

## **GÉOLOGIE DE LA TRANCHE EPR DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE EDF DE FLAMANVILLE –CONSÉQUENCES POUR LE PROJET**

### **GEOLOGY OF THE EPR POWER PLANT IN FLAMANVILLE (FRANCE)**

Guilhem DEVEZE,<sup>1</sup> Yannick LARGER<sup>2</sup>, William PRINCE-AGBODJAN<sup>3</sup>

*1 Electricité de France, Service Géologie Géotechnique, Aix en Provence,*

*2 ISL Ingénierie, ex-EDF, Montpellier*

*3 Laboratoire de Génie Civil, INSA, Rennes*

**RÉSUMÉ** – Les travaux de terrassement de la centrale EPR de Flamanville ont permis de visualiser, dans de remarquables conditions d’affleurement, la géologie du contact entre le pluton granitique éponyme et sa célèbre auréole de métamorphisme de contact. On présente ici l’adaptation du projet aux spécificités géotechniques de ces terrains et aux phénomènes d’altération hydrothermale qui les affectent.

**ABSTRACT** – The earthworks of the EPR nuclear power plant of Flamanville (France) allowed to visualize under remarkable conditions the geology of the contact between granite batholith and its aureole of thermal metamorphism. This paper deals with the adaptation of the project on the specific geotechnical properties of these rocks (hornfels), affected by hydrothermal deterioration phenomena.

### **1. Introduction**

Le site de Flamanville a été choisi pour l’implantation d’un réacteur nucléaire de type EPR « European Pressurised Reactor ». Le site, déjà équipé de deux tranches mises en service en 1985 et 1986, a fait l’objet en 1978-79 d’importants travaux de terrassement, avec le déroctage de 6 hm<sup>3</sup> de granite sur une hauteur d’environ 60 m et la création à la cote +12 NGF, d’une plate-forme de 40 ha gagnée sur la mer au moyen du tout-venant.

La préparation du fond de fouilles, entre décembre 2006 et février 2008, a nécessité un déroctage complémentaire de 300 000 m<sup>3</sup>. Une procédure de réception des fonds de fouilles permettant de valider les hypothèses de sols retenues pour le dimensionnement des ouvrages importants pour la sûreté nucléaire a conduit à quelques traitements locaux du massif rocheux de fondation. Cette procédure incluait, après nettoyage soigné, un levé géologique au 1 / 100°. Ce levé, couvrant une surface de 4,5 ha constitue désormais la mémoire géologique du site.

En parallèle, le rejet des eaux de refroidissement a nécessité le creusement d’une galerie sous-marine d’environ 900 m, jusqu’à un puits en mer situé à 600 m au large du site.

Le présent article détaille dans un premier temps les principales informations géologiques issues du suivi de ces travaux, enrichissant la connaissance des célèbres cornéennes de l’auréole métamorphique du batholite de Flamanville, qui affleurent uniquement à marée basse dans ce secteur. Il présente ensuite les conséquences de ce contexte géologique particulier sur le projet.

## 2. Cadre géologique

Le site se trouve sur la bordure occidentale du batholite granitique de Flamanville intrusif dans une série sédimentaire dévonienne plissée.

La mise en place du pluton granitique a affecté les terrains du flanc Sud du synclinal de Siouville, vaste pli d'extension régionale dissymétrique et déversé vers le Sud. Elle s'est accompagnée du refoulement des couches sédimentaires, d'où l'apparition de nouveaux plis moulés sur la bordure occidentale du pluton, avec des axes grossièrement parallèles à la côte, de direction N30°E. Ces plis, d'amplitude hectométrique, ont évolué en plis-failles et apparaissent assez fortement déversés.

Le métamorphisme de contact a engendré une grande variabilité lithologique, en relation avec les différentes lithologies de la série sédimentaire originelle et avec l'éloignement au contact avec le batholite. La présence dans ces terrains métamorphiques d'hématite et surtout de magnétite, en particulier d'oolcarénite contenant des oolithes d'hématite et de magnétite prises dans une gangue constituée soit de calcite, soit de pyroxènes, soit d'amphiboles, a été à l'origine d'une exploitation minière jusqu'en 1962. Les couches de minerai, très redressées, ont été exploitées par la méthode des chambres / magasins à des profondeurs variant entre 70 et 130 m sous le niveau moyen des mers. L'emprise de cette mine sous-marine s'est développée devant le site, essentiellement devant la tranche EPR.

## 3. Apport du suivi des travaux au modèle géologique

### 3.1. Fracturation du granite

Le levé géologique a confirmé la prédominance, autant par sa fréquence que par sa persistance, d'une famille correspondant aux fissures de retrait thermique, rayonnantes depuis le centre du batholite (orientation N110°E sur le site, Cf. Tab.I). Cette famille correspond également aux filons intrusifs, ainsi qu'aux grandes zones d'altération hydrothermale. Une deuxième famille (d'orientation N35°E), tangentielle au batholite (en pelure d'oignons), est très marquée sur le levé structural.

Tableau I : Principales familles de fracturation du massif granitique

Direction	pendage	persistance	espacement
N110°E [N105 à N130°E]	70°N à 70°S	Déca. à hectométrique	2 m [5 à 0,1 m]
N35°E	Très redressé	plurimétrique	1 m [2 m – 0,2 m]
N150°E	Pendage Sud	plurimétrique	[0,5 à 2 m].
N70°E	45 à 65° SE	plurimétrique	
N90°E	20 à 30° N	pluri-décamétrique	
Joint subhorizontal		plurimétrique	2 m

Ce levé a également souligné la continuité kilométrique (moyennant quelques relais) des filons intrusifs, dont l'épaisseur varie entre quelques décimètres et 4 m. Ce sont essentiellement des filons d'aplite (en rose sur la Fig. 1), et secondairement des filons de microgranite porphyroïde (microdiorite quartzitique à amphiboles).



Figure 1 : Levé géologique des fonds de fouilles de la tranche EPR de Flamanville. La numérotation dans la série métamorphique correspond à la numérotation du tableau 2.

### 3.2. Variabilité lithologique de la série métamorphisée

Les cornéennes correspondent à une séquence gréseuse à calcaréo-pélitique :

- cornéennes micacées (ci-après corn. mic.), à biotite, en général riches en magnétite, dérivant probablement d'un grauwacke plus ou moins alumineux ou calcique, voire localement de schistes,
- cornéennes à pyroxènes (ci-après corn. px.) à diopside, en général riche en sulfures (pyrite, marcassite, pyrrhotite, chalcopyrite, mispickel) et dérivant probablement d'un quartzite calcique ou d'un calcaire silico-alumineux et ferrugineux. De nombreuses variantes existent au sein de ce faciès : à grenats, à épidote ou à wollastonite,
- cornéennes à amphiboles (corn. amph.) à hornblende et trémolite actinote prédominants, et secondairement à épidotes, à grenats ou rubanées à diopside,
- quartzites,
- plus rarement : épidotites (pistachite), intercalées sous forme de minces bandes dans les cornéennes à pyroxène, grenatites, très rares cipolins.

Les couches étant très redressées (entre 70°NW et 70°SE), le levé géologique (Cf. Fig. 1) a permis de visualiser une grande partie de la série (Cf. Tab.II).

Tableau II : Succession lithologique observée depuis le contact vers le large

	Dominante	Lithologie détaillée	Epaisseur
1	Minerai	riche en biotite, grenats, avec apophyses et filons	> 5 m
2	Corn. mic.- Succession de :	<ul style="list-style-type: none"> <li>• corn. mic.,</li> <li>• quartzites</li> <li>• corn. px. avec un peu d'épidote</li> <li>• quartzites riches en feldspaths</li> <li>• corn. rubanées (bandes px.à épidote et bandes mic.)</li> <li>• grenatites, avec diopside et un peu d'épidote</li> <li>• corn. px.à wollastonite</li> <li>• corn. mic.</li> </ul>	2 m 0,5 m 1 m 1 m 3 m 1m 0,5m 2 m
3	corn. rubanées	alternances de bandes centim. à décim. de corn. px. à wollastonite et parfois à grenat, de corn. mic., de corn grenatifères, de quartzites riches en feldspaths	28 m
4		quartzites	20 m
5	minerai	Avec intercalaire de corn. rubanées	8 m
6		alternance de corn. px avec épidotes, grenats et calcite (prédominant), de corn. mic. et de bandes quartzitiques	12 m
		corn. rubanées px. riches en pyrite	1 m
		alternance de bandes de 5 à 50 cm d'épaisseur de corn. mic. grenatifères et de corn. px. riches en épidotes	9 m
		corn. rubanées px. avec grenats, épidotes et pyrite.	2,5 m
7	minerai	Interpénétré avec une couche de cipolins px., riches en magnétite et pyrite, avec des enclaves de grenatites	6 m
8	corn. mic. et corn. amph.	En alternance, avec moins fréquemment px. à pyrite	29 m
9	minerai	2 étroites bandes séparées par des intercalaires de corn. mic.	1,5 m
10		corn. mic. et corn. amph.	>36 m

D'une manière générale, le contact granite / cornéennes n'est pas régulier, mais il correspond majoritairement à une couche de minerai de fer, sans qu'il soit possible de préciser s'il s'agit d'une coïncidence ou d'une nécessité géologique. De multiples granitoïdes (aplite, microgranite, granite,...), très altérés, jalonnent cette zone de contact, sous la forme d'apophyses et de filons, rendant la surface très tourmentée.

### 3.3 Altération hydrothermale

#### 3.3.1. Altération hydrothermale du massif granitique

Le granite est un monzogranite sub-alkalin, à grains équants. Il se compose de quartz (entre 28 et 36 %) de feldspaths (environ 60%, essentiellement alcalins) de micas (biotite, 5 à 11 %), d'amphiboles (hornblende verte 1 à 11 %) et de minéraux accessoires (<1 %). Les feldspaths alcalins se présentent sous la forme d'orthose perthitique ou microcline. Les feldspaths plagioclases correspondent principalement au pôle sodique (albite / oligoclase).



Photographies 1 et 2 : Coalescences de fractures affectées d'altération hydrothermale – homme (en haut à gauche) et marteau (à droite) donnent l'échelle

L'altération hydrothermale affecte de façon spectaculaire les joints les plus continus du massif granitique, c'est-à-dire essentiellement les joints de retrait thermique. Cette altération montre clairement une progression depuis les lèvres de la fracture vers l'intérieur du massif, sur des largeurs typiquement inférieures au mètre. Les zones altérées de largeur supérieure au mètre résultent en fait de la coalescence de plusieurs fractures (Cf. Photos. 1 & 2). Cette coalescence est aisément identifiable par le nuancier de couleurs qu'elle engendre, qui suit sensiblement toujours la même progression, depuis le granite sain vers la fracture :

- Invisible à l'œil nu, les prémices de l'altération se traduisent par l'apparition de paillettes de montmorillonite sous forme de microfissures intra-cristallines au cœur des feldspaths ou inter-cristallines au sein même de la matrice du granite,
- les premiers stades d'altération se traduisent par une séricitisation des feldspaths plagioclases et par une pigmentation par les oxydes de fer (rubéfaction par altération des micas), donnant progressivement une couleur rose à rouge,
- Les stades ultérieurs (passages au gore sableux ou argileux) se traduisent par une argilisation marquée des plagioclases (en smectites, donnant un aspect blanchâtre à la matrice rocheuse), des micas (illitisation) et des feldspaths potassiques (altérés en kaolinite),
- Le stade ultime correspond à la prédominance de smectites et de kaolinite, donnant une teinte blanche,

- Le centre de la fracture peut être jalonné d'un liseré verdâtre (probablement lié à la présence de magnésium) ou jaunâtre à ocre (probablement lié à la présence de titane) et d'un remplissage partiel par de la calcite ou du quartz.

Cette altération hydrothermale s'accompagne parfois de minéralisations des épontes de fractures dans le granite sain, surtout à l'approche du contact avec les cornéennes : épidotes fibroradiées, sulfures (pyrite et chalcopryrite),....

La surface concernée par cette altération hydrothermale à la cote des fonds de fouille (en rouge sur la Fig. 1) varie entre 6 % et 21 % (maximale à proximité du contact).

L'altération hydrothermale peut également affecter les filons intrusifs riches en feldspaths, leur conférant des couleurs rouges (par damouritisation des plagioclases, Cf. Photo 2).



Photographies 3 et 4 : Exemples d'altération hydrothermale dans les cornéennes  
– photographie de gauche : au premier plan, filon altéré dans sa masse

### 3.3.2. Altération hydrothermale du massif métamorphisé

Au contraire du granite où elle paraît commandée par la fracturation de retrait thermique, l'altération hydrothermale des cornéennes (en vert sur la Fig. 1) paraît principalement régie par la lithologie de la série, donc par la stratification originelle. Elle affecte principalement des couches de cornéennes rubanées (couches n°3 et n°6) et des cornéennes pyroxéniques.

Elle se traduit sous des formes très variées, s'étendant entre deux pôles :

1. bandes argileuses localisées, souvent associées aux zones de failles tectoniques sur des largeurs métriques, mais également soulignant les joints stratigraphiques sur des largeurs d'ordre centimétrique,
2. microfissuration remplie de calcite ou de phyllosilicates, plus ou moins imperceptible à l'œil, mais rendant le rocher très « cassant ».

L'analyse des zones argileuses a montré la prédominance des smectites et des interstratifiés illite-smectites, la richesse en illite et la faible teneur (relative par rapport à la roche initiale) en quartz et feldspaths. Les diagrammes de diffraction aux rayons X montrent de larges pics traduisant une faible cristallinité (dégradations de la cristallinité initiale et mélange entre différents phyllosilicates).

## 4. Application au projet

La configuration du site a conduit à fonder les bâtiments nucléaires sur le granite alors que les ouvrages de site (station de pompage, salle des machines ,....) sont

fondés sur les terrains métamorphiques. La galerie est entièrement forée dans la série métamorphisée, le puits en mer se situant dans des calcaires marmorisés.

#### 4.1 Cadre géotechnique

Les caractéristiques du granite sain n'appellent pas de commentaire particulier. Il se traduit par des très bonnes qualités matricielles moyennes ( $R_c = 103$  MPa,  $R_{tb} = 8$  MPa,  $E = 100$  GPa). La fracturation est fermée ce qui confère au massif des caractéristiques en grand très élevées :  $V_p = 4000$  à  $4300$  m/s par exemple.

La variabilité lithologique des terrains métamorphiques entraîne une très grande variabilité des paramètres géotechniques (Cf. Tab III). Globalement la matrice est moyennement fragile, extrêmement dure à très dure, extrêmement abrasive.

Certains faciès présentent des caractéristiques extrêmes :

- abrasivité des quartzites, pouvant dépasser 5 points CERCHAR,
- résistance à la compression  $R_c$  des cornéennes amphibolitiques, pouvant atteindre la valeur exceptionnelle de 507 MPa,
- densité du minerai de fer, pouvant atteindre  $4\,500$  kg/m<sup>3</sup>.

La comparaison des  $R_c$  à terre et en mer (à 600 m du contact, cf. 4<sup>ème</sup> ligne du tableau ci-dessous) témoigne de l'affaiblissement des caractéristiques matricielles avec l'éloignement au contact.

Tableau III : Caractéristiques matricielles des terrains métamorphiques

	nb d'essais	Moyenne	Ecart type	min.	max.
Masse volumique t/m <sup>3</sup>	33	2,86	0.29	2.76	4.47
Module d'Young GPa	16	88 $\perp$ à la strati. 115 // à la strati.			
$R_c$ MPa	100	213	129	21,5	507
$R_c$ à terre / en mer	61 / 32	273 / 73	98 / 42	47 / 21,5	507 / 169
$R_{tb}$ MPa	9	17	5.1	5,3	25,6
Abrasivité CERCHAR	8	4,4	1,78	1,3	6
Abrasivité LCPC	3	1322	1111	40	2100

Le massif métamorphique est plus fracturé et plus décomprimé que le granite. Les vitesses sismiques sont moindres : 2700 à 3200 m/s. Les caractéristiques moyennes, dans la partie amont de la galerie de rejet, sont les suivantes :

- discontinuités moyennement espacées (20 / 60 cm) à très rapprochées (< 6 cm),
- Rock Quality Designation RQD moyen : 59 %
- RMR moyen : 60 au droit du puits à terre et 46 au droit du puits en mer.

#### 4.2 Adaptation du mode de fondation aux zones d'altération hydrothermales

Dans un massif de très bonne qualité géotechnique d'ensemble, l'altération hydrothermale amoindrit considérablement les caractéristiques matricielles des terrains, essentiellement à cause de l'apparition de phyllosilicates, déstructurant le matériau. Il a donc été fondamental de limiter le délai d'exposition aux agents météoritiques par la mise en place rapide du béton de propreté. Cependant, certaines zones de mauvaises caractéristiques ont nécessité un traitement par purge

et substitution par du béton de comblement. Conformément à une procédure pré-établie, le volume et la forme du traitement étaient adaptés à la géométrie (en général très allongée) de la zone altérée, ainsi qu'à la contrainte au sol du bâtiment.

L'objectif principal était d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques du massif de fondation. La principale zone traitée a concerné la faille argileuse F1, qui a presque été totalement purgée et substituée dans l'emprise de la salle des machines (HM sur la Fig.1), pour un volume de 300 m<sup>3</sup>. Les cornéennes rubanées et pyroxéniques de l'horizon n°6 ont également fait l'objet de petits traitements locaux (en bleu sur la Fig. 1).

En outre, contrairement au granite, pour lequel la couverture verticale existant avant les terrassements en masse de 1978-79, était importante, une altération superficielle météorique affectait le massif de cornéennes sur une épaisseur pouvant atteindre quelques mètres. Elle se traduisait essentiellement par une décompression marquée, une fracturation localement très intense (débit en « apéricubes ») et un affaiblissement des caractéristiques matricielles. Cette altération, peu profonde mais affectant de grandes surfaces, se surimposait à l'altération hydrothermale, de faible surface mais plus profonde. Elle a été substituée sur toute la partie de la salle des machines fondée sur les terrains métamorphiques.

### **4.3 Creusement de la galerie de rejet**

La présence de la mine sous-marine de Diélette a conduit à envisager un tracé courbe de la galerie de rejet, qui évite soigneusement les quartiers exploités par crainte d'affaissements menaçant la pérennité de l'ouvrage.

La galerie se raccorde à un puits en mer préalablement creusé par la technique du « blind shaft drilling ». Le diamètre fini de ces ouvrages est de 5 m.

La méthodologie retenue a été celle d'un tunnelier roche dure à marinage hydraulique et à front confiné, avec pose du revêtement à l'avancement (voussoirs). Afin de limiter la pression hydraulique au front à des valeurs ne nécessitant pas l'intervention de plongeurs, la cote de la galerie a été calée à 10 m sous le fond marin, soit environ 4 kPa de pression hydrostatique (à marée haute).

La machine a été dimensionnée pour faire face aux caractéristiques extrêmes envisagées pour la roche (design de la roue de coupe et puissance du tunnelier). L'abrasivité a malgré tout conduit à une forte usure des pompes et conduites du circuit de marinage. La densité élevée du minerai de fer a entraîné des obstructions temporaires de ce même circuit. La tête de coupe et le concasseur ont été adaptés à la blocométrie de certaines couches décomprimées sous une si faible couverture rocheuse. Enfin, la forte perméabilité du massif a localement contrarié les opérations d'injection de remplissage à l'extrados des voussoirs.

## **5. Conclusion**

Le chantier a offert une formidable opportunité d'observation du contact batholite intrusif / cornéennes, avec fracturation et altération hydrothermale associée. On retiendra que les principales difficultés géologiques rencontrées lors des travaux, désormais terminés, ont concerné la prédiction des zones affectées par l'altération hydrothermale, la variabilité lithologique des formations métamorphisées et surtout les valeurs extrêmes de certains faciès qui ont fortement influencé les méthodes de chantier. Le massif rocheux demeure toutefois d'une excellente qualité globale, comme en témoigne le comportement des deux tranches nucléaires voisines.