageurs de l'espace Rives-Manche les outils d'aide à la décision suivants :

- SIG sur CD-Rom comportant plusieurs niveaux d'informations relatives aux facteurs conduisant au déclenchement des effondrements de falaise ;
- des rapports scientifiques expliquant le rôle et la contribution des ces différents facteurs ;
- des cartes à différentes échelles identifiant des tronçons de falaise plus ou moins sensibles.



Carte 1 - Localisation géographique du littoral Cauchois (Haute-Normandie, Picardie).

## 3. Géologie générale

### 3.1. STRUCTURE GÉOLOGIQUE (carte 2)

La structure géologique actuelle de la région est assez simple. Il existe un pendage faible (1 à 3 % en moyenne) vers l'est, les horizons de plus en plus récents apparaissant progressivement dans cette direction.

Les terrains les plus anciens, affleurant au Havre, sont datés du **Jurassique** mais la série crayeuse de Normandie se développe principalement au **Crétacé** : du **Cénomanién** au **Campanien**. La teneur en carbonate de calcium voisine de 50 % à la base, augmente rapidement pour atteindre 80 % au Cénomanién moyen ; elle varie ensuite entre 80 et 90 % (selon N. Wazi, T. Leboulanger, A. Tomat et G. Saignes, 1988).

### 3.2. LITHOSTRATIGRAPHIE

D'après « l'étude préliminaire à l'exploitation de la nappe de la craie dans la région d'Yport et d'Étretat » du BURGEAP, (1976), la craie, dont l'épaisseur totale peut atteindre 200 m, a été divisée en plusieurs étages :

**Sénonien** : craie blanche pure, avec lits de rognons de silex le plus souvent noirs.

**Turonien** : craie blanche à grisâtre avec lits de rognons de silex. Difficile à distinguer du Sénonien, elle ne diffère que par une teneur généralement plus forte en argile.

**Cénomanién** : craie à silex, argileuse, gréseuse ou silicifiée en Gaize, ponctuée de grains de glauconie verte qui la distingue des autres faciès crayeux.

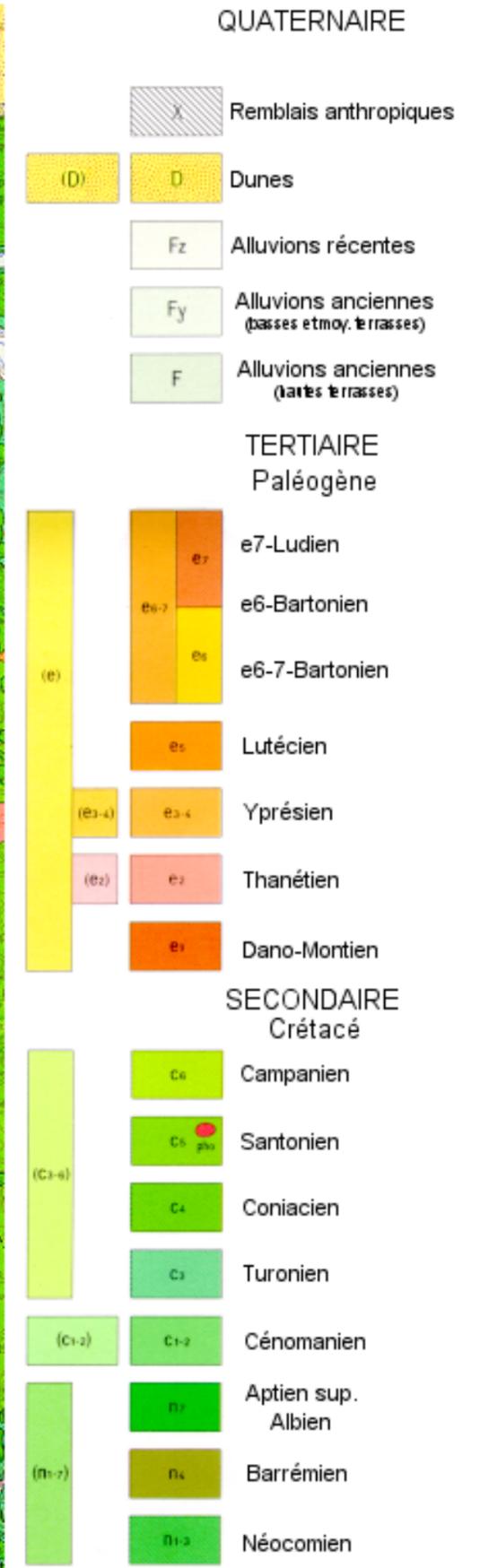
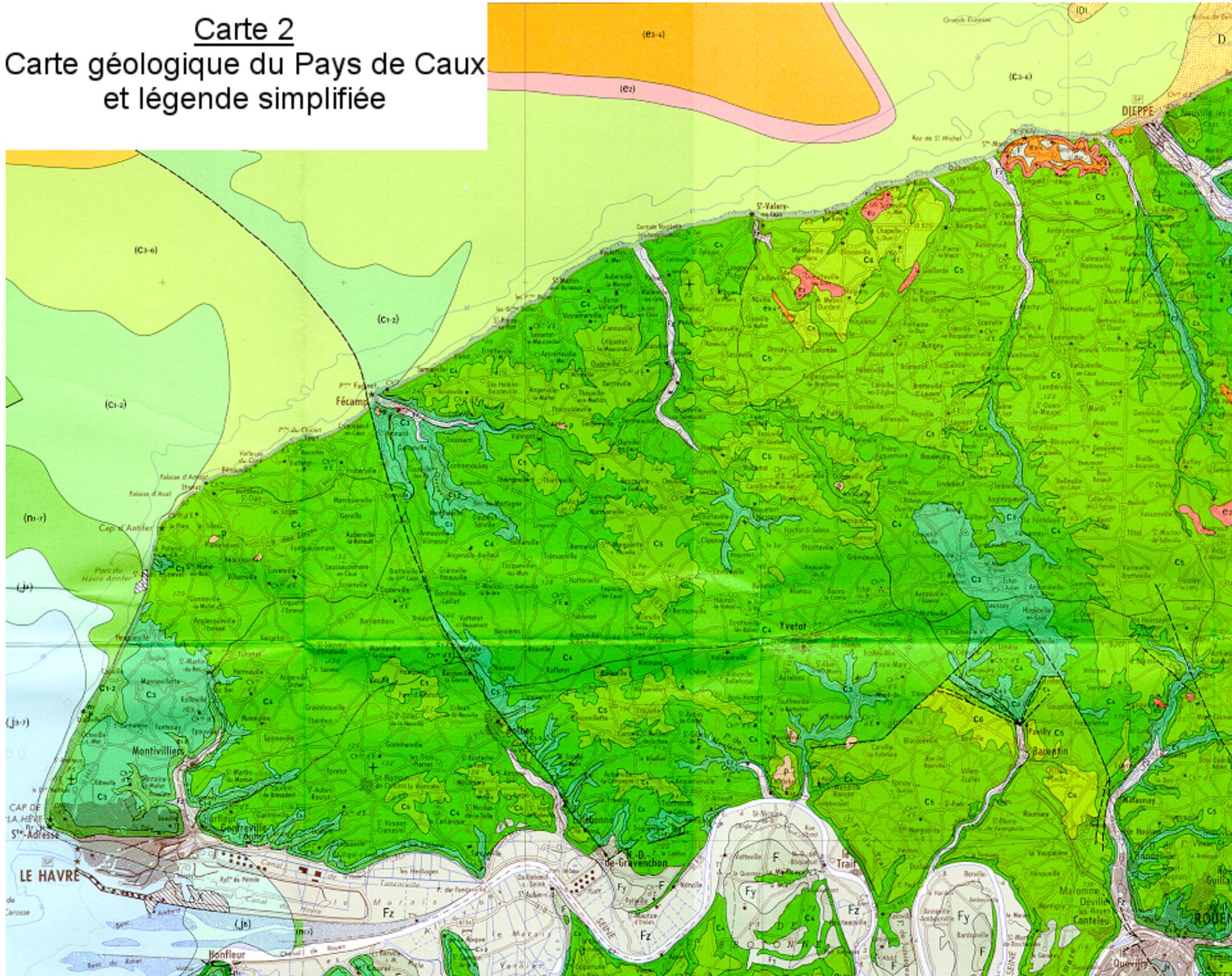
La **base du Cénomanién** est constituée de sables fins glauconieux verts ou noirs, contenant parfois beaucoup d'argile. Il arrive que cette formation se distingue mal du Crétacé inférieur.

#### • Les formations sous-jacentes à la craie (source BURGEAP, 1976) :

**Crétacé inférieur** : sous les sables cénomaniens, on rencontre généralement les argiles grises ou noires du Gault (**Albien**, qui affleure dans la falaise littorale, au sud de Saint-Jouin) qui constituent le mur imperméable de la nappe de la craie et le toit de la nappe des « sables verts ».

**Jurassique** : le **kimméridgien**, qui forme le substratum de la nappe des « sables verts », est constitué d'argiles gris-bleu comportant des intercalations calcaires.

**Carte 2**  
Carte géologique du Pays de Caux  
et légende simplifiée



## 4. Les photos et leur apport dans la problématique

Ces photos, dites « obliques » (fig. 1) appartenant à la DDE de Seine-Maritime, ont été prises par avion en 1986. en longeant la côte à plusieurs dizaines de mètres au-dessus de la mer et en regardant latéralement la falaise et le platier. Elles représentent, selon l'ordre dans lequel elles sont numérotées, un linéaire allant du port du Havre (photo n° 001), en passant par Dieppe (photo n° 326), jusqu'à Ault (photo n° 493) pour un total réel de 450 photos soit 140 km de côte.

Le travail effectué sur celles-ci s'inscrit dans la thématique générale du projet ROCC et doit, à terme, contribuer à la segmentation (identification de segments de côte en tant qu'unités homogènes) du linéaire et à la création d'une carte de sensibilité à l'érosion des falaises par le biais d'un SIG.

Cela implique une description précise de tout le linéaire par la représentation des éléments qui affectent ou composent la falaise. Il peut s'agir d'éléments traduisant aussi bien des phénomènes d'érosion, d'altération, de structure du massif que le résultat lui-même : les effondrements (cf. lexique). Il faut préciser qu'il s'agit d'une recherche sur l'érosion liée aux éboulements et que l'on exclut tous les autres éléments à l'étude comme le rôle de la houle ou les niveaux de nappe par exemple, sans doute aussi concernés mais non observables dans le cadre fixé.

La difficulté d'obtenir une vision de la globalité du trait de côte a justifié le choix des photos aériennes obliques comme support d'investigation. Leur potentiel est important mais demande une exploitation particulière. Sans toutefois donner les mécanismes, il s'agit avant tout d'identifier et de relever les éléments susceptibles d'apporter des explications dans les effondrements de falaise. La mise au point d'une grille de lecture (méthode descriptive et lexique) de ces éléments devrait permettre d'établir des corrélations, si elles existent, entre eux et les éboulements.

### **Objectifs**

- Travailler à partir de ces photos évite de parcourir à pied les 140 km de côte tout en permettant à la fois une approche régionale et une analyse fine (échelle moyenne : 1/3 000).
- Déterminer ce qu'il y a à relever sur les photos aériennes obliques.
- Identifier des éléments liés aux effondrements. Ils renseignent sur l'état des lieux à un moment donné, sur les éboulements et les zones potentiellement dangereuses.



*Fig. 2 - Photo aérienne de falaise du pays de Caux en vue oblique (photo n° 446 au sud-ouest du « Tréport »).*

- Voir si le fait de symboliser la falaise permet sa segmentation en grands domaines ayant des comportements spécifiques ou des organisations particulières (identification de segments, notion d'unités homogènes sculptées par un même élément ou la même association d'éléments).
- Décrire en série simple la falaise et ses abords en utilisant des symboles caractérisant les observations.
- Obtenir une méthode de description fiable, basée sur un lexique compilant les éléments observés.



## 5. Lexique

La comparaison photos-terrain nous a permis de dresser une liste d'objets qui se présente sous la forme d'un lexique. Il est nécessaire pour la description et la compréhension de l'ensemble des éléments relevés sur la falaise dont certains sont susceptibles d'être utilisés pour l'identification des processus en jeu dans les effondrements. Il apporte, en outre, les données nécessaires à la compréhension du travail final, c'est-à-dire l'interprétation des photos sous forme de bandeaux représentant le linéaire côtier symbolisé.

Ce lexique définit donc chaque symbole, la réalité qu'il représente et les limites en deçà desquelles il est inutile de relever les objets : limites en taille et en nombre, la résolution des photos est bonne (grande marge de zoom) mais il n'est pas nécessaire de relever des objets trop petits, souvent ponctuels et peu représentatifs d'un réel processus. À l'inverse, plus ils sont conséquents et plus ils sont susceptibles d'avoir un rôle significatif.

### 5.1. LEXIQUE

- Les limites de la falaise et du platier définissent la zone géographique du champ observable (et observé sur la photo), elles apportent, en outre, un support spatial aux autres éléments.

——— **Emprise sur le plateau** : ligne noire continue qui longe le bord du plateau, séparant ainsi la zone plate (subhorizontale) de la falaise et ses abords. Elle révèle l'emprise de la falaise sur le plateau c'est-à-dire la profondeur d'entaille des différents objets relevés (karsts, cônes d'arrachages, valleuses,...) sur le massif crayeux. Cette limite peut être très reculée par rapport au bord vertical (marqué par le symbole suivant) dans le cas de petites valleuses qui affectent le plateau (exemple « Bois de Cise » photos 481/480) ou encore se confondre avec ce même bord lorsqu'il n'y a aucune transition entre plateau et falaise verticale (absence d'emprise). Aux endroits où de grandes vallées abaissent la falaise jusqu'à ce que celle-ci disparaisse (cas des ports et grandes villes comme Dieppe, photos 325/322 ou Le Tréport, photos 464/454), la limite s'abaisse également jusqu'au cordon de galet (plage).

----- **Bord de falaise** : ligne noire discontinue qui longe le bord de la falaise verticale. Elle délimite, avec la ligne précédente, un bloc de transition entre la zone de plateau et la zone en paroi qui provient de l'usure du toit de la craie affecté par de grands karsts ou des cônes d'arrachages. Cette limite peut atteindre le sol, dans les cas de karsts évidés jusqu'au niveau des galets et de valleuses non perchées, ou disparaître, remplacée par le symbole précédent lorsqu'il s'exprime au même endroit.

*Remarque* : le bloc délimité par les limites de la falaise (ligne noire en pointillé) et l'emprise de la falaise (ligne noire pleine) existe par la présence de poches de dissolution (associées à des karsts) ou par la présence d'un sol développé au toit de la craie dont l'érosion s'exprime par des cônes d'arrachage. Ce bloc est visible presque partout mais, parfois peu marqué (pas de karst) et bien vertical (le sol recouvrant la craie est peu épais et stabilisé), il n'est pas représenté (photo 263 par exemple).

||||||| **Limite inférieure du platier** : ligne noire hachurée limitant la zone recouverte par l'eau de mer où l'on ne peut donc rien distinguer du platier visible.

*Remarque* : sur le platier, il n'apparaît principalement que des failles, des figures d'érosion (ou identifiées comme telles) et des traces d'effondrement. Cette limite s'est imposée d'elle-même afin de distinguer les zones recouvertes par l'eau de celles non recouvertes mais où rien n'est observable (sable) ou traduisible avec notre grille (pas de symbole prévu pour des objets sans relation avec les effondrements).



**Cordon de galets** : représentation des galets bordant le littoral, reconnaissables à leur texture grumeleuse. La falaise s'élève généralement à partir de sa limite supérieure alors que le platier s'étire à sa limite inférieure. Il borde donc le pied de falaise, transition entre les zones horizontale et verticale. Il peut parfois être recouvert par des éboulis ou disparaître complètement. Dans ce dernier cas, il n'y a pas de limite entre le platier et la falaise ce qui peut poser un problème de reconnaissance des différentes zones.

*Remarque* : le cordon est parfois jonché de craie éboulée dont il faut faire abstraction surtout si les blocs ne font pas partie d'un tas homogène. Si la densité de blocs au sol couvre une surface supérieure à celle de galets apparents, il faut en tenir compte bien que les éléments ponctuels n'apportent que peu d'informations.

Les symboles précédents délimitent des zones (plateau, emprise de la falaise, paroi, platier, mer) qui contiennent les éléments et figures suivants.

• **Les éléments structurels** : propres au bloc crayeux, on distingue :



**Discontinuités** : représentation des discontinuités que l'on peut associer à des failles, des diaclases ou à des joints. Les observations de terrain, plus ponctuelles, ont montré qu'il s'agissait principalement de failles normales et de joints trans-falaises. Elles apparaissent principalement sur la paroi et le platier mais il est parfois possible de les poursuivre sur le plateau ou sous le cordon de galet. Leur nombre par unité de surface est assez représentatif mais délicat à exploiter car certaines zones sont masquées par du sable, des algues, des résidus d'effondrement (platier) ou du matériel provenant de la dégradation du plateau (argile, terre, ...). En outre, les informations sont plus

ou moins visibles selon l'état de la paroi et le contraste des photos. Pour ces raisons, il est difficile d'observer les discontinuités dans leur intégralité (en falaise). Elles s'arrêtent parfois toutes à la même hauteur mais il ne faut pas en déduire la présence d'une couche particulière.

*Remarque* : c'est autant de raisons qui ne permettent pas de réaliser d'analyses statistiques fines et, compte tenu du mode de prises de vues et du traitement des photos, d'obtenir des données précises sur les directions de fracturation et le pendage (déformations géométriques des photos et rotation).



**Miroirs de faille** : identifiables comme tels par leur aspect plan et lisse, ils apparaissent du fait de la présence simultanée de deux éléments : une faille et un éboulement. Ces plans ont limité et/ou favorisé un éboulement ; ils n'affectent que la paroi.

*Remarque* : certains d'entre eux sont difficiles à identifier notamment lorsque les failles, dont ils sont issus, sont parallèles au bord de falaise ; on les regarde alors de face.



**Lithostratigraphie** : ces lignes, généralement horizontales, identifient sur la paroi, les hard-grounds, les joints de stratification ou les surfaces d'érosion (non différenciables par les photos seules) les plus visibles dont la trace peut être cartographiée sur tout ou partie de leur longueur. Il est inutile de relever chaque niveau *a fortiori* s'il est impossible de les suivre de manière continue. Par contre, il sera judicieux de caler ultérieurement cette lithologie par rapport aux descriptions faites par les géologues stratigraphes.

*Remarque* : affectée par les discontinuités et le relief, la lithostratigraphie disparaît souvent sous les éboulis et les coulées de matériel issues du plateau.

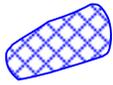
- **Les figures d'érosion** : elles ne sont pas liées aux effondrements mais marquent l'érosion des couches lithostratigraphiques du massif (paroi et platier) par les éléments (mer, vent, gel, pluie, ...) :
- *Causées par les éléments climatiques, hydrologiques*



**Creusements, cavages** de la paroi plus ou moins profonds, identifiables par un surcreusement marqué à cet endroit et de forme concave vers la mer. Certaines couches sont plus affectées que d'autres par ce cavage qui résulterait alors d'une dissolution préférentielle. On peut donc suivre cette concavité sur une grande distance horizontale le long de la falaise. On pourra ensuite la caler en fonction de la lithostratigraphie (voir photos 360 à 450).

*Remarque* : ce symbole est aussi utilisé dans un cas particulier concernant un niveau meuble surmontant la paroi (falaise du « port de Morville » au « Petit

Ailly », photos 300 à 306). Il s'agit d'un chapeau argileux recouvrant la craie, associé à l'Eocène (cf. excursion dans les falaises de Haute-Normandie par Bignot, Guyader, Juignet (1978), réf. 80-00251, Bull. d'Inf. des Géol. du B.P., 15, 3, pages 46/47).



**Plans d'érosion inclinés** : surface proéminente par rapport à la paroi verticale. Recouverte ou pas par le matériel « per descendum », cette couche de craie, de composition différente par rapport aux couches avoisinantes, s'exprime par un plan incliné. De la même manière que le cavage, on peut suivre cette couche particulière concernée par ce type de structure sur une grande longueur de falaise.



*Remarque* : dans certaines zones telles que Etretat ou Fécamp, subsistent des aiguilles ou des avancées rocheuses dont la base est souvent une de ces couches particulières moins sensibles à l'érosion (exemple : photos 119/121). Afin de les mettre en évidence, ces avancées rocheuses encore en place sont représentées par le symbole ci-contre.

#### • *Marines*



**Erosion du pied de falaise** : elle n'affecte que le pied de falaise en le surcreusant. Cette érosion marine est visible partout, la mer érodant le massif crayeux, mais elle est par endroit d'une très grande amplitude. Le résultat se traduit par un sous-cavage prononcé du bas de la falaise formant de profondes crevasses.

*Remarque* : il est envisageable, compte tenu du pendage faible de 1 à 2 % qui affecte les couches de craie, que l'une d'entre elles, d'abord en pied de falaise, présente les caractéristiques décrites ci-dessus (et donc le symbole) puis que, par élévation de cette couche largement au-dessus du niveau de la mer, ce soit le symbole du « creusement, cavage » et non de « l'érosion marine » qui soit utilisé.



**Élargissements le long des discontinuités** : trous en pied de falaise, de forme triangulaire typiquement due à l'élargissement des discontinuités de ce pied (parfois à l'origine du sous-cavage qui s'étend à partir de ces zones fragilisées). Les discontinuités (failles, joints) jouent le rôle de nucléus vis-à-vis de l'érosion marine.

*Remarque* : il est parfois difficile de différencier ces deux derniers symboles. Cependant, la présence systématique d'une discontinuité avec la pointe du triangle vers le haut permet de reconnaître l'objet décrit présentement.



**Chenaux surcreusés sur le platier** : lignes continues indiquant les crevasses majeures visibles sur le platier. Celles-ci bordent généralement l'eau et

remontent en se rétrécissant vers le pied de falaise. Elles pourraient, en partie, être engendrées par l'élargissement des discontinuités par le ressac mais leur nombre et le fait qu'elles soient toutes perpendiculaires à la mer ne permet pas de l'affirmer.



**Formes arrondies sur le platier** : représentation d'un résultat de l'érosion par la mer qui s'exprime par des lignes sinueuses et parallèles ; apparemment liées à la lithostratigraphie. Ces lignes correspondraient, en effet, à l'intersection entre des niveaux lithostratigraphiques particuliers et le platier.

- **Figures d'altération et de dissolution**, elles s'expriment de deux manières :



**Cônes de dissolution** : la falaise propose une coupe verticale du massif crayeux dont le toit est très altéré et dissout. Il apparaît entre « l'emprise sur le plateau » et « le bord de falaise simplifié » des cônes de dissolution bien visibles et parfois très profonds que l'on peut associer à des karsts. Le matériel argileux et les silex qu'ils contenaient ont été évidés et remobilisés par la mer. Ils sont tous représentés du moment qu'ils présentent un aspect conique plus ou moins profond (de l'ordre de quelques mètres). Dans le cas d'une succession de cônes, le symbole se présente sous forme d'une bande continue avec des pointes dirigées vers le bas représentant le fond visible des karsts.



**Anciens exutoires en falaise** : trous en pleine falaise, soit alignés le long d'un niveau lithostratigraphique particulier, soit sous un entonnoir de dissolution. Vues en coupe d'anciens conduits ou d'un ancien niveau de résurgence de nappe, ils sont à associer à des circulations d'eau dans le massif de craie (dollines, bétoires).

*Remarque* : ce symbole est aussi utilisé lorsque apparaissent, sur le plateau, des poches de dissolution formant des points d'eau.

- **Les effondrements** : il en existe différents types (par glissements, rotationnels, ...) qui ont déjà été décrits (cf. rapport CETE, 1980) et qui renseignent sur le mode d'éboulement. Cette méthode ne permet pas de tels discernements. Néanmoins, il est possible de proposer un début de classification fondée sur l'observation (traces laissées en paroi) et le volume mis en jeu (tas de craie tombée sur le platier). Ce sont deux éléments bien distincts, il y a ce qui tombe et la trace laissée par ce qui tombe :

- **Gros volume de craie (en millier de m<sup>3</sup>)**



**Traces sur la falaise** : ce symbole délimite, en paroi, la zone d'où s'est détaché un gros volume de craie (encore au sol ou en trace évidente).

- **Volume de craie plus restreint (de l'ordre du m<sup>3</sup>)**



**Cônes d'arrachage ou loupes de glissement** : traces, laissées suite à un éboulement, en forme de cône ou de verre de loupe. S'exprimant plutôt dans du matériel argileux, ils sont souvent présents en haut de falaise dans la zone située entre « l'emprise de la falaise » et « le bord de falaise ». On ne retrouve pas ou peu de résidus sur le platier qui ont probablement été dissous par la mer.

*Remarque* : il est parfois difficile de différencier cônes de dissolution et cônes d'arrachage d'autant plus que le premier peut contenir le deuxième. De fait, si un cône est associé de manière évidente à un karst, il est représenté comme tel sinon, c'est un cône d'arrachage. Il ne s'agit jamais de ravinement.



**Dépilements des blocs par le bas** : détachement de blocs le long des failles ou diaclases (vertical) et de joints de stratification (horizontal) laissant sur la paroi une trace anguleuse en marches renversées (effet de surplomb).

#### • **Eboulements**



**Délimitation d'un volume en pied de falaise et sur le platier** : craie effondrée encore en place, provenant de chutes récentes ou qui n'a pas encore été complètement évacuée par dissolution de la craie. Ils couvrent aussi bien le bas de la falaise et ses discontinuités que les galets.

*Remarque* : il peut aussi s'agir de petits effondrements ponctuels ou encore de blocs assez conséquents (de l'ordre de quelques mètres cubes).



**Eboulements en traces sur le platier** : limite au sol d'anciens gros effondrements presque entièrement évacués par la mer mais qui subsistent en trace. Le cordon de galet est visible par exemple.

- **Figures hydrauliques** : il y a de nombreuses résurgences de nappe en falaise et au pied qui attestent de la présence d'un niveau piézométrique, d'une couche imperméable ou d'un débouché karstique. Ces figures hydrauliques, représentant des éléments dynamiques, sont difficiles à inventorier de manière systématique.



**Points de résurgence de nappe** : écoulements d'eau sur la paroi et le platier caractérisés par une zone très nettoyée par le ruissellement avec, à sa périphérie, une autre zone couverte d'algues.

## 5.2. REMARQUES GÉNÉRALES

- Choix de l'échelle pour le calage des photos : 1 pixel = 1 mètre (au changement d'échelle des séries, la falaise est simplement plus ou moins proche).
- Qualité des photos (sur une échelle de - - - à + + +) :

Photos	Qualité	Remarques
001 à 092	+	qualité moyenne
093 à 145	++	changement brutal d'échelle à partir de la photo 93, série plus rapprochée ; bonne visibilité des objets en général
146 à 173	+	falaise assez éloignée et photos parfois floues
202 à 230	0	passage direct à la 202 ; qualité passable
232 à 248	-	l'éloignement rend le travail plus difficile
249 à 259	--	même éloignement que précédemment mais présence d'argile sur la paroi
261 à 283	---	falaise très éloignée donc trop petite pour tout observer
285 à 307	-	argile sur la paroi comme la série 232 à 259 mais falaise plus proche
309 à 313	0	passable
314 à 364	+	photos un peu floues
400 à 493	+++	changement brutal d'échelle à la photo 400, la falaise est très rapprochée ; très bonne qualité

**Tabl. 1 - Qualité des photos aériennes obliques du littoral Cauchois.**

- Certains éléments litigieux quant à leur catégorie, leur nombre ou leur taille (c'est-à-dire qu'ils sont à la limite de représentation) ne sont représentés que s'ils sont homogènes par rapport au reste, s'ils font partie d'un ensemble, par exemple.
- Les photos 300 à 360 ont fait l'objet d'une recherche systématique précise (notamment des discontinuités). De même, on peut considérer comme exhaustif les relevés d'éléments sur les photos de très bonne qualité (400 à 493) mais sur le reste des photos, le relevé est plus rapide, avec une visibilité parfois plus que douteuse et donc, sans doute, incomplet.
- En déterminant une symbolique précise décrivant les objets des photos, il apparaît quelques signes qui ne sont pas utilisés, peut être par erreur de lecture (impossibilité, par exemple, de différencier les types d'effondrement à la seule vue de la zone d'arrachage sur la paroi ou du volume éboulé sur le platier) ou parce qu'ils sont superflus (le symbole relevant la décompression a été abandonné parce qu'il est trop difficile de l'identifier). Le lexique, tel qu'il est présenté, ne reprend pas ces symboles.
- À l'inverse, le fait d'avoir créé ce lexique force à vouloir trouver et placer ces symboles précisément. Il faut donc être vigilant et ne pas chercher ce que l'on veut trouver mais chercher ce qu'il y a à voir pour ne pas passer à côté d'informations importantes.
- On cherche à segmenter un certain nombre d'informations (éléments relevés sur les photos). Le travail intéressant est donc de relever le plus de détails possibles quitte à

abandonner par la suite ceux qui n'apportent aucune information sur le sujet. Le lexique apporte donc une définition exacte du symbole et de ce qu'il caractérise.

- Il apparaît des zones où rien n'est représenté puisque aucun symbole ne représente ce qu'on peut y observer. Ceci ne signifie pas qu'il n'y a pas d'information, la légende n'intègre simplement pas de quoi décrire ces endroits. La question est de savoir si on représente tout en agrandissant les limites de représentation, s'il faut créer une symbolique supplémentaire ou s'il faut simplement les laisser tel quel (ce qui est déjà un critère de segmentation) ? Le fait est que la légende a dû être complétée par des symboles tel que la limite du platier par exemple.

## 6. Procédure technique concernant le travail sur les photos aériennes obliques des falaises du pays de Caux (Seine-Maritime/Somme - France)

### 6.1. VÉRIFICATION DES PHOTOS

Afin de savoir si toutes les photos numériques ont été convenablement gravées sur CD-rom et ce, avant de les ouvrir. Vérification des 460 photos (opération déjà effectuée) :

#### • Logiciel Paint Shop Pro 6.02

Cliquer sur « ouvrir »

Sélectionner « Afficher l'aperçu »

Cliquer une fois sur la photo à vérifier (s'affiche en icône si elle est lisible)

Renouveler l'opération pour chaque photo

« Ouvrir » pour ouvrir une photo ou « Annuler » pour quitter

### 6.2. PRÉPARATION DES PHOTOS

La taille des photos doit être réduite pour gagner du temps lors des différentes manipulations (ouverture et fermeture des photos, affichage sur mapinfo, ...). On récupère ainsi la zone géographique intéressante (plateau, falaise, platier) tout en conservant une zone de recouvrement indispensable au mosaïquage. On procède aussi à une éventuelle rotation de la photo pour conserver un linéaire bien droit. Si la dernière photo mosaïquée est la photo n, ouverture de la photo n + 1 ou n - 1.

*Pour les schémas descriptifs, le point vert est un point repère qui montre le recouvrement ; les lignes rouges représentent la falaise.*

#### **a) Cas d'une photo ne nécessitant pas de rotation**

#### • Logiciel Paint Shop Pro 6.02

Ouverture de la photo n + 1.

Outil « Recadrer » : sélection et découpage de la zone voulue.

Sauvegarde de la nouvelle photo selon la même numérotation.

Relever la taille de la photo (nombre de pixels en hauteur et largeur).

- ❶ Visualisation d'une photo.
- ❷ Récupération du centre de la photo où apparaît la falaise et le platier.
- ❸ Enregistrement de la nouvelle photo selon la numérotation décrite.

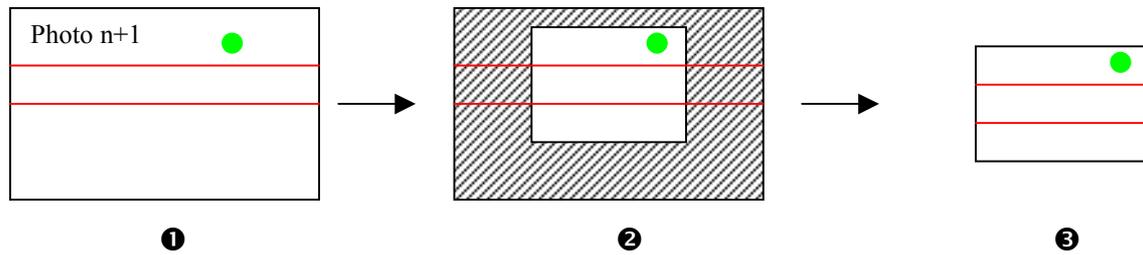


Fig. 3 - Travail préparatoire des photos sans rotation.

### b) Cas d'une photo nécessitant une rotation

#### • Logiciel Paint Shop Pro 6.02

Ouverture de la photo n + 1.

Procéder à un premier découpage car les photos font déjà 40 Mo environ et la rotation fait augmenter la taille du fichier (addition de bordure). Conserver malgré tout une bonne partie de l'image pour le découpage suivant.

Aller dans « Image » puis « Rotation » et choisir un angle de manière à obtenir un linéaire de falaise horizontale.

Outil « Recadrer » : sélection et découpage de la zone voulue.

Sauvegarde de la nouvelle photo selon la même numérotation.

Relever la taille de la photo (nombre de pixels).

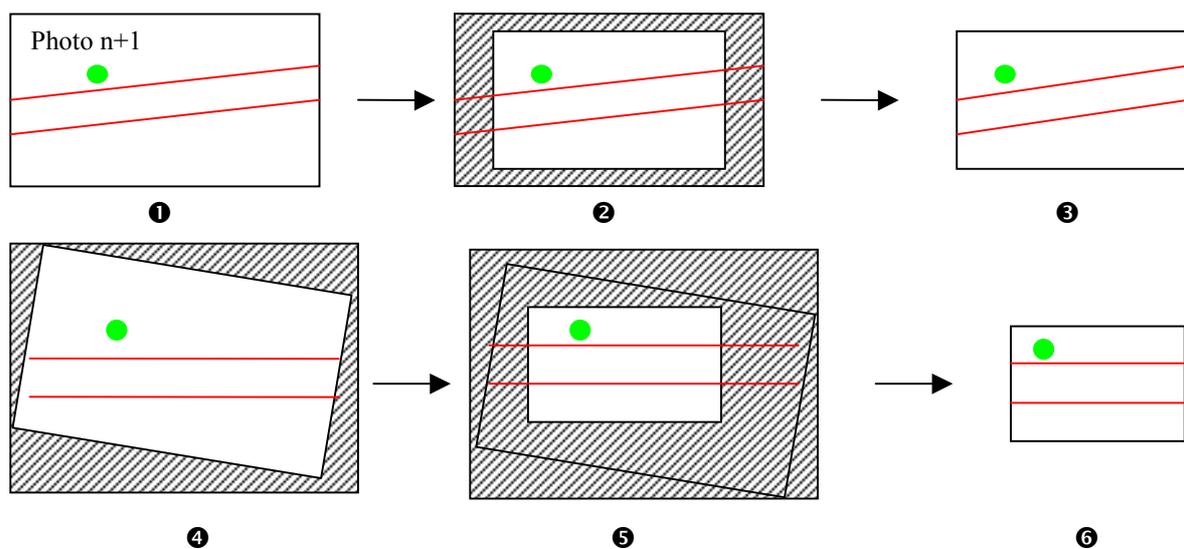


Fig. 4 - Travail préparatoire des photos avec rotation.

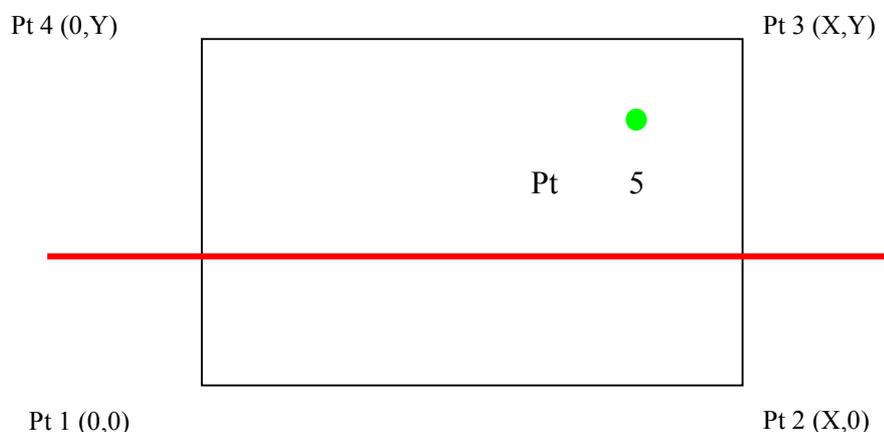
- ❶ Visualisation.
- ❷ Récupération d'une grande partie de la photo dans l'optique de découper à nouveau l'intérieur après la rotation (étape obligatoire si l'on ne veut pas retrouver des bordures dues de la rotation).
- ❸ Récupération d'une photo de petite taille.
- ❹ Rotation de l'image récupérée afin d'obtenir un trait de côte parallèle à la photo n.
- ❺ Redécoupage afin d'éliminer les bordures inutiles.
- ❻ Enregistrement de la nouvelle photo selon la numérotation.

### 6.3. MOSAÏQUAGE DES PHOTOS

#### a) Calage de la photo n

##### • Logiciel Mapinfo 5.5

La toute première photo est déclarée puis géoréférencée par ses quatre coins ; points 1 à 4 (le nombre de pixels en longueur et hauteur (X,Y) représente les coordonnées en x et en y). Afin de conserver un linéaire bien droit, le montage des photos bout à bout se fait selon une ligne repère (—) parfaitement horizontale, calée sur la première photo.



*Fig. 5 - Calage des photos (photo n).*

#### b) Calage de la photo n + 1

Afficher la dernière photo calée (photo n).

Cliquer sur « ouvrir ».

Sélectionner dans type de fichier « Raster image » et ouvrir la photo n + 1.

Cliquer sur « Déclarer » pour la déclaration de la photo (référencement).

Fenêtre « Calage image ».

« Projection » : choisir Catégorie « Non terrestre » et projection en « Non terrestre (mètre) ».

Création d'un point de calage.

Repérer un point commun aux deux photos n et n + 1 (point 5 dans notre exemple), si possible sur la falaise (centre de la photo qui doit être bien calée). Sur l'image, dans la fenêtre du bas de la fenêtre « Calage image », cliquer sur le point repéré (placer le point 1). Une fenêtre « ajouter un point de calage » apparaît, cliquer sur « OK ».

Dans la fenêtre « Calage image », sélectionner les coordonnées du point 1 en cliquant dessus (fenêtre du haut) puis, aller dans le menu « Table », « Image raster » et sélectionner « Point de calage » (ceci donne un nouvel outil en forme de croix, seulement actif sur la photo déjà calée).

Cliquer alors sur le point repéré précédemment mais dans l'image n ouverte au début et affichée en arrière plan. Une fenêtre « Modifier point de calage » apparaît (relever toutes les coordonnées), cliquer « OK » s'il est convenablement placé ou recommencer « Annuler ».

#### • Logiciel Excel 97

Ouvrir le document « Coordonnées »

Rentrer les données « Taille photo » relevées précédemment ainsi que les valeurs relevées dans la fenêtre « Modifier point de calage » soit « Carte x », « Carte y », « Image x » et « Image y ».

Les nouvelles coordonnées calculées par Excel correspondent aux quatre coins de la photo à caler (n + 1).

#### ***Calcul des coordonnées de la photo n + 1 à partir du point de calage :***

Point en bas à gauche :  $X = \text{carte } x - \text{image } x$

Pt 6  $Y = \text{carte } y - (\text{nombre de pixels en hauteur} - \text{image } y)$

Point en bas à droite :  $X = \text{coordonnée } X (\text{pt bas/gauche}) + \text{nombre de pixels en longueur}$

Pt 7  $Y = \text{coordonnée } Y (\text{pt bas/gauche})$

Point en haut à droite :  $X = \text{coordonnée } X (\text{pt bas/gauche}) + \text{nombre de pixels en longueur}$

Pt 8  $Y = \text{coordonnée } Y (\text{pt bas/gauche}) + \text{nombre de pixels en hauteur}$

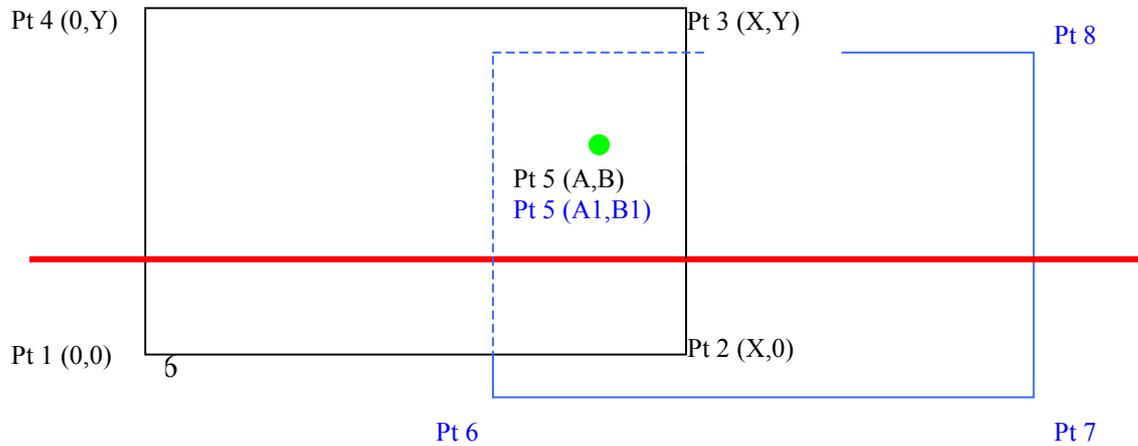
Point en haut à gauche :  $X = \text{coordonnée } X (\text{pt bas/gauche})$

Pt 9  $Y = \text{coordonnée } Y (\text{pt bas/gauche}) + \text{nombre de pixels en hauteur}$

#### • Logiciel Mapinfo 5.5

Dans la fenêtre « Calage image », rentrer les coordonnées des coins, l'erreur doit être de zéro pixel.

Cliquer sur « OK », la photo s'affiche calée sur la précédente...

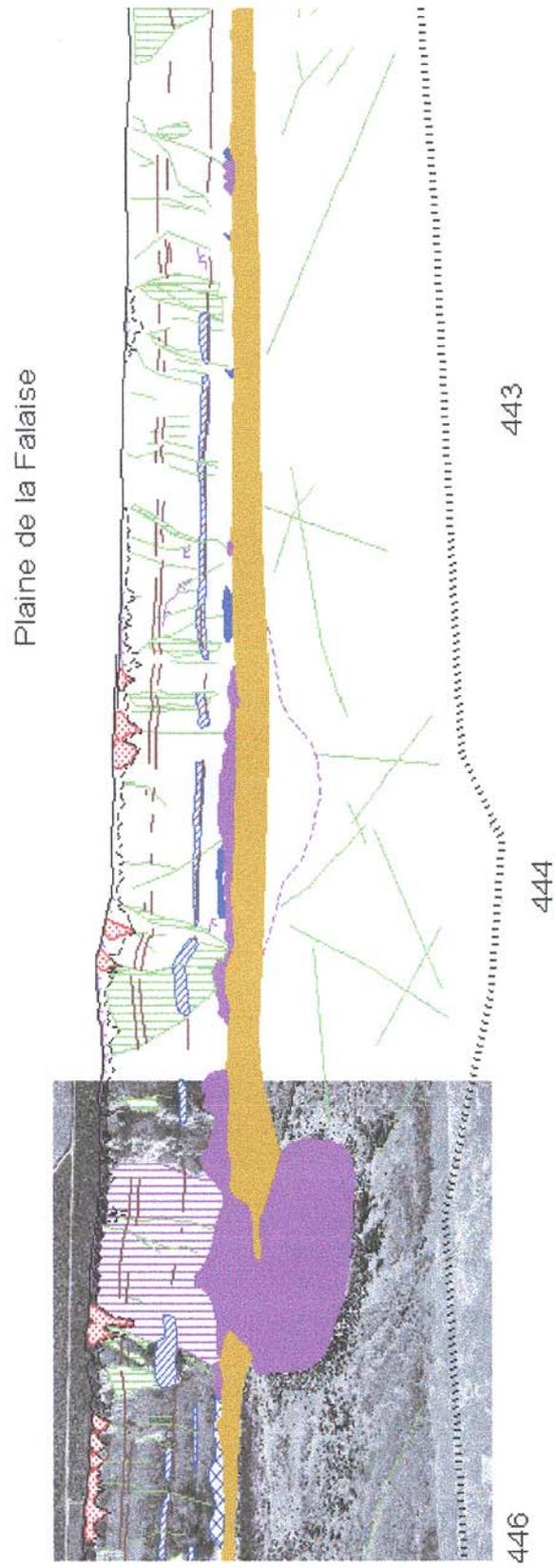


*Fig. 6 - Calage des photos (photo  $n$  et  $n + 1$ ).*

#### 6.4. DESSIN

- Logiciel Mapinfo 5.5

Chaque symbole représenté fait l'objet d'une table. Celle-ci est réunie dans des documents contenant toutes les tables correspondant aux thèmes et celles correspondant aux photos par paquet de 30 de manière à retrouver facilement des lieux précis.



**Fig. 7 - Résultat obtenu après travail sur les photos. Exemple sur les photos 443 à 446, feuille n° 11.**

## **7. Résultats et reproductibilité du travail**

### **7.1. RÉSULTATS**

#### **Données**

450 photos au total pour un linéaire réel de 140 km (de Ault au Havre).

380 photos interprétées (de Ault au Port pétrolier d'Antifer), soit 120 km environ.

070 photos mosaïquées non interprétées (du Port Pétrolier d'Antifer au Havre) soit 20 km.

Une moyenne de 100 photos par mois : traitement, mosaïquage et représentation.

Le résultat du travail effectué, représentation de plus de 120 km de côte de Ault (photo 493) au port pétrolier d'Antifer (photo 070), se présente sous la forme d'un linéaire qui, pour une échelle d'environ 1/3 000, représente à l'impression 90 feuilles A3 (fig. 6 : feuille n° 11 avec photo 446).

Seules 70 photos n'ont pas été étudiées allant du port pétrolier d'Antifer (photo 070) au Havre (photo 001) car la falaise, trop différente géologiquement et morphologiquement parlant du reste de la côte, ne peut être interprétée par les seuls éléments du lexique présenté ici (§ 4).

### **7.2. TEST DE REPRODUCTIBILITÉ DE L'INTERPRÉTATION**

Le temps écoulé entre l'interprétation de la première photo et la dernière étant de quelques mois, il est intéressant de faire une comparaison afin de savoir si la méthode de travail a été appliquée de manière constante ou s'il y a eu une évolution. Il a donc été réalisé l'exercice suivant : réinterprétation, une fois le travail terminé, d'une photo (446) déjà interprétée quelques mois auparavant et comparaison des deux bandeaux.

Comme l'indiquent les figures 7 et 8, le schéma général reste le même et seuls quelques détails diffèrent. Sommairement, la recherche des discontinuités s'est affinée ainsi que les traces d'érosion sur le platier. À l'inverse, la recherche systématique de la lithologie est moins précise. Il s'est avéré, pour cet élément, que seules les grandes lignes nous intéressaient et qu'il n'était pas nécessaire d'être exhaustif dans le relevé. Malgré tout, cela révèle un certain manquement sur les dernières photos (070 à 200) en partie dû à la qualité des photos.

Le relevé du plan d'érosion incliné n'est pas tout à fait le même mais n'altère en rien une éventuelle analyse du bandeau.



Fig. 8 – Interprétation originale faite sur la photo 446 (juillet 2000).

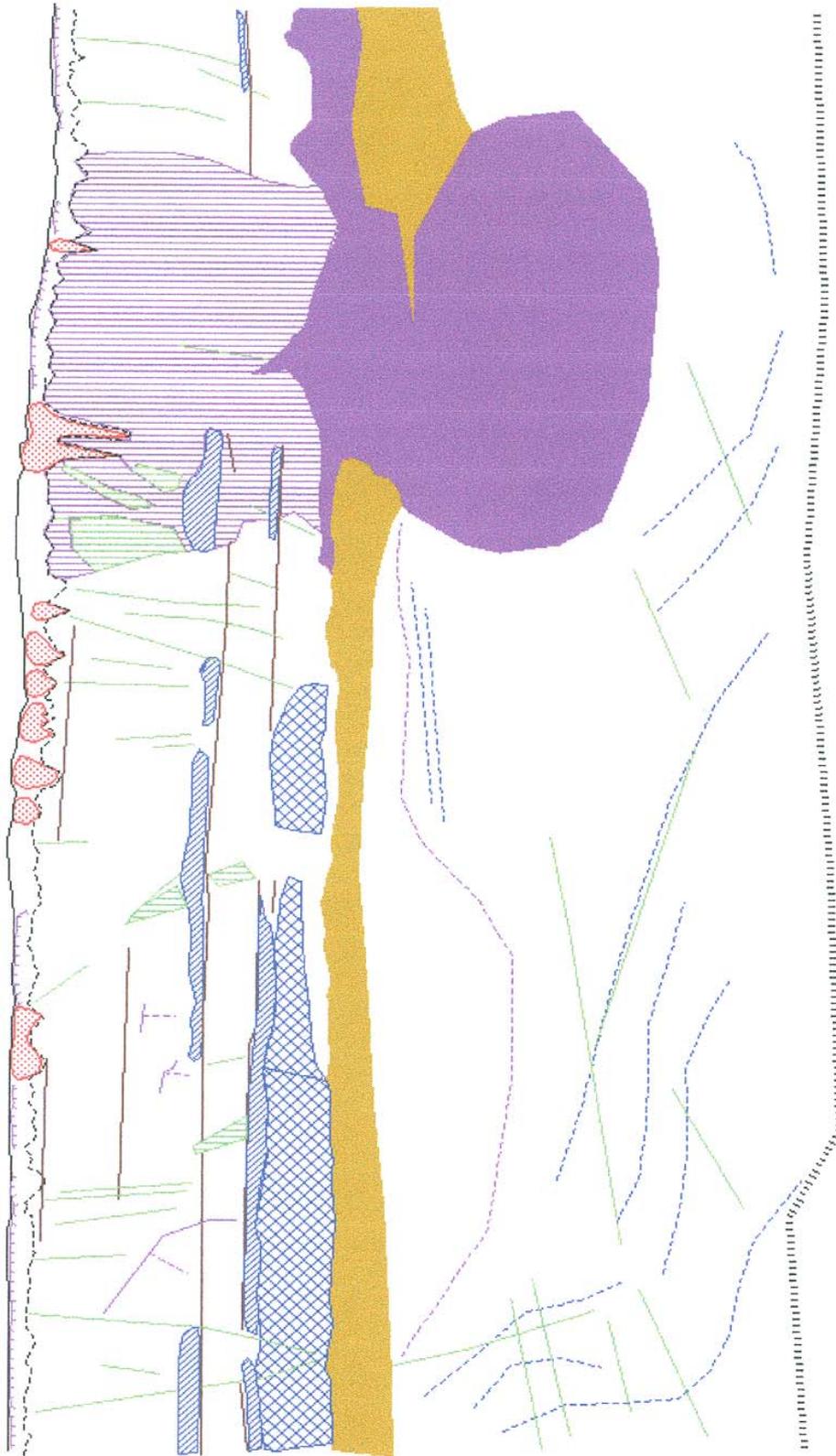


Fig. 9 - Observation de la reproductibilité de l'interprétation faite sur la photo 446 (septembre 2000).



## **8. Conclusion**

**L**e programme ROCC propose une recherche sur la sensibilité à l'érosion des falaises côtières crayeuses de l'espace Rives-Manche. Il ne s'agit pas de stopper les effondrements, mais de créer des outils facilitant la gestion des littoraux côtiers de Haute-Normandie, Somme et East Sussex en Angleterre.

Ce programme, dont l'objet est la recherche des facteurs prépondérants conduisant aux effondrements, doit proposer des outils d'aide à la décision tels qu'une carte de sensibilité à l'érosion des falaises côtières crayeuses ou encore un SIG compilant les informations.

Un des objectifs de ce programme est la segmentation du linéaire côtier. C'est à partir de ce travail qu'il sera possible d'affecter des cotes de sensibilité aux différents segments afin de créer la carte citée précédemment.

Cet objectif a nécessité la mise au point d'une méthode de description permettant de relever les éléments visibles sur des photos aériennes basse altitude où apparaissent la falaise, le plateau et le platier d'une zone allant du Havre (Seine-Maritime) au Tréport (Somme). Ces éléments sont répertoriés dans un lexique traduisant ce qui a été relevé et comment. Nous avons donc obtenu une grille de lecture de la côte qui a été appliquée sur la quasi-totalité du linéaire côtier.

La priorité était de relever le plus d'éléments possibles même si certains ne semblaient pas directement liés aux effondrements. On a obtenu une représentation de la côte qu'il a fallu exploiter afin de valider la méthode. Ceci semble vérifié puisque, suite à l'analyse des résultats, on a obtenu quatre zones bien distinctes où, à chaque fois, un élément différent est observable. On parle d'unités homogènes.

Les perspectives sont les suivantes : tout d'abord, terminer la représentation du linéaire avec cette méthode puis morceler la côte en grandes unités homogènes (première étape à l'obtention d'une carte de sensibilité). Ensuite, valoriser les données par la combinaison des éléments entre eux : détermination de l'implication des éléments dans les effondrements. L'utilisation de ces résultats servira à établir une carte de sensibilité à l'érosion de la côte.

D'autres travaux, qui mobiliseront un ensemble de compétences diverses, découleront de ce travail tels que : le calage de la lithostratigraphie relevée sur les photos grâce aux données terrains (positionnement des hard-grounds et des surfaces d'érosion) ; l'intégration des données dans un SIG...



## Bibliographie

Bignot G., Guyader J., Juignet P., Auffret J.P., Breton G., Cavelier C. (1978) - Excursion dans les falaises de Haute-Normandie, 4-6 mai 1978, *Bulletin d'information des Géologues du Bassin de Paris*, 15, 3, p. 7-54.

BURGEAP (1976) - Étude préliminaire à l'exploitation de la nappe de la craie dans la région d'Yport et d'Étretat, BUreau d'Étude et de Géologie APliquée et d'hydrologie souterraine, R447, juillet 1967, 17 p.

Vila J.L. (2000) - Étude du littoral Cauchois, juillet 2000, Rapport de DESS, BRGM, 25 p.

Wazi N., Leboulanger T., Tomat A. et Saignes G. (1988) - Karst et Quaternaire de la Basse-Seine, comptes rendus d'un colloque, *Actes du Muséum de Rouen 1*, p. 53-60.

Atlas Hydrogéologique de la Seine-Maritime (carte et notice), *Édition BRGM Orléans* (1992).

Carte géologique « Rouen » à l'échelle 1/250 000, document BRGM.

**BRGM**  
**SERVICE AMÉNAGEMENT ET RISQUES NATURELS**  
**Unité Littoral Sous-Sol Urbain**  
BP 6009 – 45060 Orléans cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34