

**ETUDE THERMOGRAPHIQUE DE LA FALAISE**

**DE BEYNAC (DORDOGNE)**

# ETUDE THERMOGRAPHIQUE DE LA FALAISE DE BEYNAC

## 1. BUT DES ETUDES. DEFINITION DES RISQUES PROVENANT DE LA FALAISE DE BEYNAC :

La falaise qui domine le village de BEYNAC est située sur la rive droite de la DORDOGNE. Le sommet domine la DORDOGNE de 80 à 100 m.

La falaise est orientée sensiblement Est-Ouest, correspondant à une direction structurale qui a déterminé le cours de la DORDOGNE pendant le Pliocène et le Quaternaire.

Le but de l'étude est de préciser les zones de la falaise de BEYNAC qui constituent un danger de chutes ou d'éboulement analogues à celui qui a détruit une partie du village de LAROQUE GAGEAC en 1957. En effet, les caractéristiques morphologiques, géologiques et lithologiques sont sensiblement les mêmes que celles de LAROQUE GAGEAC, avec toutefois une caractéristique complémentaire : celle de la présence du célèbre château et de la chapelle qui dominent le village, immédiatement au bord de la falaise.

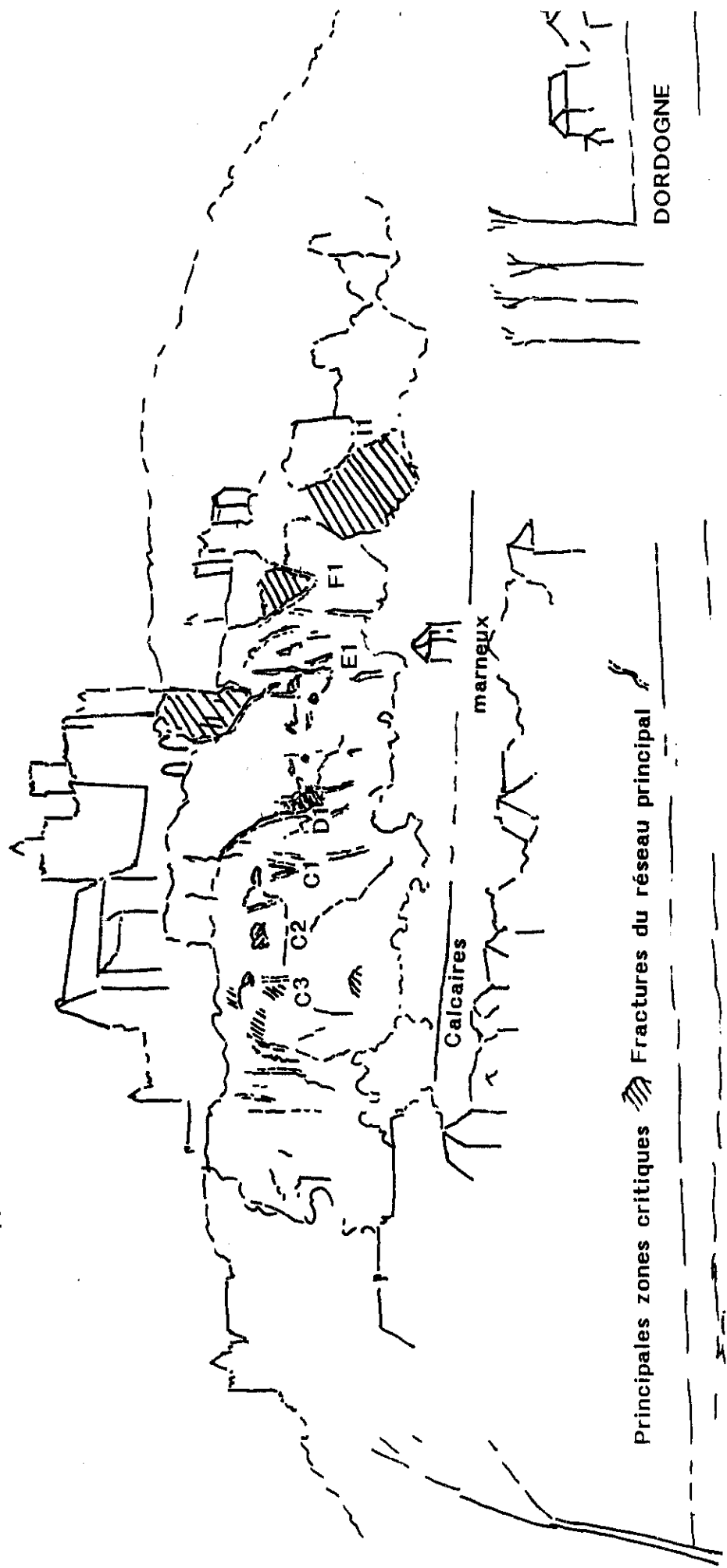
Comme à LAROQUE GAGEAC, le village de BEYNAC est situé dans sa partie la plus ancienne immédiatement au-dessous de la falaise, et de ce fait, se trouverait immédiatement endommagé en cas de chutes d'éléments rocheux séparés, ou de volumes de rochers désolidarisés du corps de la falaise.

L'ensemble des panoramas photographiques en annexe montrent avec la figure 1 l'ensemble du réseau des fissurations et de fracturations avec les limites des masses de rochers broyés et désolidarisés du massif principal.

Il y a lieu d'insister notamment sur l'absence de recul entre les habitations situées dans la partie basse de l'agglomération et la route départementale très étroite dans la traversée du village.

---

A B C D E F G H I



Principales zones critiques Fractures du réseau principal

FIG. 1. Ensemble du réseau de fractures à partir de la photographie 2.

## 2. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET PETROGRAPHIQUES DE LA FALAISE DE BEYNAC :

La falaise de BEYNAC appartient en quasi totalité à l'étage Coniacien constitué de calcaires quartzeux dans le tiers supérieur, de calcaires à la partie médiane et de marno-calcaires souvent peu marneux avec quelques silex. Le haut de la falaise constituant la première masse rocheuse de calcaires quartzeux jaunâtres a une épaisseur variable de 15 à 25 m. C'est cette partie supérieure qui constitue la masse la plus fragile et la plus endommagée par les dissolutions du ciment de calcite, par les eaux des précipitations en général légèrement acides mais pouvant atteindre des valeurs de pH inférieures à 6. La partie inférieure de la falaise de BEYNAC diffère notablement de celle de LAROQUE GAGEAC et également de celle des EYZIES, par l'absence d'une formation de 5 à 10 m plus altérable par dissolutions, que la partie supérieure.

Des examens au microscope sur des lames minces taillées sur des échantillons de ces formations qui couvrent une partie importante du PERIGORD NOIR, montrent que les dissolutions de calcite commencent dans la majorité des cas aux contacts quartz-calcite. Une fois que cette dissolution de la calcite a atteint un certain degré, l'indice de vide ou la porosité de la roche augmente considérablement et l'altération peut se matérialiser par deux formes : la transformation en roches sableuses parfois de faible cohésion ou par enlèvement et érosion de l'ensemble, calcite par dissolution, quartz par érosion.

A BEYNAC, on n'observe pas de forme d'altération par érosion à la base de la falaise puisque, comme il est dit plus haut, la couche sensible présente à LAROQUE GAGEAC n'existe pas à BEYNAC. Le cas des ruptures de piliers qui constitue la base de la falaise de LAROQUE GAGEAC ne peut donc être invoqué à BEYNAC.

Ces altérations sont d'abord favorisées par le réseau de fissures puis de fractures. Les quelques mesures qui ont été possibles sur le sommet de la falaise et dans les zones d'affleurements au Nord du bord de la falaise, donnent des directions soit sensiblement Nord-Sud, soit situées dans un secteur approximatif de N45-50°. Les relevés sur la falaise montrent un troisième réseau à pendage sensiblement Sud. Les zones de cisaillement D1, F1 et I1 en sont des exemples visibles sur les photographies. Il est peu probable que ce dernier système de fracturations provienne de l'action de la gravité sur la bordure de la falaise. Il s'agit en fait d'un réseau qui a affecté la masse des calcaires de la falaise aussi bien que les calcaires crayeux et marneux qui supportent les habitations du village.

L'altération en cavernes de dissolutions avec des résidus de sable ferrugineux à la base, n'a affecté à BEYNAC que la zone comprise entre les points C et F.

Il s'agit donc dans le cas qui nous occupe d'une altération moins large et moins importante que celle de LAROQUE GAGEAC ou de DOMME. La raison de cette concentration des cavernes de dissolution dans les calcaires du tiers supérieur de la falaise, réside dans une cimentation et une composition générale différentes entre l'amont et l'aval de cette zone comprise entre C et F.

Dans les terrains altérés par dissolutions, des échantillons prélevés à LAROQUE GAGEAC ont montré que certains d'entre eux avaient environ 80 %

de silice comptée en quartz, 7 à 8 % d'éléments argileux et de l'ordre de 3 % de carbonates. Ces derniers composants minéralogiques qui constituent le ciment de la roche, sont donc bien absents des zones altérées par dissolutions. Il n'a pas été effectué d'analyses analogues à BEYNAC puisque les formations géologiques sont identiques à celles de LAROQUE GAGEAC.

Comme dans ce dernier exemple, pour expliquer l'altération mécanique de la falaise de BEYNAC, il n'y a pas lieu d'invoquer des mouvements de tassement qui pourraient être dus aux formations de calcaires crayeux et marneux sousjacentes. Ces dernières formations ont une compacité importante, ne montrent aucune altération par dissolution ni par autre procédé naturel, à l'exception des quelques mètres d'altération superficielle communs à toutes sorte d'affleurements rocheux.

---

### 3. METHODE UTILISEE :

Nous donnons ci-dessous quelques uns des principes généraux qui ont servi à l'examen de la falaise.

Rappelons brièvement que tout corps noir dont la température est supérieure à 0° Kelvin, est émetteur d'ondes électromagnétiques dont les caractéristiques sont principalement fonction de la température de ce corps.

Sur le plan théorique, on connaît, depuis le début du siècle, les principales lois de propagation du "corps noir" ainsi que les caractéristiques de son rayonnement.

Les lois du corps noir émises par LAMBERT, KIRCHOFF et surtout les lois de PLANK-WIEN et de STEFAN-BOLTZMAN quantifient ces relations entre températures et intensité de l'émission.

Dans le cas des corps réels, pour lesquels la quantité d'énergie rayonnée est différente de celle qui est absorbée et inférieure à 1, s'ajoutent d'autres éléments spécifiques qui dépendent de la longueur d'onde de l'émission par ses interactions avec l'atmosphère, et de la nature thermique radiative du matériau émetteur.

Dans d'autres cas, les matériaux sont constitués de roches de caractéristiques différentes : calcaires, marno-calcaires, marnes, éboulis, argiles d'altération, végétation et enfin le béton que l'on peut considérer comme une roche, en principe plus homogène que celle de la nature.

L'émission thermique recueillie à quelques centaines de mètres du terrain examiné, dépend :

- en premier lieu, de la température absolue qui est de l'ordre de 270 à 300°K ;

- du coefficient d'émissivité des surfaces émettrices ;

- des interactions émissions-atmosphère. Ces interactions sont telles que suivant la longueur d'onde, des "fenêtres" de transmission existent dans l'atmosphère, dues à l'absence des interactions de l'énergie rayonnée avec la vapeur d'eau, les molécules polyatomiques d'oxygène, de CO et les poussières les plus fines.

Deux fenêtres existent pour les longueurs d'ondes dans la zone du thermique : 3,5-4,2  $\mu\text{m}$  et 8,5-14  $\mu\text{m}$  environ.

La première fenêtre est utilisée par les levés effectués à terre à l'aide de notre appareillage.

L'ensemble des visualisations sur papier photographique figure dans les annexes.

Le procédé de digitalisation à partir des films négatifs obtenus directement par transcription des bandes analogiques magnétiques, rend de grands services.

Ce procédé bien que délicat à mettre en oeuvre, est le seul qui permette avec une relative simplicité, de différencier les zones, et par conséquent les masses de terrains affectées par une certaine inertie thermique

-donc relativement homogène mécaniquement- des masses à anomalies élevées de gradients thermiques -donc affectés d'anomalies et de discontinuités mécaniques-.

Il est évident qu'un exposé complet des caractéristiques physiques de la thermodynamique radiative et des caractéristiques thermiques des matériaux sortirait du cadre de ce rapport.

*Toutefois, il est possible d'indiquer que le principe d'interprétation des levés thermiques est basé sur :*

*- les anomalies thermiques constituées de deux plages d'émissions différentes, soit axiales, elles-mêmes fonction de la conductivité thermique des matériaux.*

*En effet, toute discontinuité mécanique matérialisée par exemple par une fissure ou, mieux, par une diaclase, isole les deux masses dont l'une est émettrice de l'énergie calorifique géothermique naturelle des terrains.*

#### - Appareillage utilisé : (Figure 2)

L'ensemble de l'appareillage comprend :

- un équipement à balayage tournant à 16 images/seconde, donnant l'intensité des émissions thermiques dans la bande de 3,5-4,2  $\mu\text{m}$  sous un angle de 5 milliradians. Le balayage perpendiculairement au plan de rotation de l'équipage mobile, est effectué par rotation de l'ensemble de l'équipement à des vitesses variables avec la distance séparant l'objet mesuré de l'équipement.

- un ensemble électronique comprenant un pré-amplificateur et un amplificateur linéaire, délivrant à l'entrée de l'enregistreur à laser, un signal linéaire.

- l'enregistreur est lui-même équipé pour une émission de signal linéaire qui est visualisée sur papier photographique à développement à chaud. Ainsi, 30 secondes environ après la prise de vues, il est possible d'obtenir l'image visualisée, ce qui représente un avantage important par rapport aux levés aériens.

### 3.1. Examen détaillé des photographies en stéréoscopie et en hyperstéréoscopie :

Le principe consiste à prendre des vues avec des appareillages photographiques de haute définition et avec des émulsions en couleurs professionnelles. Les agrandissements permettent de faire des examens à l'échelle de quelques décimètres ou même du décimètre avec l'utilisation de télé-objectif.

La stéréoscopie et l'hyperstéréoscopie sont obtenues avec les méthodes classiques, en visant la même zone de la falaise par deux points séparés de quelques mètres à quelques dizaines de mètres suivant l'éloignement de l'objet photographié. Les agrandissements ainsi obtenus doivent être examinés à l'aide d'appareillages normaux d'examen stéréoscopiques. Ce procédé nous a paru indispensable pour la définition des zones instables corrélées avec les thermographies.

Le lecteur trouvera en annexe les dix photographies et panoramas accompagnés des légendes.

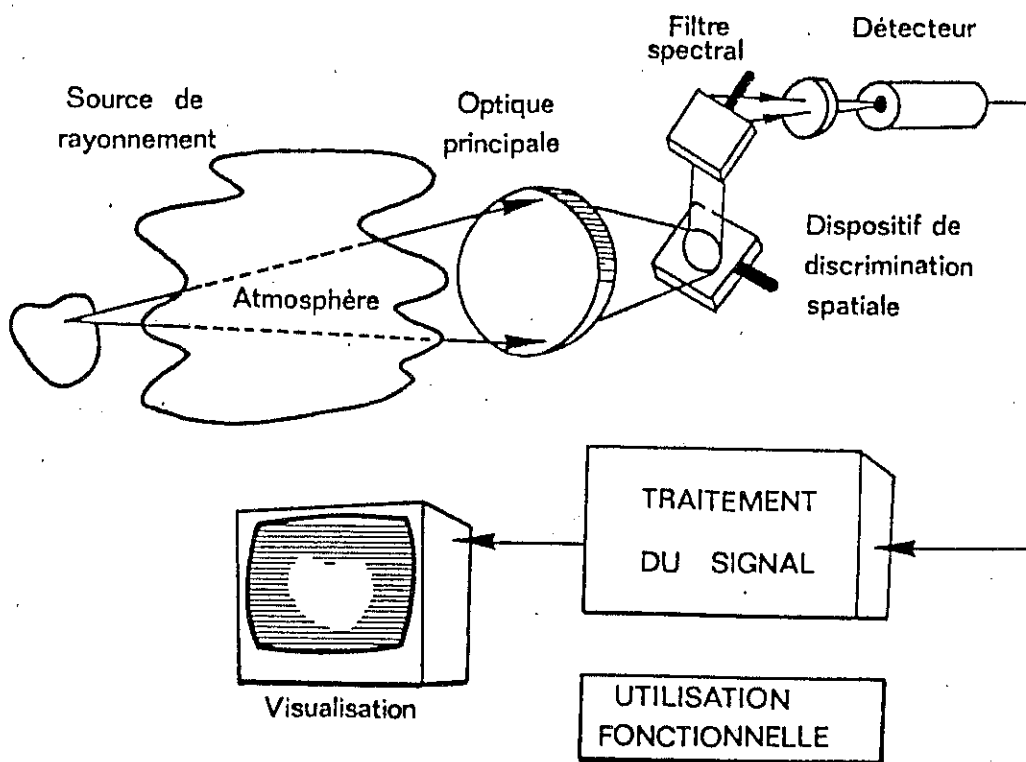
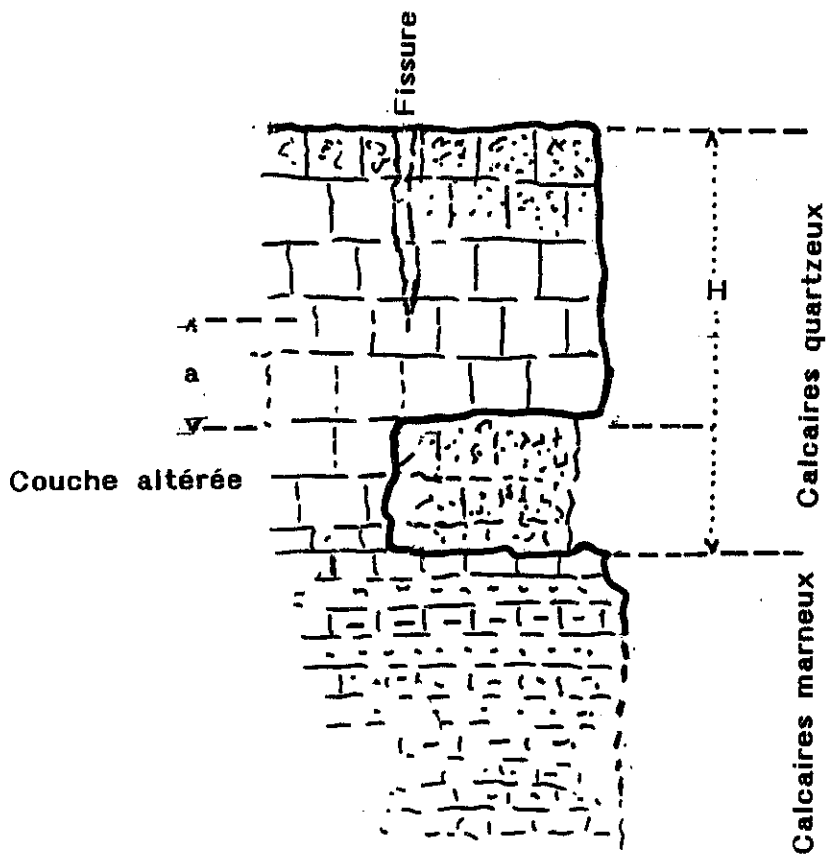
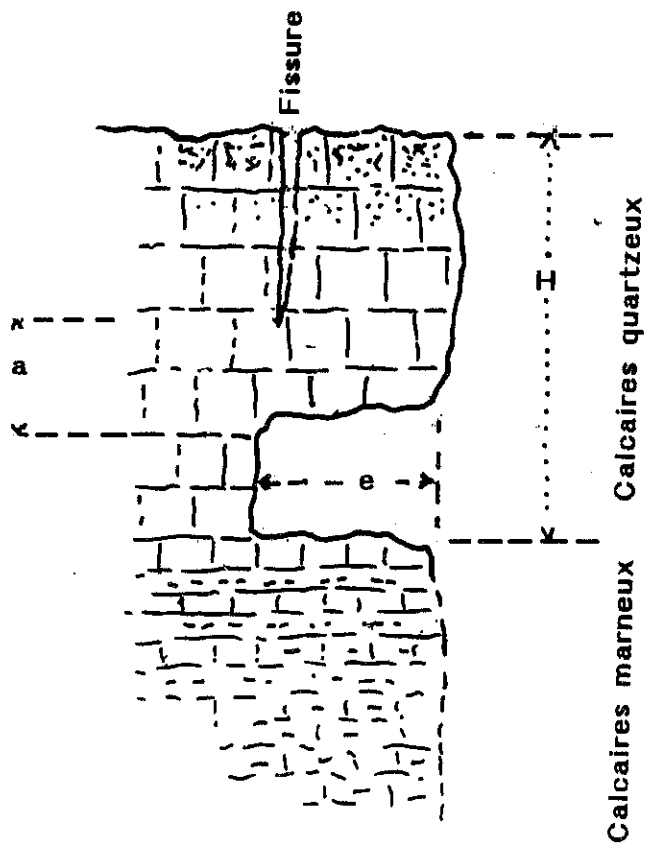


FIG. 2 . PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT D'UNE CHAÎNE RADIMÉTRIQUE





Surplomb masqué



Surplomb classique

FIG. 3. Schéma du surplomb masqué et du surplomb classique.

Les lettres sont exposées dans le texte p.7.

### 3.2 Levés thermographiques. Principes.

Toute surface minérale ou organique à la température moyenne de l'environnement terrestre, est le siège d'émissions électromagnétiques dont l'énergie est une fonction de plusieurs paramètres.

- Ainsi la **conductivité thermique** joue un rôle essentiel. Elle conditionne le transfert du flux thermique et de ses variations dans un milieu hétérogène et l'enregistrement des anomalies de ce transfert à partir de la surface est un indice certain de l'hétérogénéité mécanique du milieu. Dans un massif rocheux fissuré comme le sont les massifs en falaises, en général, l'air contenu dans les fissures ou dans les diaclases, constitue un obstacle certain aux transferts thermiques, l'air n'ayant qu'une très faible conductivité.

- La **masse volumique ou densité** de la roche, mesurée à l'échelle du massif, joue également un rôle prépondérant. Si la roche est poreuse, le flux circule seulement par les contacts des particules de terrain, donc difficilement. Les massifs diaclasés peuvent être considérés, en première approximation d'échelle, comme des formations poreuses.

- L'**indice de vides** est inversement corrélé avec la masse volumique: plus l'indice des vides est important, plus la masse volumique diminue et il en est de même de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique.

- La **dilatation et la rétractation thermiques** jouent un rôle majeur dans l'ensemble des facteurs d'altération des massifs rocheux, essentiellement dans le processus de la fissuration qui annule la résistance à la traction.

Ainsi, lorsqu'une surface rocheuse présente une émission thermique à peu près homogène, avec une température d'émission proche de celle de l'intérieur du massif, l'absence de fissures et de diaclases importantes est hautement probable.

Dans le cas d'émissions hétérogènes, l'intensité des contrastes des anomalies thermiques est un signe certain de présence de fissurations graves, donc d'un état mécanique critique, donc d'une résistance à la traction faible et d'un risque d'éboulement. Ce risque augmente progressivement avec l'accumulation des cycles thermiques de dilatation et de rétractation mécanique de la roche, c'est-à-dire avec les années.

Toute discontinuité mécanique à l'intérieur du massif et jusqu'à une profondeur de quelques mètres, due, par exemple à une fissure ou, mieux à une diaclase, isole les deux masses rocheuses et provoque un gradient thermique facilement décelable par thermographie sur une surface perpendiculaire ou inclinée sur cette surface.

Toutefois, les contrastes thermiques peuvent aussi provenir des différences de constitution des formations géologiques : les roches argileuses n'ont pas la même conductivité thermique que les calcaires, par exemple. Dans le cas de la falaise de BEYNAC, les anomalies thermiques ne peuvent provenir que des altérations des seuls calcaires.

### 3.3. Mécanique élémentaire de l'éboulement.

3.3.1. Examen sommaire des efforts imposés à la roche. On examinera brièvement le cas de surplombs affectés de fissures.

La figure 3 schématise le dispositif classique du surplomb. Le moment à prendre en compte à la fissure est :

$$M_t = 1 \times H \times \frac{e^2}{2} d \quad d = \text{masse volumique}$$

L'effort tranchant est :

$$t = H e d \times 1$$

Dans le cas d'une falaise non fissurée, la section au droit du surplomb est soumise à un effort de cisaillement :  $t = e d$

L'effort de traction dû au moment fléchissant est :

$$M_t = 3 \frac{e^2}{H} d$$

Avec des valeurs de 2400 kg/m<sup>3</sup> pour la masse volumique et de 10 m pour l, on obtient :  $t = 70$  kPa et  $M_t = 70$  kPa.

Ces valeurs sont largement insuffisantes pour provoquer un éboulement, dans le cas de surplomb sans fissurations.

Si le massif est fissuré perpendiculairement au plan de la figure, avec une hauteur de roche saine  $a$ , une hauteur  $H$  du surplomb et une épaisseur  $e$ , la formule donnant l'effort de traction prenant en compte la présence d'eau dans la fissure, est :

$$n_t = \frac{(H - a)^2}{2a} \times 1 + \frac{1}{a^2} \left[ 3 \frac{e^2}{H} d + 1 \frac{(H - a)^2 (2H + a)}{2} \right]$$

En prenant le cas du massif E situé sous l'extrémité Ouest du chateau, et en supposant que la hauteur de la fissure représente  $0,6.H$ , la contrainte de traction est de 1,35 MPa pour une fissure sèche, ce qui serait suffisant pour supporter l'effort. Toutefois cette valeur est certainement supérieure à la réalité si l'on tient compte de l'état d'altération des matériaux rocheux soumis depuis quelques dizaines de milliers d'années aux phénomènes d'altération climatiques.

Dans le cas d'une fissure remplie d'eau même dans une zone limitée, la contrainte de traction subie localement serait supérieure à 2MPa. Dans ce dernier cas, la rupture serait inévitable à court terme, une rupture localisée entraînant l'éboulement du massif.

Cette hypothèse de la fissure remplie d'eau calculée dans le cas de LAROUQUE GAGEAC est déjà pessimiste, car la perméabilité généralisée des massifs calcaires des deux falaises rend peu probable ce cas limite. En revanche, l'appréciation de la valeur de la résistance à la traction de la roche altérée est difficilement quantifiable. L'analyse détaillée des hétérogénéités des émissions à partir des thermographies, permet une évaluation de la résistance à la traction réelle des calcaires à la moitié, au maximum, de la valeur de la roche saine, en raison du réseau très dense de fissures qui altèrent ces matériaux.

\* Une étude complète nécessiterait l'emploi des éléments finis, à condition de connaître avec quelque exactitude, la géométrie des masses en déséquilibre potentiel.

Enfin, si l'on met de côté les actions dynamiques des microséismes et des effets de résonance du passage des poids lourds sur la route, il faut tenir compte des effets mécaniques des basses températures hivernales qui provoquent les dégâts mécaniques dus aux déformations thermiques irréversibles.

Il est indispensable d'ajouter à ces deux effets conjugués, les conséquences de trois et probablement de quatre années à déficit pluviométrique exceptionnel. Ce déficit joue un rôle néfaste évident : les remplissages de matériaux argileux qui maintiennent une faible cohésion mécanique des masses fissurées, en particulier à leur base, se rétractent et enlèvent à la résistance de ces massifs un paramètre positif supplémentaire. Les déformations dues à ce retrait sont irréversibles et accentuent le tassement.

Si l'on ajoute les effets provoqués par des phénomènes inverses et normalement prévisibles de précipitations saisonnières brusques et abondantes, la fragilité des zones critiques définies dans le présent rapport, devient une évidence.

---

#### 4. EXAMEN DES LEVES THERMOGRAPHIQUES ET RESULTATS :

Ainsi qu'il a été dit plus haut, deux séries de thermographies ont été levées à partir de la rive gauche de la DORDOGNE sur la falaise de BEYNAC. Rappelons également que le but recherché était de déterminer la répartition des masses de rochers à faible inertie thermique permettant de déceler une instabilité mécanique potentielle.

##### 4.1. Examen des levés thermographiques :

La première série de levés thermiques a commencé à 22 h 20 et a dû être interrompue à 0 h 25 par suite d'une défaillance de l'appareillage, due à une brusque arrivée de brouillard dense. De toute manière, l'arrivée de ce brouillard en provenance de la DORDOGNE toute proche, aurait affecté gravement les levés thermographiques puisque les émissions thermiques sont largement absorbées par l'eau, soit sous forme de brouillard, soit sous forme de végétation, soit enfin sous forme d'humidité des affleurements rocheux par exemple.

##### - Thermographies d'août 1989 :

Il résulte de l'examen de cette première série de 13 thermographies, une constatation déjà assez nette de la répartition des anomalies thermiques et, surtout, de la diminution des émissions sur des zones que l'examen visuel avait déjà laissé prévoir comme instables.

La figure 4 et sa légende définissent ces zones dangereuses.

On remarque entre autre anomalie thermique, la séparation linéaire nette de deux domaines d'émissions différents indiqués D sur les photographies et sur les thermographies. Cette limite ou anomalie thermique est située sous la partie Est de la chapelle.

Cette caractéristique indique que la zone comprise entre les lettres A et D de la thermographie et du panorama, constitue une masse mécaniquement mal reliée au massif principal qui, à l'Est de la fissure D et jusqu'à l'extrémité du levé thermographique, donne une constance d'émissions supérieures à celle du massif A à D. Cette observation est particulièrement nette sur les deux dernières thermographies de 0 h 20 et de 0 h 22 qui contrastent avec les thermographies de 22 h 37 et 22 h 39 où, pour ces deux dernières, l'hétérogénéité des émissions est moins marquée.

Les zones E et F montrent une inertie thermique nette mais, curieusement sur ces levés du mois d'août, moins marquée que celle du massif de la masse A-D.

D'autre part, comme il a été dit plus haut, l'orientation de la falaise sensiblement Est-Ouest, a été certainement influencée par le réchauffement saisonnier des mois de juillet et d'août, mais la zone "froide" de la masse A-D n'a pas manifesté de souvenir inertiel aussi marqué que la zone située sous le château, alors que l'orientation de la masse A-D aurait du normalement profiter d'une manière plus nette de l'insolation.

Les légendes accompagnant les thermographies en annexe, fournissent les explications détaillées pour chaque document.

#### - Thermographies d'avril 1991 :

Sur les thermographies d'avril 1991, les réactions des différentes zones de la falaise et notamment l'extrémité Ouest, apparaissent plus nettement que sur les thermographies de 1989. Ainsi, sur les thermographies de 22 h 00 et 22 h 04, on perçoit les différences de températures d'émissions de certaines plages, ainsi que les anomalies thermiques des fractures A, B et C, et à moindre titre, de D.

La différence commence à apparaître sur l'une des thermographies de 23 h 40, avec une différence moyenne de température de 1 à 2° par rapport au massif situé au-dessous de l'intervalle chateau-chapelle.

A 23 h 58 - 0 h 00, les différenciations deviennent plus nettes, avec toujours la permanence émissive moyenne du massif situé sous le chateau et la chapelle. Avec l'avancée de la nuit et en maintenant toujours un même réglage, le détail des inerties thermiques se manifeste bien plus nettement. D'une part, le massif antérieurement émissif sous la zone chateau-chapelle conserve son émission supérieure aux masses situées à l'Est et à l'Ouest, mais avec des différenciations détaillées.

Vers 0 h 15, les masses situées à l'Est et à l'Ouest du massif du centre acquièrent une émissivité en moyenne équivalente. A partir de 02 h 50 la séparation des émissions thermiques entre les trois grandes unités augmente en netteté et montre des subdivisions aisément repérables sur le panorama photographique. A 02 h 59 - 03 h 00, le levé thermographique devient de plus en plus contrasté et significatif. La fracture D sous la chapelle, délimite parfaitement la bordure Est de la masse "froide" qui apparaît ainsi thermiquement, donc mécaniquement quelque peu désolidarisée du massif principal.

La masse plus fissurée et fragmentée, située sous la chapelle, se refroidit également avec à la base les masses secondaires hétérogènes C1, C2 et C3 qui présentent un risque potentiel de glissement et de chute. Les minutes qui suivent et qui correspondent au refroidissement classique des fins de nuit, et notamment la thermographie de 03 h 09, augmentent encore les différences de valeur des inerties thermiques.

Les thermographies qui précèdent immédiatement les premières lueurs de l'aube, de 06 h 57, accentuent encore le refroidissement du massif A-D, montrant de plus, des sous-ensembles séparés par les fractures A, B et C, (07 h 19 et 07 h 22).

Avec le levé du jour, et une température extérieure de 11 à 13°, la différenciation des sous-ensembles s'accroît encore et la thermographie de 07 h 22 constitue un exemple typique des indications que de tels documents peuvent fournir. Enfin, la dernière thermographie prise à 07 h 32, en l'absence de toute influence des émissions thermiques de la lumière solaire, permet une corrélation directe et précise avec les photographies.

#### 4.2. Résultats :

Les figures 1 et 4 montrent la répartition des zones dangereuses risquant de provoquer des éboulements sous forme de volumes d'ébouillis de quelques m<sup>3</sup> à quelques centaines de m<sup>3</sup>. Les légendes qui accompagnent les photographies et les thermographies donnent le détail de ces zones à risques.

Les zones les plus nettement sensibles aux différences de températures saisonnières et de fin et de début de nuit, sont celles de la base du massif **A-D** qui comprend des blocs désolidarisés mécaniquement du massif situé entre la chapelle et le château. Ce massif est lui-même, dans le détail, composé de sous-ensembles dont certains sont instables

Tous ces sous-ensembles de masses de la falaise indiqués sur les figures 1,3 et 4, présentent des risques certains, mais différents dans le temps et dont la chronologie absolue et relative est impossible à quantifier.

---

## 5. RESULTATS, CONCLUSIONS, PRECAUTIONS IMMEDIATES.

Il serait aisé d'adopter une attitude "catastrophiste" devant les résultats de cette étude. Si l'examen méthodique de ces résultats ne la justifie pas, il oblige à porter à la connaissance des autorités municipales et ministérielles, l'état critique de zones dangereuses pour des groupes d'habitations du village.

Cet examen a conduit à localiser des masses de volumes très variables qui représentent un danger latent et potentiel.

Il apparaît nettement un premier résultat d'ensemble: un éboulement de plusieurs milliers de mètres cubes analogue à celui de janvier 1957, de LAROQUEGAGEAC, est hautement improbable, dans un avenir proche ou moyen.

En revanche il est évident que des parties de la falaise, de quelques dizaines ou de quelques centaines de mètres cubes, au maximum, vont inéluctablement se détacher dans un avenir impossible à préciser.

Dans ces conditions, en attendant l'exécution d'un réseau de surveillance par mesures directes et par télémesures, des précautions élémentaires sont indispensables:

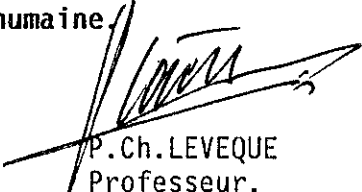
- interdiction du passage rapide et de l'arrêt prolongé des poids lourds, moteurs même au ralenti, sur la route départementale à la base de la falaise;

- interdiction de l'usage d'explosifs puissants sous la falaise. Seules, des petites charges de quelques centaines de grammes pourraient être tolérées.

- impossibilité d'admettre l'exécution de grands travaux d'élargissement de la route départementale à partir de terrassements de plusieurs centaines de mètres cubes, à l'explosif. Une variation sensible du champ actuel des contraintes à la base de la falaise et au niveau topographique ou au-dessous du niveau de la route, présente des risques. Une modélisation pourrait éventuellement les quantifier.

L'exécution de travaux de confortement qui dépasseront, à l'évidence, les ressources financières de la commune de BEYNAC ET CAZENAC, devra faire appel à des procédés délicats à mettre en œuvre, qui ne pourront être confiés qu'à des entreprises spécialisées et reconnues sur le marché des travaux de cette catégorie.

Enfin, à la suite des expériences pratiques recueillies à LAROQUE-GAGEAC, nous recommandons vivement de signaler aux autorités communales les bruits de craquements qui pourraient être perçus par les habitants des maisons situées directement sous la falaise, en attendant l'installation d'appareillages de mesures des déformations et des émissions sonores dans un spectre de fréquences inaudibles par l'oreille humaine.



P. Ch. LEVEQUE  
Professeur.



## PROGRAMME D'ETUDE ET DE TRAVAUX COMPLEMENTAIRES

Les levés thermographiques et l'étude effectuée sur le terrain font apparaître un ensemble de dangers potentiels qui peuvent se matérialiser à court ou à moyen terme, par des éboulements de quelques dizaines à quelques centaines de m<sup>3</sup> sur des zones habitées du village de BEYNAC.

L'une des premières conclusions de cette étude consisté à recommander pour le village de BEYNAC, mais il en est de même pour les villages de LAROQUE GAGEAC, de DOMME et à moindre titre, des EYZIES de TAYAC, l'installation d'un système d'alerte discret. Certains de ces systèmes d'alerte sont utilisés en routine pour la surveillance des appuis et des barrages hydroélectriques et autres grands ouvrages, sous forme d'inclinomètres et de témoins sonores, notamment.

Des capteurs de vibrations aux fréquences relativement basses, comprises entre 20 et 10 000 Hertz par exemple, avec enregistrement des données, permettraient d'obtenir un signal précis et particulièrement significatif des ruptures superficielles locales et internes des masses rocheuses.

En effet, chaque rupture de roche est précédée par un ensemble de vibrations à fréquence relativement élevée. Au moment de la rupture, même très localisée, le spectre des fréquences évolue et on assiste à un pic important du bruit qui précède la rupture.

Des fréquences basses sont provoquées par le passage des camions de type poids lourds, de 15 à 20 tonnes ou plus, qui empruntent la route étroite du bas du village. Les vibrations induites à l'ensemble du paysage de la falaise, peuvent provoquer des effets de résonance qui amplifient, à ces fréquences relativement basses, l'énergie transmise par le passage des camions et les vibrations des moteurs des poids lourds de 20 tonnes et plus.

Dans un ordre de grandeur différent, rappelons que les habitations situées sur la falaise qui domine la gare de POITIERS, ressentent le passage des trains qui traversent la gare sans marquer l'arrêt. Ce fait est parfaitement connu et classique dans tous les sites de ce genre.

Les capteurs devraient pouvoir indiquer également la manifestation de petits séismes de 2 à 3 degrés par exemple, de l'échelle internationale. De tels séismes ne sont pas perçus par les populations, sauf si leur manifestation a lieu pendant les heures calmes et les silences nocturnes. Le chapitre des alertes peut donc être constitué assez rapidement avec un matériel de type classique et le problème posé par les spectres de fréquences peut être rapidement résolu par quelques tests préliminaires.

Si nous nous référons aux circonstances précises qui ont précédé la rupture de la falaise de LAROQUE-GAGEAC sur laquelle nous avons établi un rapport daté du 16/07/57, il est important de noter qu'à partir des premiers craquements observés par les habitants du village jusqu'à la chute du 17 janvier, des témoins installés par les soins du Service de l'Équipement et de la Mairie de LAROQUE GAGEAC, avaient enregistré des mouvements de plus en plus importants et irréversibles, non seulement sur les témoins de plâtre apposés sur les fissures, mais également à partir des appareils d'amplification angulaire des fissures, visibles depuis la route du village. Le coefficient d'amplification était de 50.

Les déplacements qui ont précédé la chute, ont été de l'ordre de 0,5 à 1,7 mm. Il apparaît donc que les mouvements qui précèdent des chutes de masses notamment en surplombs telles que celles de LAROQUE-GAGEAC, ne peuvent être décelés qu'à partir d'appareillages précis et susceptibles de fournir des télémessures.

D'autre part, contrairement à ce qui avait été proposé et partiellement effectué à LAROQUE-GAGEAC, l'ensemble du dispositif de télémessures à prévoir à BEYNAC devrait être appliqué surtout à des zones ponctuelles et non à de grandes masses de type "surplomb", risquant de créer brusquement la chute de plusieurs milliers de m<sup>3</sup> de rochers.

Les emplacements du dispositif de télémessures sont proposés dans la figure 4.

Les procédés principaux de confortement de falaise envisageables pour celle de BEYNAC, peuvent être groupés dans les techniques de consolidation par injection de produit à base de ciment ou exceptionnellement de résine, par implantation de tirants destinés à orienter la contrainte verticale susceptible de produire la chute de gros blocs dans une direction proche de l'horizontale, et par béton projeté.

Chaque procédé comporte ses avantages et ses inconvénients résumés dans le tableau de la page suivante.

En ce qui concerne un programme de consolidation de la falaise, l'établissement des conditions et de la réalisation d'un tel programme n'est pas aussi immédiat que la surveillance des masses potentiellement instables. Il existe depuis l'éboulement de la falaise de LAROQUE-GAGEAC, en janvier 1957, des procédés dont les modalités ont été l'objet de progrès constants.

**- Bureaux d'études et conseillers spécialisés :**

Des personnalités ont eu à traiter des problèmes en FRANCE ou à l'étranger :

- M. P.HABIB, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, ancien Président de l'Association Internationale de Mécanique des Roches, ancien Directeur du Laboratoire de Mécanique des Solides à l'Ecole Polytechnique,

- M. ROCHET, Ingénieur des Mines, Chef de service au Laboratoire des Ponts et Chaussées et au Centre d'Etudes Techniques de BRON-LYON.

- Enfin, le signataire du rapport outre le cas de LAROQUE GAGEAC, a déjà eu à traiter des cas analogues en FRANCE et en SUISSE (FRIBOURG et falaise de MARTIGNY), au MAROC (barrage de BIN EL OUIDANE), en IRAN (barrage du KAROUN).

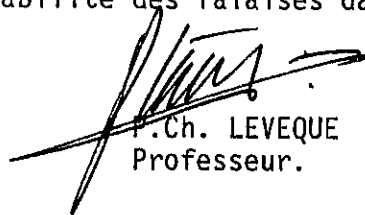
En ce qui concerne les bureaux d'études qui pourraient être consultés, on peut citer SIMECSOL dans la région parisienne, le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement et le Centre d'Etudes des Tunnels (CETu) à LYON-BRON, le Laboratoire de Géologie Appliquée de l'IRIGM à GRENOBLE (prof. ANTOINE), et, accessoirement, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) à ORLEANS.

Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive.

Il est évident que le coût de la réhabilitation de la falaise de BEYNAC devrait dépasser très sensiblement les possibilités financières de la commune. La seule installation d'un équipement discret de surveillance par inclinomètres, témoins sonores et dispositifs d'écoutes, avec télémessures, pourrait être de l'ordre de 350 000 à 400 000 FF.

Le coût de la consolidation par l'un des trois procédés ou par la conjonction de deux d'entre eux, ne peut être chiffré que par des entreprises hautement spécialisées.

Enfin, personne n'a jamais constaté que la sentence dite populaire entendue même dans certains cercles de l'Administration et malgré l'exemple de LAROQUE GAGEAC : "Cela tient depuis si longtemps, cela tiendra bien encore autant", ait jamais présenté une quelconque vertu de stabilité des falaises dangereuses.



P.Ch. LEVEQUE  
Professeur.

Techniques d'injection	Utilisation des tirants	Béton projeté
- Modalités d'exécution	délicate	moins délicat que les 2 autres procédés.
- Obligation de consulter un bureau d'étude	obligation dans les 3 cas	idem
- Perrenité	importante	importante surtout si la projection de béton peut pénétrer dans les cavités rejoignant ainsi les techniques d'injection.
- Risque d'altération du paysage	nulle ou peu important si les travaux sont exécutés proprement.	risque certain à cause des éclaboussures. Eventualité d'une utilisation de béton projeté de la couleur de la falaise.
- Durée des opérations	de l'ordre de 1 an à 2 ans dans le cas de BEYNAC avec traitement des sous-ensembles, cas par cas.	de 3 à 6 mois.
- Risque pour les habitations sous-jacentes pendant les opérations	chute de cailloux ou de blocs des parties les plus instables.	chute de cailloux ou de blocs et de résidus de béton projeté.
- Précautions à prendre pendant les opérations	renforcement des toitures par platelage en bois	analogue aux 2 autres procédés.
- Coût des opérations et devis	dépendent des entreprises consultées. Offre à examiner par des spécialistes	coût probablement inférieur aux 2 autres procédés. Obligation de consulter des entreprises spécialisées.

Le montant des dispositifs d'auscultation et d'avertissement de mouvements dangereux des zones critiques de la falaise, peut être estimé assez largement à 400 000 FF environ, équipements et main d'oeuvre compris. Il appartiendra à la commune de recueillir les informations sous forme d'enregistrements des différents appareils de mesures.

## ANNEXE.

Il est possible d'évaluer les efforts au pied de la falaise.

Dans le cas de l'utilisation des éléments finis, et en supposant un matériau homogène, une première simplification pourrait consister à prendre en compte la "contrainte équivalente"  $\sigma_e$  définie par le critère de TRESCA et GUEST

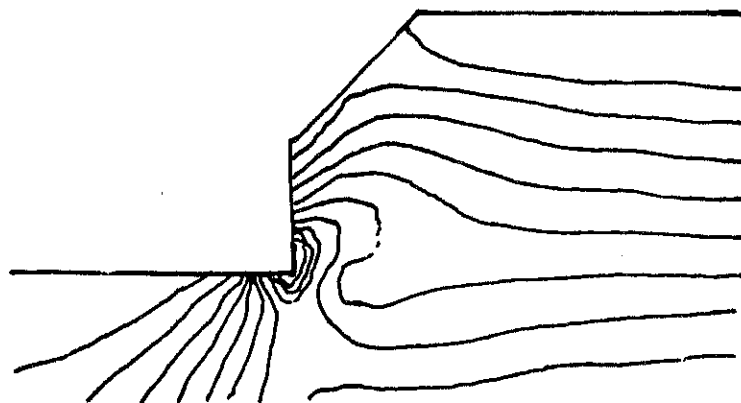
$$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_{\max}$$

$\sigma_1$  = contrainte principale, verticale;  
 $\sigma_3$  = contrainte latérale, dirigée vers l'extérieur du massif;  
 $\tau_{\max}$  = cisaillement maximum.

Il peut être intéressant de noter la variation possible de  $\sigma_e$  en fonction de  $\nu$ , coefficient de POISSON, variation qui peut atteindre la valeur de 1,5 pour des valeurs de  $\nu$  de 0,45. En fait, la seule hypothèse de l'homogénéité du matériau introduit des incertitudes d'un ordre de grandeur largement supérieur.

Dans l'exemple de la figure ci-dessous, avec un angle de talus de  $90^\circ$  et un sommet de falaise convexe, c'est classiquement au pied du talus, soit de la falaise, que les valeurs de  $\sigma_e$  sont maximales. Or, dans cette partie, les calcaires quartzeux ou marneux de BEYNAC ne semblent pas affectés par cette concentration des efforts.

Dans le cas des surplombs, il faudrait faire intervenir la résistance à la traction des calcaires quartzeux, entre autres paramètres.



Exemple de calcul par les éléments finis, pour un talus vertical et une partie supérieure convexe. (d'après B.GOUÏA, thèse 1990, Géologie de l'Ingénieur, ENSM, PARIS.)