L'auréole de granodiorite de Flamanville et ses grenats : métamorphisme de contact

Dr. Alain ABREAL

Sujet :

Flamanville, en N ormandie, en France, est réputée pour son diapirisme granitique qui date de 280 Ma. Cette inclusion dans les massifs anciens composés de schistes et de grès de l'ordovicien et du silurien, a provoqué un métamorphisme de contact (BP-MT à HT (700°C)) dans une auréole de quelques centaines de mètres de large.
Toutefois, du point de vue de la connaissance des grenats, le système métamorphique de Flamanville est bien plus complexe. La présence de roches très différentes a permis la formation de divers types de grenats.
Ainsi, la présence abondante de fer, exploitée dans la mine sous-marine de Diélette, a permis la formation de grenats andradites rouge sang, voire de sciagites, au milieu de pyrite, la présence de skarns a permis la formation de grenats et associations endémiques, ainsi que de superbes associations d'andradites rouges sur des tapis de salites, diopside et hédenbergite, brunes à vertes, du plus bel effet.

Abstract :

Flamanville, in Normandy, in france is well-known for his granite diapirisme dated 280 My. This inclusion in the ancient massifs composed of schists and sandstone of the ordovician and the silurian, caused a metamorphism of contact (low pressure-medium at high temperature (up to 700°C)) in a glory of some hundred meters broad.
Nevertheless, from the point of view of the knowledge of garnets, the metamorphic system of Flamanville is more complex. The presence of very different rocks allowed the formation of various types of garnets.
So, the abounding iron presence, exploited in the underwater mine of Diélette, allowed the formation of garnets andradites of red blood color, or even of sciagites, in a pyrite matrix, the presence of skarns allowed the formation of garnets and endemic associations, as well as of haughtiness associations of superb associations of red andradites on carpets of brown to green salites, diopside and hédenbergite given a nicest effect.

1. Introduction

Qu'il est dommage que le site de Flamanville, joyau géologique répertorié dans bon nombre de livres de référence ait été choisi pour l'implantation d'une centrale nucléaire, alors que nous sommes en présence d'une auréole de métamorphisme de contact très représentative du phénomène, avec de surcroit présence d'une ancienne mine de fer, conséquence directe d'une minéralisation métallique abondante.

Figure 1 : Flamanville : Plage et port de Diélette

Figure 2 : Flamanville : Cornéennes et granodiorite – Havre Jouan

Figure 3 : Flamanville : Différentes cornéennes – plage de Diélette

2. Les éléments géologiques

2.1 Le Massif ancien

La presqu'île du Cotentin se situe à la frontière de deux grandes unités géologiques : une architecture plissée appartenant au Massif Armoricain à l'ouest, et une architecture tabulaire le Bassin Parisien à l'est.

L'histoire géologique du Cotentin se déroule sur une durée de plus de 2 milliards d'années. Le massif ancien dit icartien date du Précambrien (-2600 à –595 Ma). Il se compose d'un socle cristallophyllien : le Pentévrien, et d'un système sédimentaire datant du Briovérien. Le Pentévrien (défini en baie de Saint Brieuc) n'est connu que dans le Nord du Cotentin où il constitue le tréfonds du cap de la Hague (Jobourg et Jardeheu). Cette ride sarnienne représente une prolongation Sud-ouest du bouclier baltique.

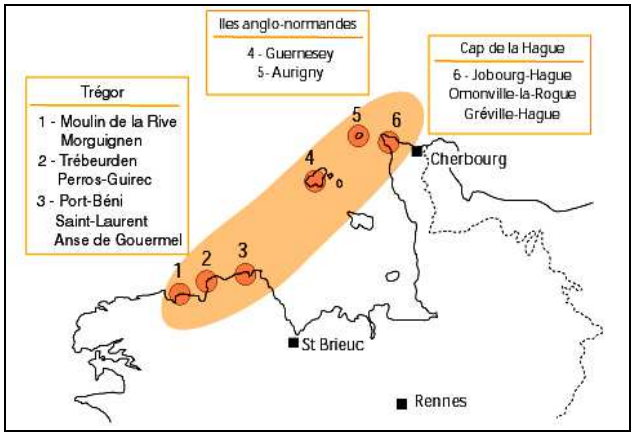


Figure 4 : Flamanville : Restes icartiens en Bretagne et Normandie

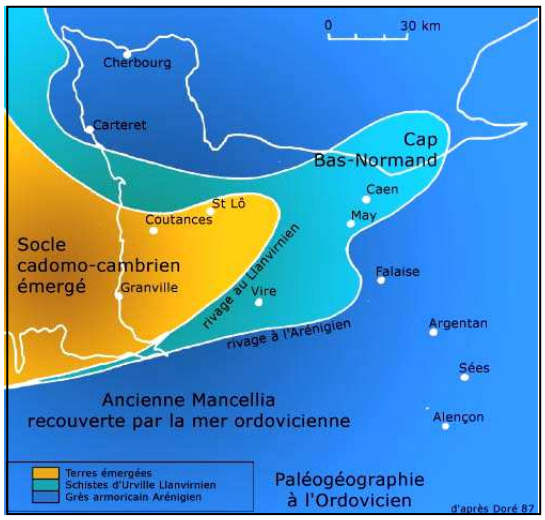


Figure 5 : Flamanville : Transgression et dépôts ordoviciens (- 450 Ma)

Puis se sont produites des alternances de dépôts de roches volcaniques, de grès et de schistes plus ou moins ardoisiers qui appartiennent au Briovérien. Ces terrains précambriens ont été plissés et injectés de venues granitiques lors de la surrection de la chaîne Cadomienne vers - 540 Ma.

Sur cette chaîne érodée se sont déposés près de 3500 mètres de séries sédimentaires schisteuses, carbonatées et surtout gréseuses lors des transgressions marines du Paléozoïque (du Cambrien au Permien inférieur).

Intercalées entre les formations précambriennes et cambriennes, des roches volcaniques témoignent des derniers soubresauts de la chaîne cadomienne.

2.2 L'orogenèse hercynienne

Toutes les séries paléozoïques ont été déformées lors de l'orogénèse d'une nouvelle chaîne de montagnes : la chaîne varisque ou hercynienne (- 420 à - 290 Ma). Elle fut responsable de la création de grandes structures plissées qui s'étendent du sud du Portugal jusqu'en Pologne.

La surrection de cette chaîne s'est accompagnée d'une activité magmatique représentée par un cortège filonien de roches acides et basiques et plus tardivement par l'injection des granodiorites de Flamanville et Barfleur.
Le Corre et al (1991) ont décomposé l'orogenèse hercynienne en quatre étapes majeures :

- Une phase de distension cambro-ordovicienne, caractérisée par le développement de rifts NE-SO au voisinage d'une marge limitant un domaine océanisé méridional. Les granodiorites précoces pourraient être associés à ce contexte
- Une phase de convergence ordovi-silurienne caractérisée par un régime de subduction active vers le nord, accompagné par un métamorphisme de haute pression au dépens de la coûte océanique méridionale.Une phase de collision dévonienne suite à cette convergence de plaques tectoniques, caractérisée par le contact entre la plaque du supercontinent Gondwana au sud et la plaque nord-américaine au nord, cisaillant par la même la plaque armorique entre ces deux supercontinents. Les effets se traduisent par une tectonique tangentielle généralisée, entraînant un épaississement crustal et un métamorphisme de haute température allant jusqu'à l'anatexie.

- Une phase intracontinentale carbonifère caractérisée par l'individualisation de bassins subsidents globalement E-O, par le fonctionnement des grands cisaillements transcurrents dextres E-O, à ONO-ESE et par la mise en place de nombreux granitoïdes syntectoniques.

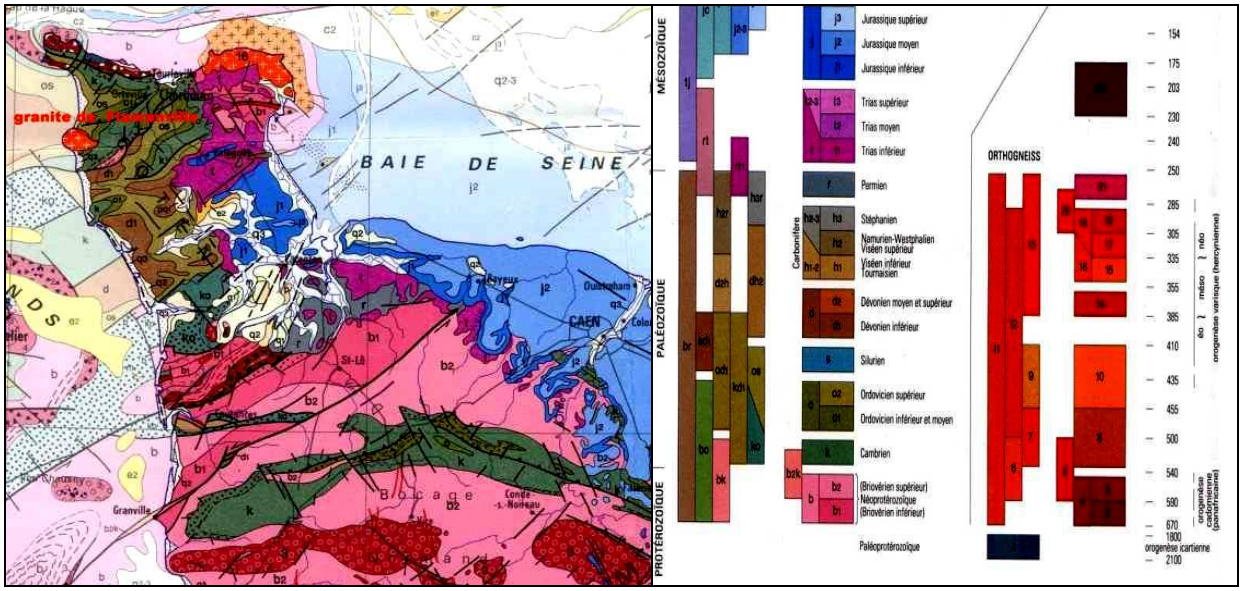


Figure 6 : Flamanville : Carte géologique du Cotentin : Visualisation du granodiorite de Flamanville

Après une longue période d'évolution continentale, il y eut transgression marine du jurassique inférieur au jurassique supérieur qui s'est traduit par le dépôt de sédiments carbonatés puis argilo-calcaires.

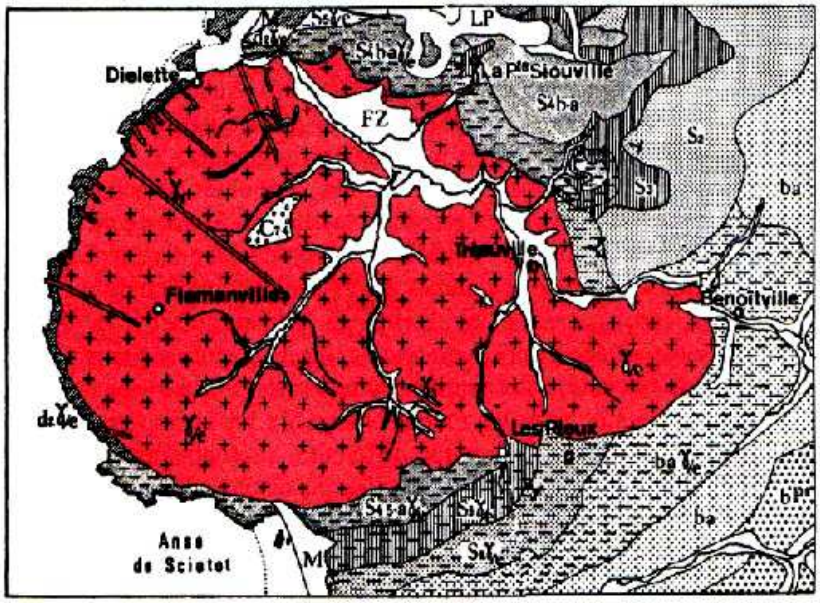
La fin du mésozoïque verra une ultime transgression, avec dépôt de calcaires biodétritiques. Il est important de remarquer que le Cotentin est la seule région de France où sont conservées les traces de trois chaînes de montagnes anciennes (Icartienne (-2500 à -2600 Ma), Cadomienne – 540 Ma, et Varisque (-420-290 Ma).

2.3 Diapirisme du Granodiorite de Flamanville

La chaîne hercynienne est issue du rapprochement de deux supercontinents, le Gondwana et le continent Euro-américain. Leur collision au Dévonien s'est produite avec résorption de deux zones océaniques, l'océan rhéique et Galice-Massif Central par subductions opposées.

Cette orogenèse de la chaîne hercynienne a été accompagnée d'une subduction-collision continentale qui a engendré la fusion crustale de granodiorites issus de la fusion humide de la partie moyenne de la croûte lors de l'épaississement crustal (-350 à -310 Ma), et également comme ce fut le cas à Flamanville, de granodiorites et granodiorites plus tardifs issus de la fusion sèche de la croûte profonde plus basique formés lors du désépaississement crustal. Ces granodiorites ont par la suite migré vers la surface lors de la rupture des dalles de subduction (-280 Ma).

Le magma chaud étant partiellement liquide, il s'est frayé un passage vers la surface au travers de dykes, et a atteint la couverture sédimentaire de l'ordovicien, froide et déformable, dans laquelle il se mit en place selon un mécanisme de diapirisme entre le cambrien et le dévonien ; c'est-à-dire que le matériau liquide est moins dense que l'encaissant et à tendance à le repousser. Toutefois, pour des raisons d'ordre mécanique et tectonique (failles), ce magma n'a du subir qu'un diapirisme de faible ampleur et profiter des failles NNW-SSE pour se répandre.



γ/e : Granodiorite de Flamanville ;
ba : Schistes et grès (Cambrien) ;
S2 : Grès armoricain (Ordovicien inférieur) ;
S3 : Schistes (Ordovicien moy.) ;
S4 b-a : Schistes et grès (Ordovicien supérieur) ;
S5 : Schistes et grès du Silurien ;
d2 : Calcaires et schistes du Dévonien.

L'auréole de métamorphisme de contact est représentée par un figuré de tirets horizontaux en surcharge et par l'association du sigle γ/e à celui du terrain (S2 γ/e = S2 métamorphisé).

Figure 7 : Flamanville : Carte du granodiorite et zones de métamorphismes (Extrait de la carte Cherbourg 1/50 000).

On notera, notamment au nord du massif, que l'étendue de l'auréole est beaucoup plus réduite dans les grès (S2) que dans les formations schisteuses.

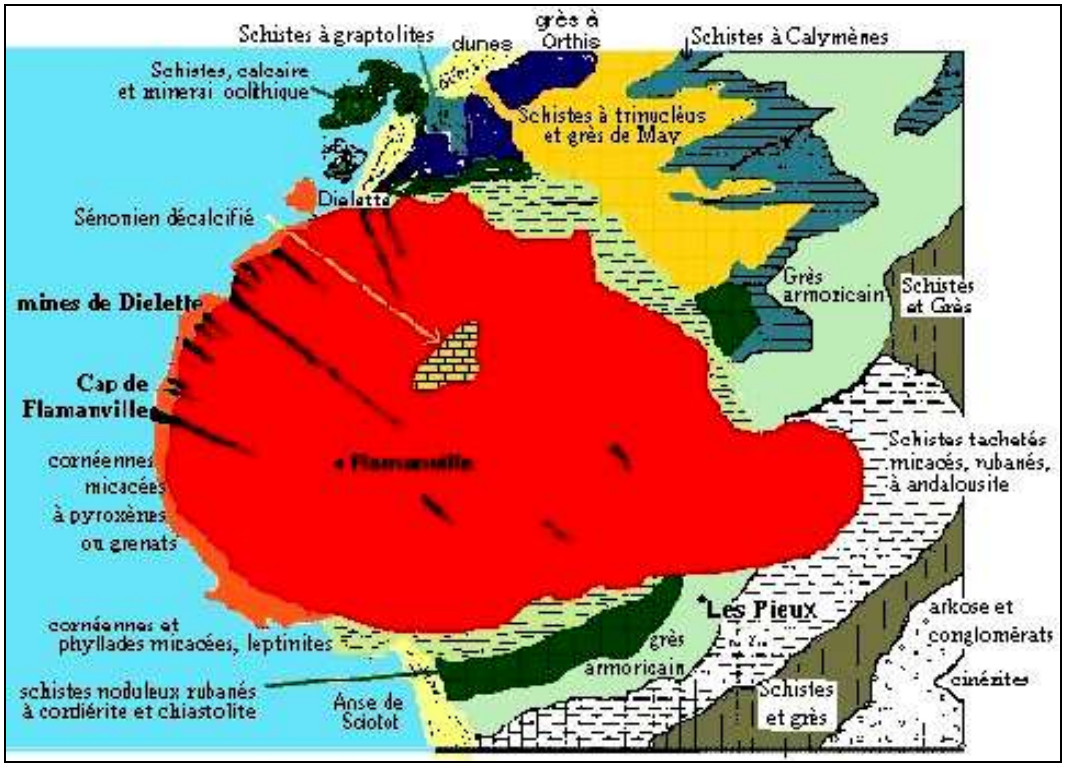


Figure 8 : Flamanville : Carte du granodiorite et zones de métamorphismes (DUSSART Ophélie, LAGRANGE Marine).

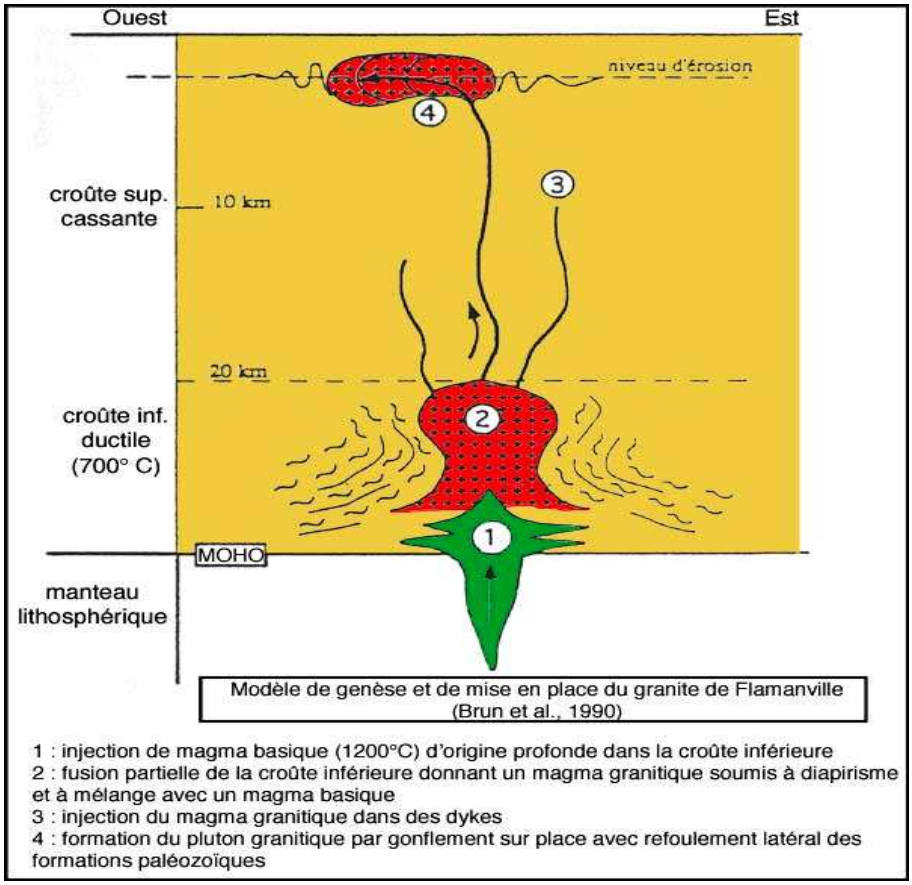


Figure 9 : Flamanville : Schématisation de l'intrusion plutonique sous un massif sédimentaire encaissant

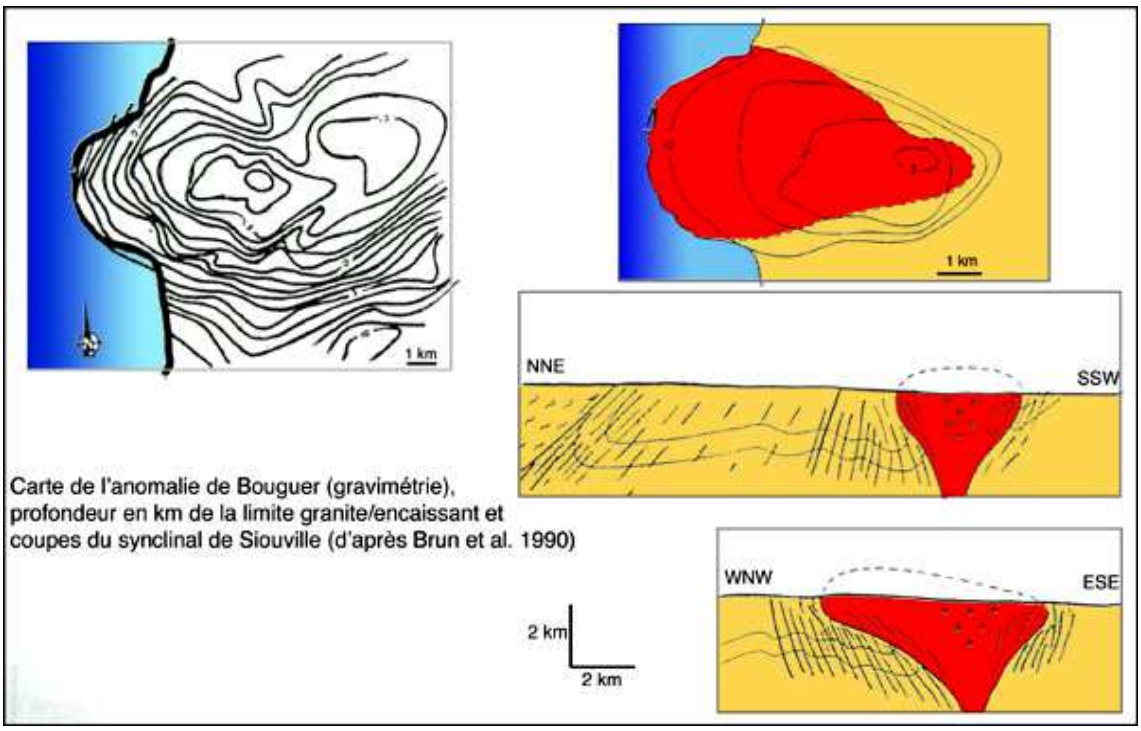


Figure 10 : Flamanville : Carte de l'anomalie de Bouguer (gravimétrie), profondeur en km de la limite granodiorite/encaissant et coupes du synclinal de Siouville (d'après Brun et al. 1990)

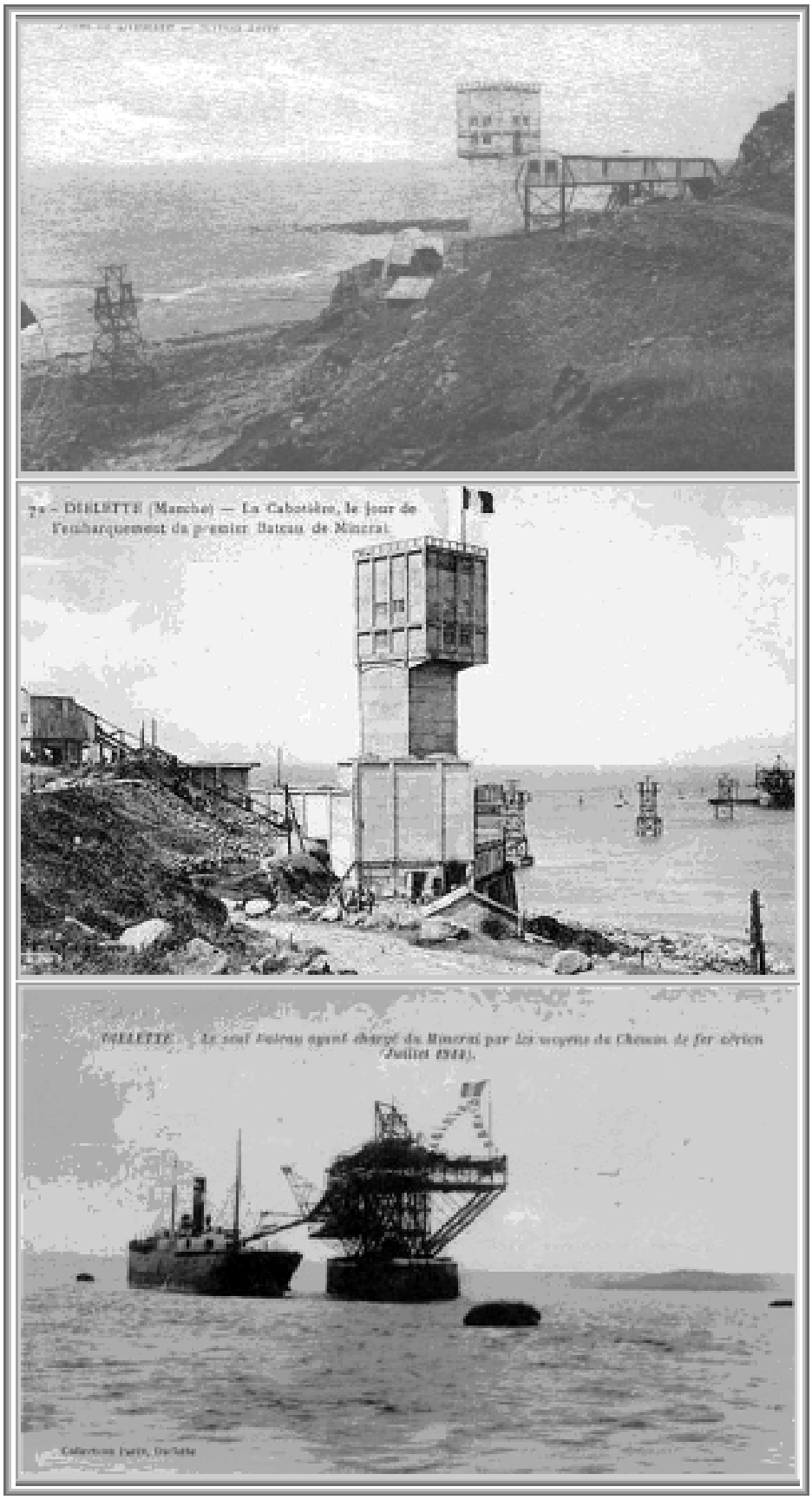


Figure 11 : Flamanville : Mine de Diélette : Cartes postales d'époque

A partir du dyke localisé quasiment à l'extrémité est du pluton, celui-ci a exercé une pression suffisante sur l'encaissant, le synclinal de Siouville, de l'est vers l'ouest, pour le plisser et ainsi créer son propre espace.

2.4 La mine de Diélette

Curiosité technologique et épopée humaine, les mines de Diélette sont des anciennes mines de fer sous-marines, le gisement suivant le pourtour du pluton granitique.

La teneur exceptionnelle du minerai, qui pouvait atteindre les 62% de fer, a poussé des investisseurs, des mineurs et toute leur famille à la quête du précieux minerai malgré les difficultés inhérentes à sa localisation, et ce dès le milieu du XIXème siècle. Les mines de fer de Diélette sont composées d'un réseau de galerie de 15 km de long à quelques 150 m sous le niveau de la mer et nécessitaient un pompage permanent.

Le premier puits fut ouvert en pleine mer en 1855. Mais les infiltrations d'eau s'élevant à 14 m3 dans l'intervalle de deux marées, il était impossible de faire travailler les ouvriers pendant la haute mer et l'épuisement de l'eau à la basse mer laissait trop peu de temps. Le travail fut suspendu en octobre 1862 après avoir fourni 150 à 160 tonnes de minerai. L'extraction du fer fut repris par intermittence par différentes sociétés, notamment par l'industriel allemand Thyssen (créateur de la Société Métallurgique de Normandie), qui en 1907, y construisit de très importantes installations (transbordeur aérien de 642 mètre de longueur monté sur pylônes) pour une extraction de 200 000 à 300 000 tonnes par an. En août 1951, la nouvelle société des mines de Diélette, sous la gérance de la Société des Mines et Produits chimiques de May-sur-Orne, entreprend un difficile dénoyage des puits et des galeries et exploite la mine qui employait 150 ouvriers jusqu'à sa fermeture définitive en juillet 1962.

Le minerai était transporté soit par camions jusqu'au port de Cherbourg avant son chargement sur des navires à destination de la Grande-Bretagne pour la quasi-totalité, soit par téléphérique. Les cargos devaient accoster près de la plate-forme et le minerai, entreposé à terre dans de vastes silos, était acheminé jusqu'aux cales du navire par une noria de godets mus par des câbles à environ 700 mètres du rivage. Toutefois, les bateaux ne pouvaient accoster qu'à marée haute, par temps calme et fort coefficient, à cause de leur tirant d'eau. Les tempêtes hivernales retardaient les chargements et il fallait parfois plusieurs jours pour remplir les cales, lorsque le bateau ne repartait pas à vide faute d'une météo appropriée. Malgré la qualité et la haute teneur en fer, l'exploitation du minerai transformé par des hauts-fourneaux suédois et anglais cessa en 1963 pour cause de coûts d'exploitation trop élevés.

Excepté quelques vestiges de la plateforme à plusieurs centaines de mètres de la côte, il ne reste aucune trace visible de l'ancienne exploitation minière. Le gisement de fer sous-marin est malgré tout loin d'être épuisé, avec pour preuve les perturbations magnétiques toujours ressenties à l'approche du gisement.

La série métamorphisée se distingue par l'omniprésence de fer. Le minerai des mines de Diélette apparaît sous la forme de couches, dont les épaisseurs varient entre quelques décimètres et 8 mètres. C'est une roche très dense, 4,6 avec une dureté variable selon la nature de la gangue (siliceuse, à minéraux calciques ou calcaires) qui a généré d'importants problèmes de marinage lors du creusement des rejets 1 et 2 de la centrale nucléaire EDF.

Le minerai est constitué principalement d'oligiste et de magnétite dans une structure oolithique. La teneur de la minéralisation est très variable (entre 38 et 62%), avec une moyenne de 49%. Les autres constituants du minerai sont essentiellement des sulfures (pyrite, marcasite, pyrrhotine) et des oxydes (ilménites, rutile), avec des concentrations locales en blende et galène.

Les teneurs en magnétite peuvent atteindre la valeur exceptionnelle de 50%. Cette concentration est si importante que le champ magnétique est perturbé aux alentours du port de Diélette et la déclinaison magnétique est déviée de 2°.

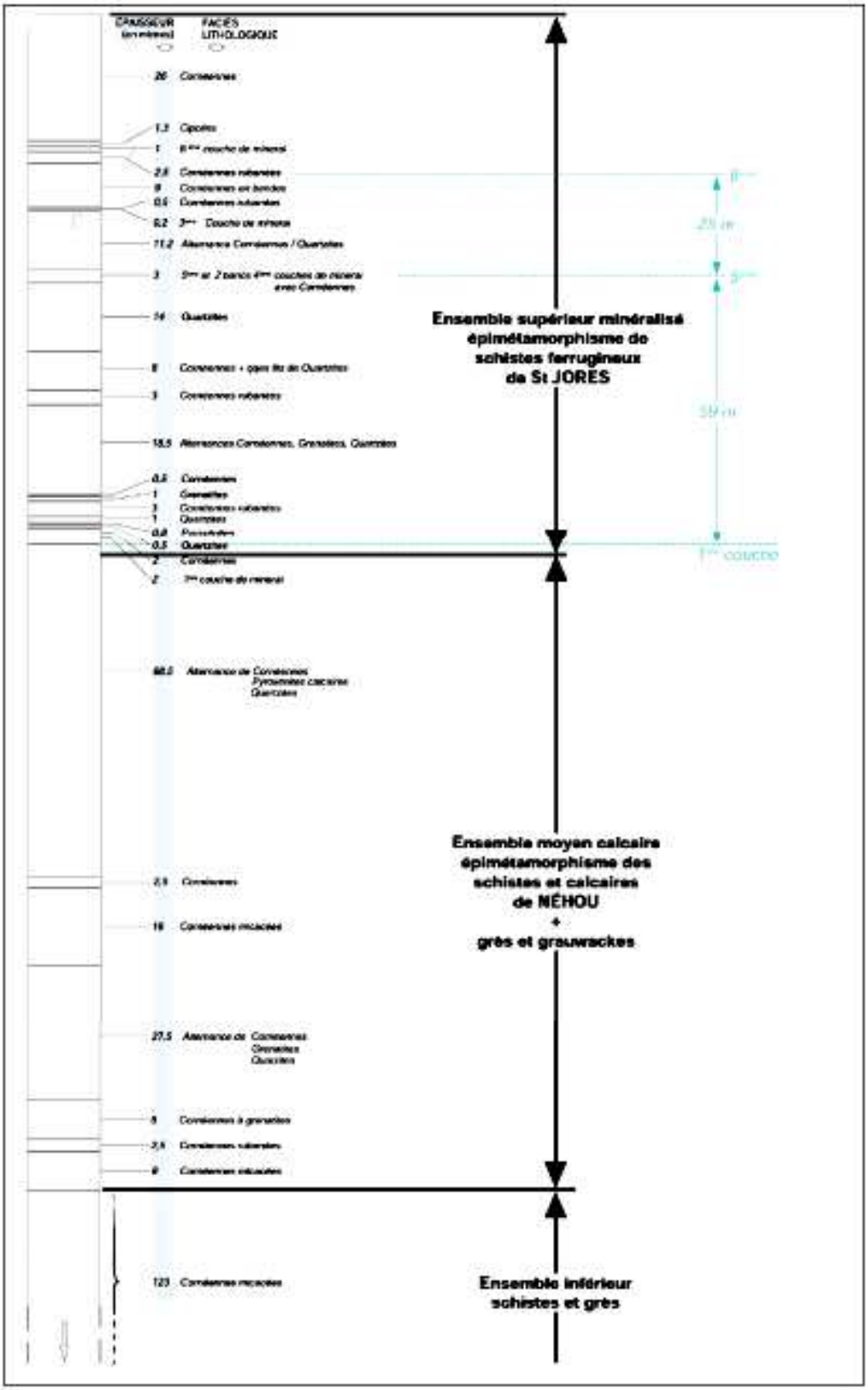


Figure 12 : Flamanville : Stratigraphie à l'ouest du pluton

Ce minerai peut contenir des entroques, des brachiopodes, et autres oolithes, fossiles qui démontrent l'origine sédimentaire de ce minerai. Le fer serait primaire mais le thermométamorphisme aurait provoqué une magnétisation et une hématisation du métal. C'est pourquoi le gisement de Diélette est situé au contact des cornéennes sur le pourtour du pluton granitique.

Figure 13 : Flamanville : Minerai de fer – mine de Diélette

Les couches exploitées concernent les premières centaines de mètres du massif métamorphisé (environ 400 m au droit des ouvrages de rejet EPR, jusqu'à 600 m plus au nord).
Le niveau supérieur de la mine (situé à - 70 GNF) a été vidangé et visité en mars 1980. Un relevé topographique a été réalisé à cette occasion, ce qui permet de superposer avec une précision relative estimée à quelques mètres, le plan de fond de la mine et le plan de masse de l'EPR.

3. Pétrographie

La mise en place du batholite granitique s'est également accompagnée de transformations minéralogiques des roches encaissantes, atteignant des stades de métamorphisme HT-BP (cornéennes à pyroxènes).

Ces transformations sont très complexes et ont vraisemblablement affecté la série en plusieurs phases. L'imprégnation de la série par des fluides riches en fer est un point important de ces minéralisations. Elle affecte la totalité de la série, au moins jusqu'à 400 m du rivage. Cet enrichissement en fer a donné, vraisemblablement dans les couches contenant déjà une notable quantité de fer, des teneurs en fer qui ont justifié une exploitation minière sous-marine jusqu'en 1962.
D'après Gresselin (1962), les terrains susceptibles d'être rencontrés dans la zone de rejet appartient vraisemblablement aux formations du Siégénien (dévonien inférieur) des « schistes et calcaires de Néhou », plus ou moins intensément métamorphisés.

Il convient donc de distinguer les terrains originels de la série sédimentaire et ces mêmes terrains lorsqu'ils sont affectés par le métamorphisme. On comprend aisément que le degré du métamorphisme étant décroissant avec l'éloignement à la bordure du batholite, les modifications minéralogiques, tout comme les modifications structurales s'estompent progressivement.

3.1 Série sédimentaire originelle

Cette série originelle correspond à une série sédimentaire de plateforme carbonatée, installée au Dévonien. Ces « schistes et calcaires de Néhou » se présentent sous la forme de packstones (roches carbonatées à grains fins et jointifs) siltoquartziques (quartz et limon) à matrice calcaréo-argileuse, parfois riches en péloïdes (boues). De rares wackstones (roches carbonatées à grains fins non jointif renfermant moins de 10% de boue) et calcaires sillicités sont identifiés. Les terrains également susceptibles d'être rencontrés sont les grès à Platyorthis Monnieri d'âge geddinien (dévonien inférieur antérieur au siégénien). Ce geddinien est uniquement connu sous la forme d'écailles tectoniques, notamment celle jalonnant le grand accident de St Germain le Gaillard. Il s'agit de grès fins à ciments chloriteux, parfois micacés et bioturbés.

3.2 Série métamorphisée

Lorsqu'ils sont métamorphisés, ces terrains sont abusivement dénommées « cornéennes ».
Au sens strict, les cornéennes sont des roches très dures, non fissiles, à patine et à cassures d'aspect corné, à cristaux fortement engrenés et enchevêtrées, avec parfois des porphyroblastes automorphes. Ce sont des roches totalement recristallisés (quartz, cordiérite, sillimanite, andalousite, plagioclases, biotite et tourmaline).

Saleeb-Roufaiel distingue les cornéennes à micas, à pyroxènes et à amphiboles, selon la nature originelle (respectivement schistes silico-alumineux, calcaires et grauwaches plus ou moins calciques.
Ces cornéennes sont le faciès le plus représenté, au moins dans les 300 mètres à partir du contact avec le granodiorite. Localement, elles contiennent des intercalaires de quartzites, des cipolins et des pyroxénites.
La description lithographique de la série proposée sur la figure précédente est issue de la thèse de Saleed-Roufaiel. Elle a été établie à partir d'observations à l'intérieur de la mine de Diélette. Elle est donc valable sur environ 300 premiers mètres à partir du rivage.

Les cornéennes sont décrites comme des roches massives, de couleurs très sombres, à grains fins, qui ont été entièrement recristallisées lors du métamorphisme. Leur structure rubanée se manifeste par des variations de couleur de bandes micacées, pyroxéniques, épidotiques et amphibolitiques. L'épaisseur de ces bandes est généralement comprise entre 2 et 10 cm, mais de vastes variations locales peuvent être observées.

Les cornéennes peuvent être grenatifères, et quelques lits de grenatites sont connus. Avec des épaisseurs pouvant atteindre 3 m. Saleeb Roufaiel distingue trois types de cornéennes selon le minéral mafique (riche en Mg et Fe) dominant :

a) Cornéennes micacées à dominante de biotite : composées de quartz, feldspaths potassiques et biotites ; ces roches présentent une teneur moyenne en SiO_2 de 67% et une teneur moyenne en oxydes de fer (Fe_2O_3 + FeO) de 8%.
b) Cornéennes amphiboliques à dominante de hornblende ou de trémolite/actinote : composées de quartz, feldspaths plagioclases et amphiboles, ces roches présentent une faible teneur moyenne en SiO_2 (34%) et une importante teneur moyenne en fer (Fe_2O_3 + FeO) de 51%.
c) Cornéennes pyroxéniques à dominante de diopside, contenant quartz, feldspaths plagioclases et pyroxènes ; ces roches présentent une teneur en silice SiO_2 très variable entre 40 et 86% et une teneur moyenne en fer (Fe_2O_3 + FeO) entre 3 et 28%.
d) Quartzites

Figure 14 : Flamanville : Cornéennes au Havre-Jouan, avec vue sur l'anse de Sciotot

Figure 15 : Flamanville : Cornéennes micacées, à pyroxènes, et à amphiboles

NOTA

- Les quartzites sont des roches à grains fins très bien soudés entre eux ; composées de quartz et de feldspaths, elles représentent des teneurs en silice SiO_2 très élevées de l'ordre de 95% et des teneurs en fer très faibles (Fe_2O_3 + FeO) de 1%. La roche sédimentaire originelle est un grès siliceux.
- Les cipolins sont des calcaires métamorphiques à texture saccharoïde, essentiellement composés de calcite et par conséquent très pauvres en silice (33%) et en fer (Fe_2O_3 + FeO : 33%). La roche sédimentaire originelle est un calcaire pur.
- Les grenatites sont des roches très lourdes, à structure granoblastique, se présentant en bancs pouvant atteindre jusqu'à 3m d'épaisseur. Leurs teneurs en silice (33%) et en fer (Fe_2O_3 + FeO) (33%) sont moyennes.

Les épidotites sont très peu répandues, sous forme de fines bandes intercalées dans les cornéennes.

3.3 Métamorphisme de contact

Le granodiorite de Flamanville, sur la côte nord-ouest du Cotentin est souvent pris en référence comme un cas typique de granite intrusif. Il s'agit d'un granodiorite à amphibole, très intéressant par lui-même puisqu'il renferme des feldspaths pluri-centimétriques bien cristallisés, souvent d'un rose soutenu.

Mais surtout, dans le contexte qui nous intéresse, sitologie et genèse des grenats, l'intrusion de ce massif plutonien au cœur d'une série sédimentaire, constituée de schistes et de calcaires du Silurien (-440 à -415 Ma) et du Dévonien (-415 à -360 Ma) affleurant au nord (synclinal de Siouville-Diélette) et de schistes et grès de l'ordovicien au sud (Havre-Jouan)(-490 à -440 Ma), a provoqué un **métamorphisme de contact** typique, à savoir un métamorphisme de climat de basse pression et de haute température BP-HT.

Au contact du granodiorite, sur environ 300m seulement, les roches sédimentaires ont été affectées thermiquement par cette intrusion, et par la migration d'éléments chimiques à partir de la masse granitique intrusive : on parle alors de **métasomatose.** Ces roches sédimentaires du cambrien au dévonien, ont été métamorphisées pour donner naissance à des andalousites (chiastolites).

A partir d'une couche schisteuse, et en se rapprochant du granodiorite, on peut observer la transition suivante :

- Schistes sériciteux
- Schistes à texture finement orientée
  ils sont composés de chloritoïde, à allure schisteuse à cause de l'orientation des micas
- Schistes tachetés
  Ils ont une structure argileuse, parfois finement litée, où se distinguent des cristaux typiques du métamorphisme : cordiérite et andalousite.
- Schistes noduleux et micacés
- Cornéennes à proximité du contact…

De plus, à proximité des grands accidents associés au diapirisme granitique, la circulation tardive de fluides a pu entraîner un métamorphisme, avec modification locale de la minéralogie du terrain (quartz, biotite muscovite et hydromicas.

Au-delà des schistes tachetées, c'est-à-dire plus au large, aucune information sur la nature pétrographique des roches, validé par sondage-carotté, n'est disponible. Par conséquent, l'évolution pétrographique de la série vers le large est également mal appréhendée.
Gresselin (1992) indique la présence d'une paragenèse typique de l'isograde de la chlorite à 2500 m de l'intrusion granitique, toujours au sein des schistes et calcaires de Néhou. Dans cette hypothèse, la totalité des ouvrages de rejet en mer se situerait dans l'auréole métamorphique.

Saleeb Roufaiel (1962) mentionne l'apparition de schistes tachetés dans les couches en travers bancs à environ 600m du contact avec le granodiorite. Dans ce cas, il est possible que la partie terminale des ouvrages de rejet en mer se situe hors de l'auréole de métamorphisme.
Il y a également des schistes et des cornéennes qui furent métamorphisés lors de la fusion partielle des roches encaissantes. Elles se trouvent à l'intérieur du granodiorite où elles ont été piégées. Il existe des filons d'aplite mis en place dans des fissures présentes à ces endroits, créées pendant la formation du massif granitique.

On peut également aller aux hameaux de Percailerie et de Déhus. On y trouve dans leurs environs, un petit monticule situé sur le flanc ouest du massif plutonien. Ce monticule est constitué de gneiss lepynoïde gris, de hornfels et de leptynolites grisâtres et noirâtres, ainsi qu'une grenatite massive, à aspect résineux et de couleurs variées, recouvertes de petits grenats dodécaédriques, associés à de la pyrite et de l'épidote.

Figure 16 : Flamanville : Site de Diélette :
1) massif granitique à Diélette **2) granodiorite rose riche à phénocristaux de feldspath et hornblende verte**
3) morceau de granodiorite **4) la plage et les galets où l'on peut ramasser des blocs de cornéennes**

4. Les grenats

4.1 Le Granodiorite de Flamanville

Le granodiorite de Flamanville est particulièrement complexe. D'origine mantellique et donc principalement basique, il a vu sa composition quelque peu évoluer par la dissolution d'éléments crustaux acides lors de l'anatexie de la partie inférieure du manteau au cours de sa genèse, et/ou s'est enrichi d'enclaves acides qui sont remontés en son sein.

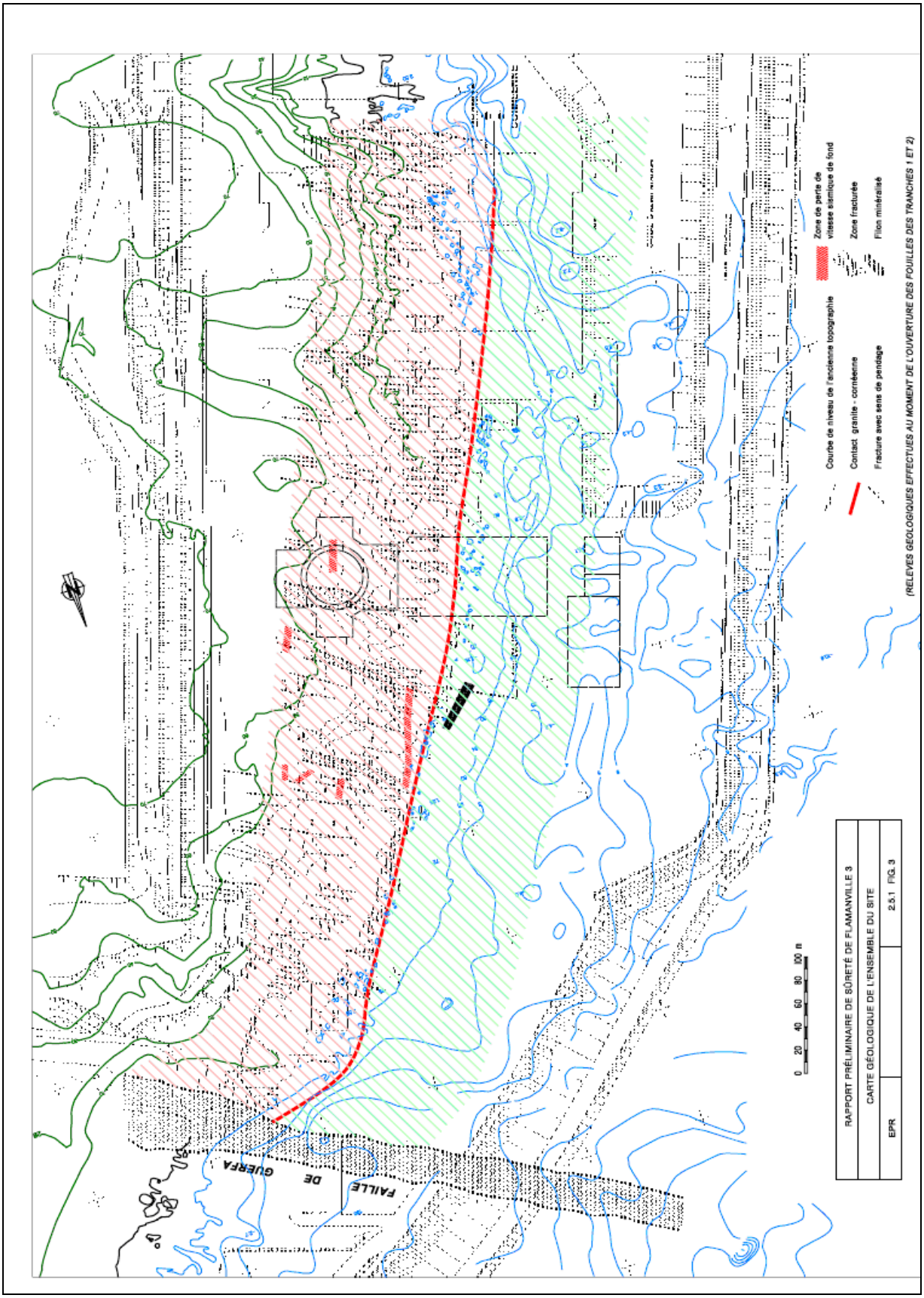


Figure 17 : Flamanville : Site de la centrale EPR : limite pluton-cornéenne (ligne rouge)

La bibliographie indique que le granodiorite de Flamanville a une structure grenue et une texture porphyroïde. Il est constitué de :

		EDF	Bibliographie
Macrocristaux			
	Orthose (essentiel. rose)	30 – 32	29
	Biotite	5 – 11 Parfois altéré en chlorite	
	Amphibole : hornblende verte	1 -14	
Microcristaux			
	Plagioclases Oligoclase et albite	14 – 27 (parfois séritisée)	30
	Quartz xénomorphe	28 - 36	31
Minéraux accessoires			
	Sphène,	Parf. altérée en xantitane	
	Apatite		
	Zircon		
	Magnétite		

Table 1 : Flamanville : Composition minéralogique du granodiorite

D'après la classification de Streckeisen, il s'agit d'un monzogranite d'affinité sub-alcaline avec : 68% de SiO_2; 15% d'Al_2O_3 ; 2,3% de CaO et 8% d'alcalins (Na_2O et K_2O).
De mon côté, j'ai effectué une étude statistique de la composition du granodiorite de Flamanville, basée sur une étude de mesure des grains, et donc forcément moins précise, mais qui s'avère proche des résultats cités dans la bibliographie.

Composition	Granodiorite de Flamanville			plages granitoïdes
	EDF	bibliographie	personnel	
SiO_2	65 %	68 %	61 %	60-75 %
Al_2O_3	15 %	15 %	16 %	16,5-12,5%
K_2O	2,7%	8 %	6 %	3-6 %
Na_2O	4,0%		4 %	3-4 %
FeO			9 %	< 6 %
MgO	2,2%		5 %	< 2,5%
CaO	2,9%	2,3%		

Table 2 : Flamanville : Composition chimique du granodiorite

La comparaison de la composition ainsi obtenue avec les compositions reconnues pour les granitoïdes, permet de définir qu'il s'agit d'un granodiorite peralumineux car le taux d'alumine est supérieur à celui des alcalins.

On constate qu'il est particulièrement pauvre en silice, et notamment en quartz, ce qui est en accord avec sont origine essentiellement mantellique et donc basique.

4.2 Les grenats

Une ballade sur le port de Diélette, à marée basse, permet d'observer des cornéennes érodées par la mer desquelles émergent des grenats plus résistants à l'érosion. Ces grenats ne sont certes pas très esthétiques, mais de part leur nombre et leur dimension (> 1 cm), ils sont les premiers indices, voire les premiers révélateurs de l'intérêt tout particulier de l'auréole de métamorphisme de Flamanville, pour les amateurs de grenats.

Avant d'aller à la pêche aux grenats, une visite sur les falaises au nord de l'anse de Sciotot. Les cornéennes immédiatement au contact du pluton de teinte claire, persuaderont tous les sceptiques et raviront les connaisseurs par la multitude de grenats.

La richesse des grenats présents sur le site de Flamanville provient de la diversité des couches sédimentaires schisteuses, carbonatées, mais essentiellement gréseuses de l'encaissant et des apports métalliques important, notamment du fer (pyrite, et surtout hématite et magnétite massive (Caillère et Kraut 1965, Graindor, 1998) à Diélette) par l'intrusion d'un magma relativement pauvre en silice, mais à la fois alcalin, alumineux et donc ferritique.

Comme les grenats ne sont jamais purs, mais systématiquement constitués d'une solution solide de grenats par substitution entre cations de valence +II d'une part (Fe^{2+}, Ca) et des cations de valence +III (Al, Fe^{3+}), les couleurs des grenats récoltés dans l'auréole de métamorphisme de Flamanville présentent une grande diversité, ainsi que leur aspect, très mat à gemme, brun à rouge vif, clair à très sombre, aux faces lisses ou présentant des stries de croissance.

L'analyse des grenats récoltés, ainsi que celle de leur roche mère a permis d'identifier au moins cinq types distincts de grenats à Flamanville, en accord avec la classification des cornéennes précédentes :

4.2.1. Grenats bruns en grenatites dans cornéennes micacées (Havre-Jouan)

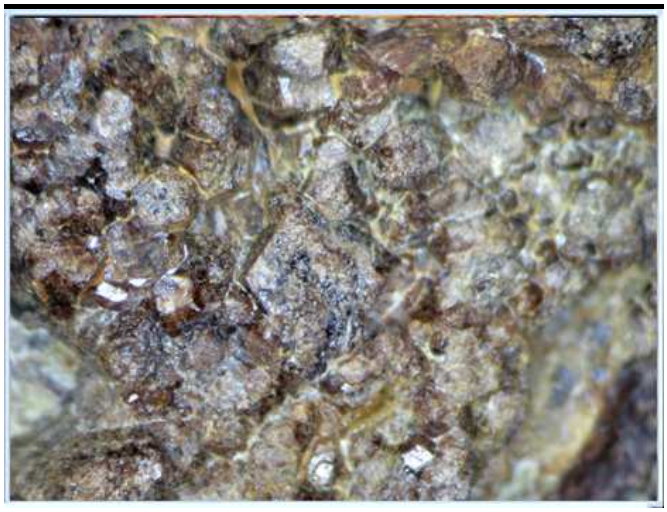
Cette cornéenne, de couleur claire, est composée de quartz, feldspaths potassiques et biotites ; cette roche présente une teneur moyenne en SiO_2 de 67% et une teneur moyenne en oxydes de fer (Fe_2O_3 + FeO) de 8%. Ces cornéennes résultent du métamorphisme des dépôts de schistes et calcaires de Néhou (dévonien).
Les grenats sont de couleur brune, xénomorphes, et mesurent de l'ordre de 1 cm. Ils sont principalement situés en veine à l'intérieur des cornéennes.

Figure 18 : Flamanville : Grenatite et grenat du Havre Jouan – cornéenne claire
Les veines sont parallèles à la frontière granodiorite – cornéenne

4.2.2. Grenats Grossulaire-Andradite dans les cornéennes à amphiboles (Port de Diélette)

Ces cornéennes amphiboliques sont à dominante de hornblende ou de trémolite/actinote ; elles sont composées de quartz, feldspaths plagioclases et amphiboles, et elles apparaissent donc d'une couleur bleue très marquée. Ces roches présentent une faible teneur moyenne en SiO_2 (34%) et une importante teneur moyenne en fer (Fe_2O_3 + FeO) de 51%, avec la présence importante de pyrite, chalcopyrite et oxyde de manganèse.
Les grenats sont de couleur orange à rouge sang lorsqu'il y a présence de pyrite très fine, comme pour les autres gisements de fer/grenats. Ces grenats sont rhombododécaédriques.
D'autres sont du brun au noir le plus intense en l'absence de cette pyrite micrométrique. Ils sont de petites dimensions (1 mm maxi), automorphes, du faciès rhombododécaèdrique, souvent aux arêtes tronquées.

Figure 19 : Flamanville : Cornéennes à pyroxènes avec grenats
Galet de cornéenne à amphibole avec grenats, coll. perso 478-737



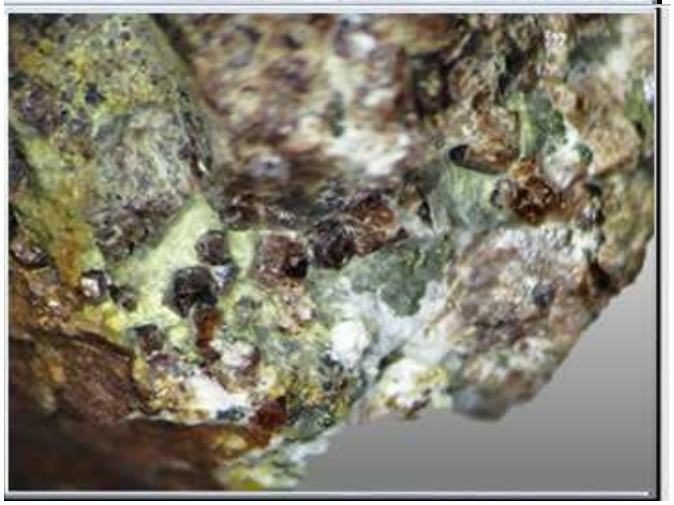


Figure 20 : Flamanville : Grenats dans cornéenne à amphibole (Diélette)

Gauche : Grossulaire – Andradite terreuse après oxydation
Droite : Andradites dans pyrite avec coloration allochromatique par la pyrite ou le soufre
Coll. perso 742, 749-750

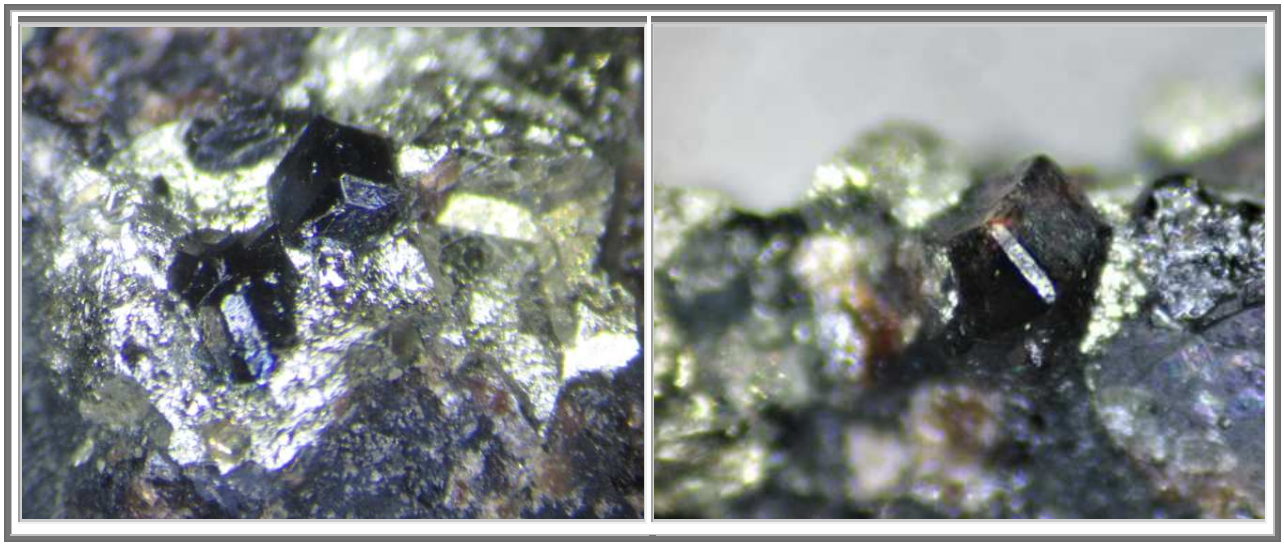


Figure 21 : Flamanville : Grenats noirs dans cornéenne à amphibole (Diélette)
Rhombododécaèdres dont certains aux arêtes tronquées, Coll. Perso 484-485

4.2.3. Grenats Grossulaire-Andradite dans les cornéennes pyroxéniques (Port de Diélette)

Ces cornéennes pyroxéniques à dominante de diopside, contiennent quartz, feldspaths plagioclases et pyroxènes ; et elles apparaissent donc d'une couleur vert-brun. Ces roches présentent une teneur en silice SiO_2 très variable entre 40 et 86% et une teneur moyenne en fer (Fe_2O_3 + FeO) entre 3 et 28%.
Les grenats sont de couleur rouge sang, ils sont présents, de couleur brune-verte, dans les fentes où il y a présence de calcite. Ils sont principalement présents sous la forme de petites plaques (4 à 5 cm) recouvertes de cristaux de faibles reliefs.
Les grenats sont en association avec diopside et hédenbergite dans une proportion moyenne de 50% - 50%.

Figure 22 : Flamanville : Cornéennes à pyroxènes avec présence de calcite

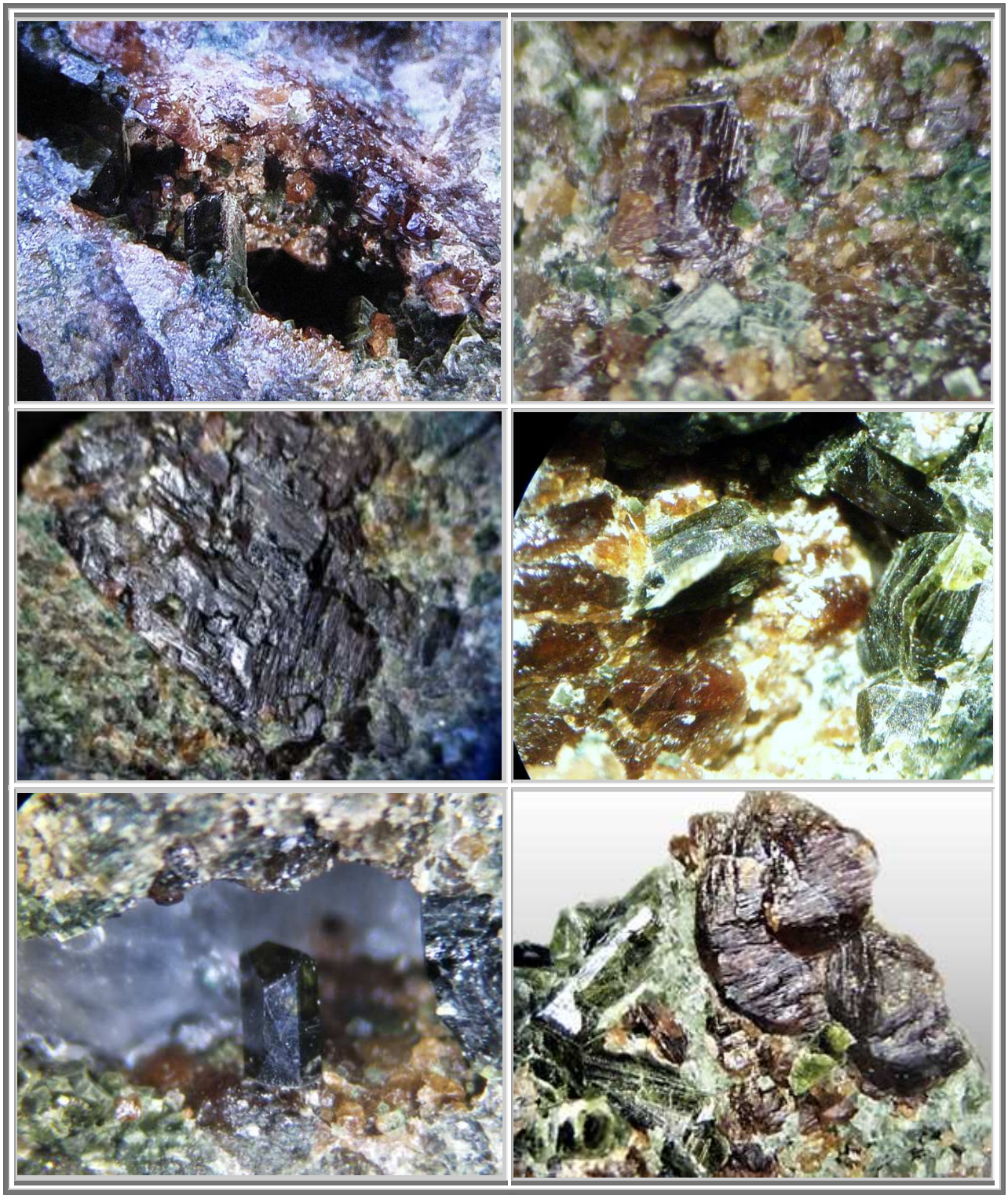


Figure 23 : Flamanville : Minéraux de cornéennes pyroxéniques
Echantillons grenat, hedenbergite et diopside
hedenbergite recouverte de pyrite, coll. perso 722-749

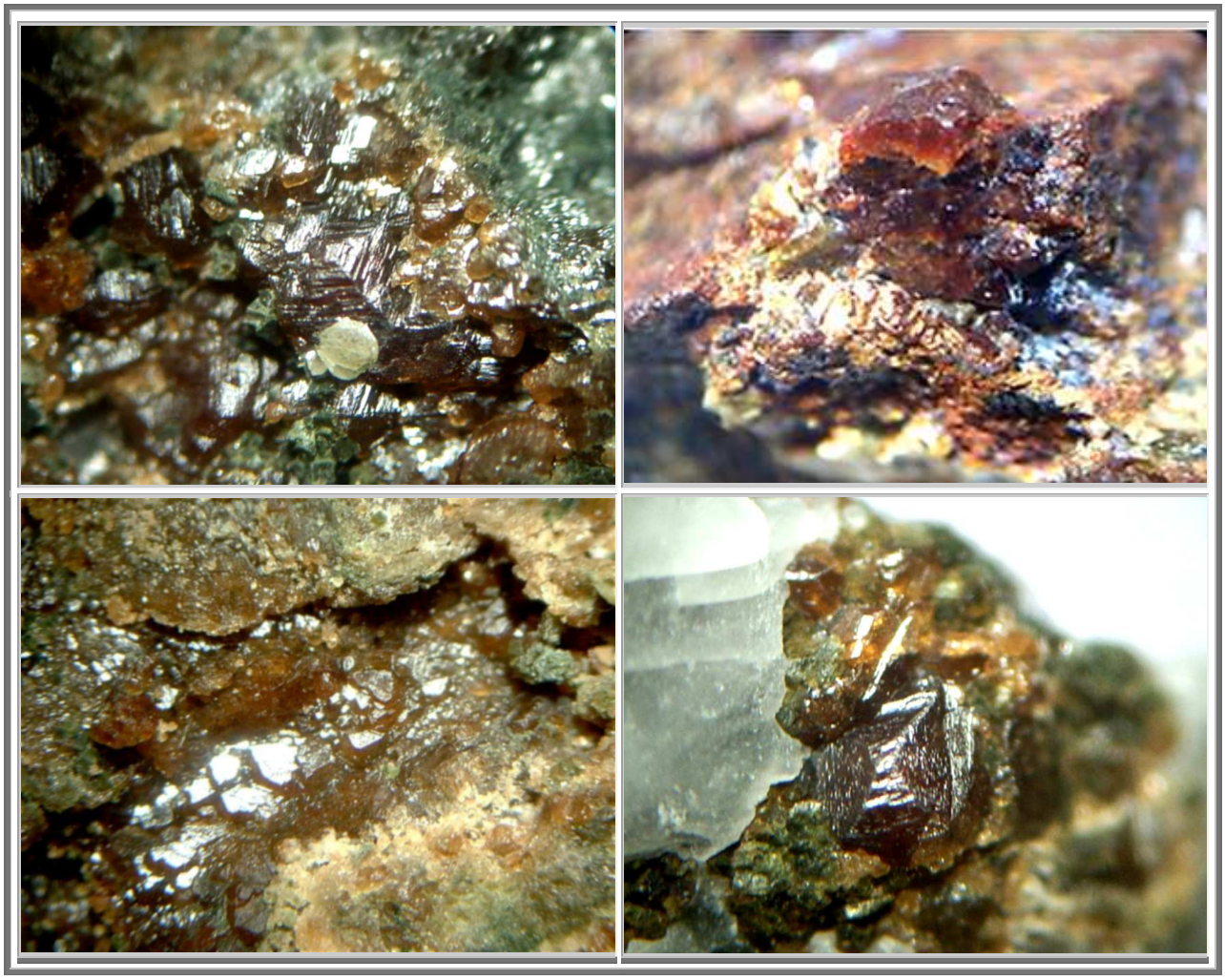


Figure 24 : Flamanville : Minéraux de cornéennes pyroxéniques
Echantillons grenat, hedenbergite et diopside, coll. perso 722-738

4.2.4. Mélanite (route de Havre Jouan)

Ce sont des grenats noirs, de faciès rhombododécaédrique à arêtes tronquées, qui atteignent les 10 mm.
Ils sont accompagnés d'anorthote et d'épidote

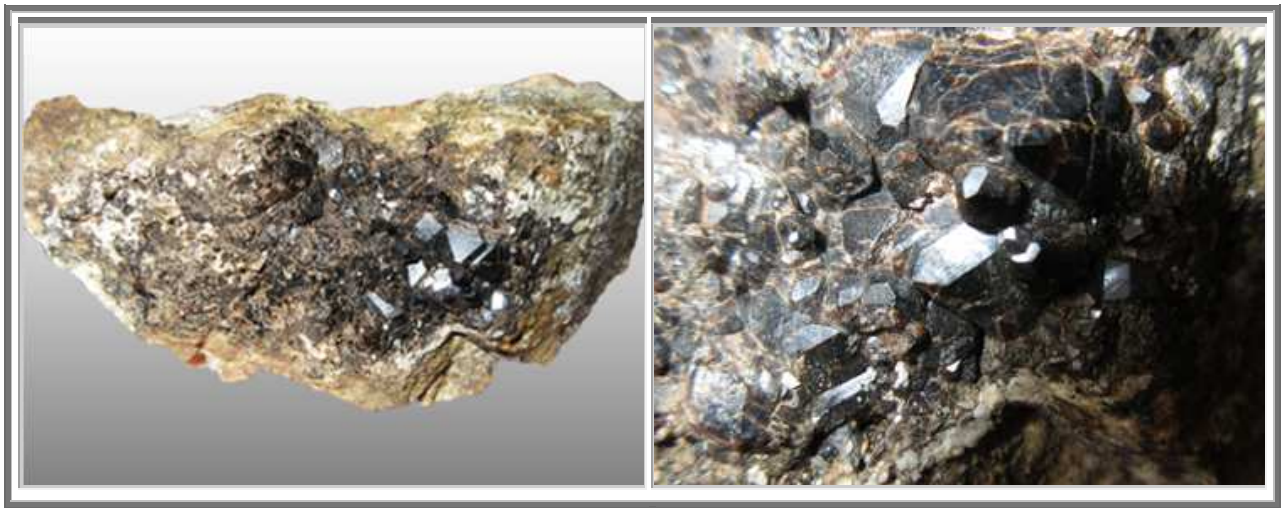


Figure 25 : Flamanville : Mélanite du Havre Jouan, dim 100 mm, n° 1118

4.2.5. Autres Grenats trouvés ponctuellement (Port de Diélette)

Deux autres types de grenats ont été récoltés de manière unique pour chacun de ces types :

- Grenats de skarns présents sous une forme quasi sphérique, presque noirs, de 4 mm de diamètre environ, au milieu de cristaux d'albite blanche, de pyrite, d'épidote et de wollastonite ?

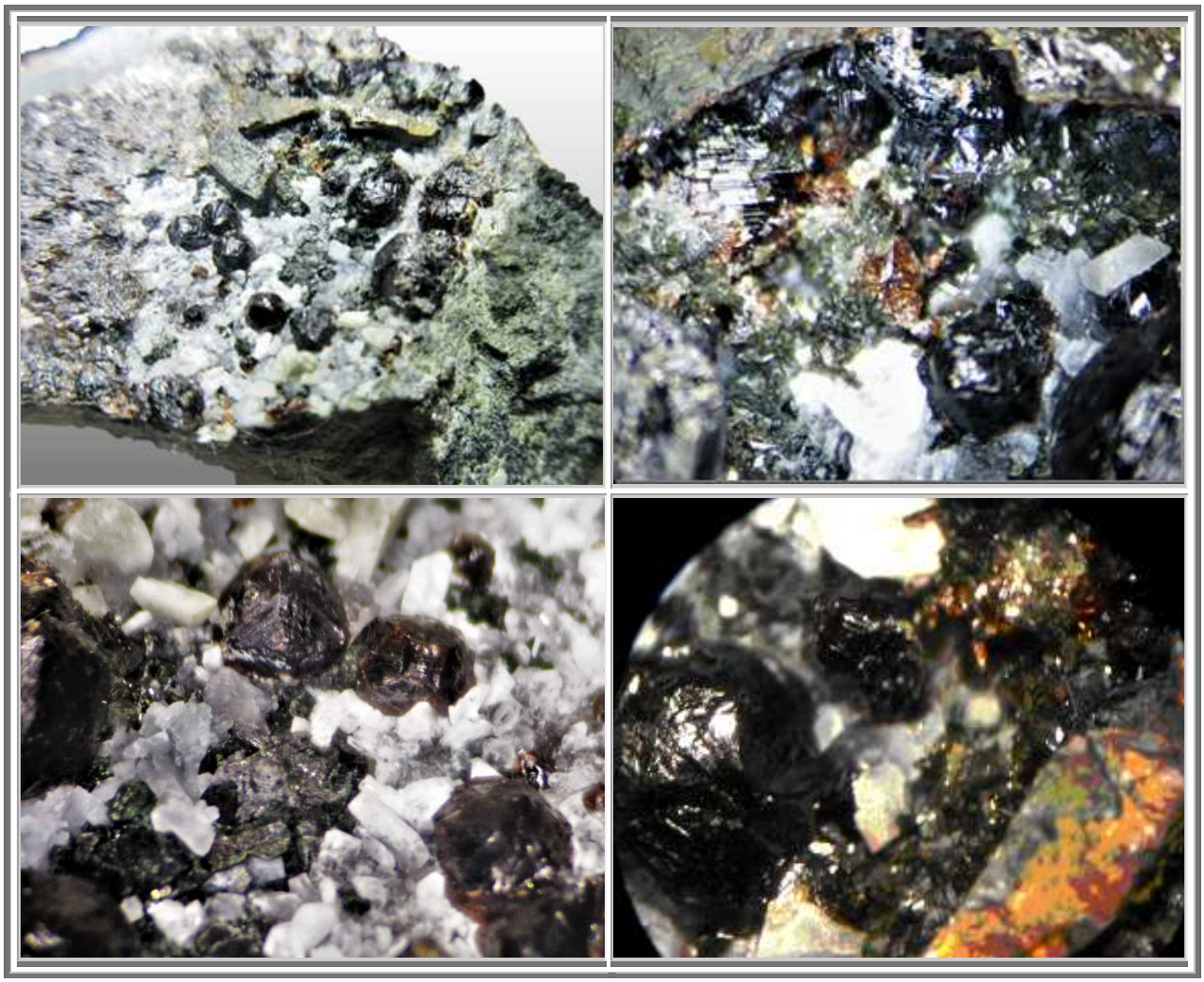


Figure 26 : Flamanville : Minéraux de skarn : Andradite, Albite, Wollastonite, Epidote, Pyrite, 739-740

- Grenats grossulaires de seconde génération, transparents, de couleur claire, de formes rhombododécaédriques, qui viennent cristalliser sur la première génération de grenats grossulaire – andradite rouge sombre.

Figure 27 : Flamanville : Double génération de grenats
Grossulaire – Andradites puis Grossulaires gemmes, n° 480 - 481

4.3 Minéraux associés

Les principaux minéraux associés aux grenats sont :

- Diopside, hedenbergite et calcite dans les cornéennes à pyroxène
- Epidote et pyrite dans les cornéennes à amphibole

Figure 28 : Flamanville : Minéraux associés

Diopside gemme, n°726 — **Epidote**
Epidote sur Grenat — **Clinochlore**
Apatite 1 mm, dans piece 480 — **Diamant 1 mm, dans piece 48**

5. Nature des grenats

E. MARCOUX, E. LEBRUN et E. BAGES (2012), ont analysé un certain nombre de grenats de Diélette.
D'après ces récentes analyses, tous les grenats de Diélette-Flamanville sont des grossulaires.
Nous savons que les grenats sont estampillés du nom du pôle majoritaire du grenat, et que par conséquent, il est difficile de bien identifier un grenat sans analyse chimique, notamment par microsonde électronique. Diélette-Flamanville en est bien la preuve, si ce que j'appelais hessonite dans l'ancienne version de ce livre, reste bien des grossulaire hessonite, les andradites d'antan sont en fait des grossulaires riches en andradite. Et surtout, pas d'almandins sur ce site ; pire encore, l'ensemble des grenats sont pauvres en almandins (<10 %at).

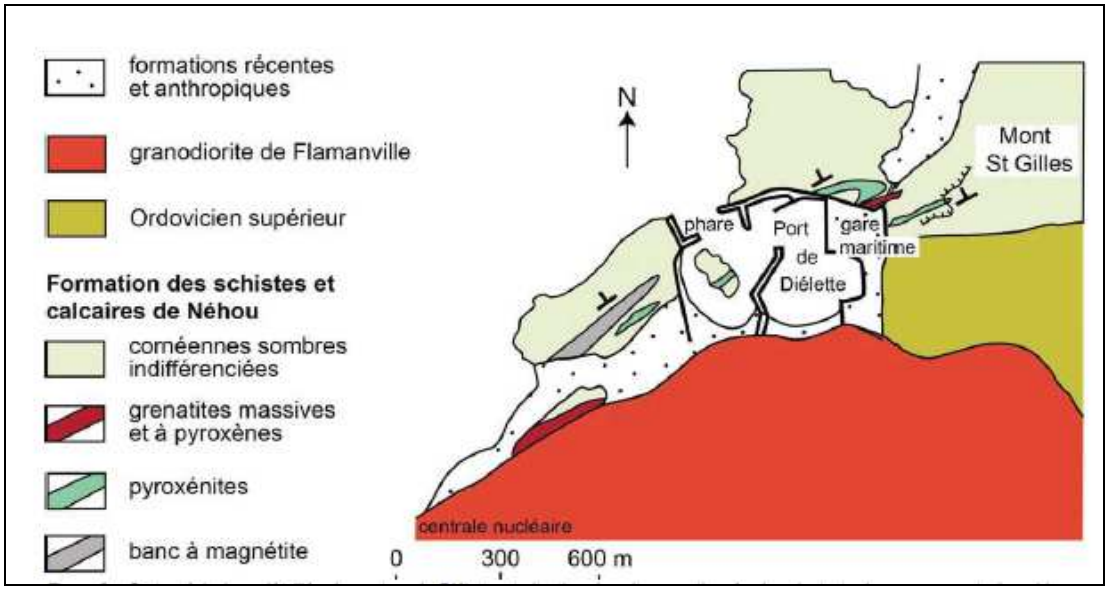


Figure 29 : Flamanville : Zonation des types de roches
Et indications des localisations des grenats analysés E. MARCOUX, E. LEBRUN et E. BAGES (2012),

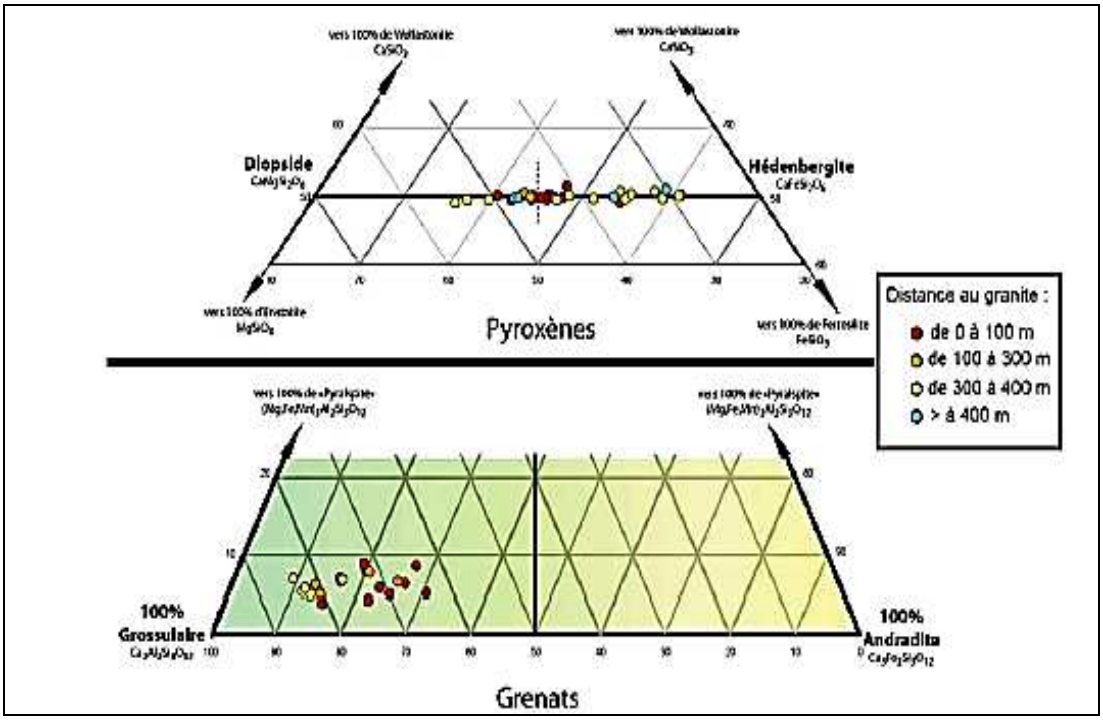


Figure 30 : Flamanville : Composition des pyroxènes et des grenats vs la distance à la granodiorite
(E MARCOUX, E LEBRUN et E BAGES (2012))

Grenat		% Gr, And, Alm
Centrale nucléaire	$(Ca_{2.77}Fe^{2+}_{0.26}Mn_{0.04}Ti_{0.04})_{3.11}\,(Al_{1.29}Fe^{3+}_{0.55})_{1.84}\,(SiO_4)_3$	$Gr_{64}\ And_{27}\ Alm_{08}$
	$(Ca_{2.90}Fe^{2+}_{0.17}Mn_{0.01}Ti_{0.05})_{3.13}\,(Al_{1.60}Fe^{3+}_{0.25})_{1.85}\,(SiO_4)_3$	$Gr_{82}\ And_{13}\ Alm_{05}$
Port	$(Ca_{2.84}Fe^{2+}_{0.17}Mn_{0.03}Ti_{0.02})_{3.06}\,(Al_{1.40}Fe^{3+}_{0.52})_{1.92}\,(SiO_4)_3$	$Gr_{69}\ And_{26}\ Alm_{05}$
	$(Ca_{2.90}Fe^{2+}_{0.17}Mn_{0.04}Ti_{0.08})_{3.19}\,(Al_{1.54}Fe^{3+}_{0.26})_{1.80}\,(SiO_4)_3$	$Gr_{81}\ And_{14}\ Alm_{05}$
Gare maritime	$(Ca_{2.84}Fe^{2+}_{0.17}Mn_{0.04}Ti_{0.03})_{3.08}\,(Al_{1.55}Fe^{3+}_{0.34})_{1.89}\,(SiO_4)_3$	$Gr_{77}\ And_{17}\ Alm_{05}$
	$(Ca_{2.84}Fe^{2+}_{0.18}Mn_{0.04}Ti_{0.08})_{3.07}\,(Al_{1.70}Fe^{3+}_{0.19})_{1.89}\,(SiO_4)_3$	$Gr_{85}\ And_{09}\ Alm_{05}$

Table 3 : Flamanville : Composition chimique des grenats
Selon E. MARCOUX, E. LEBRUN et E. BAGES (2012),

Comme généralement noté dans les skarns, les compositions des grenats varient lorsqu'on s'éloigne du pluton intrusif avec un appauvrissement en Andradite. Cette évolution provient du fait que la diffusion de l'aluminium atteint des distances supérieures à celle du fer dans les skarns.
Ainsi, par défaut de fer, les grossulaires sont moins riches en andradite et par conséquent, plus riches en grossulaire.
Au Havre-Jouan, le sud-est de l'auréole de métamorphisme présente essentiellement des grenatites brunes de grossulaires. Présentes sur une largeur de 5 à 10 m seulement, au contact du pluton, les grenatites sont orientées par veines parallèles à la ligne de contact pluton-cornéenne.

Les cornéennes grises à amphibole ou micacées sont nettement moins résistantes à l'érosion que les cornéennes à pyroxènes. Elles se désagrègent plus facilement et laissent apparaître en émergence des grenats, qui eux, sont plus résistants que leur matrice environnante.

Les grenatites brunes se désagrègent facilement et résistent moins bien à l'érosion que les cornéennes grises encaissantes ; ainsi elles apparaissent le plus souvent en creux entre les autres cornéennes très finement cristallisées et très dures. Quelques grenats globuleux apparaissent en relief sur la surface mouillée et luisante de la passée de grenatite.

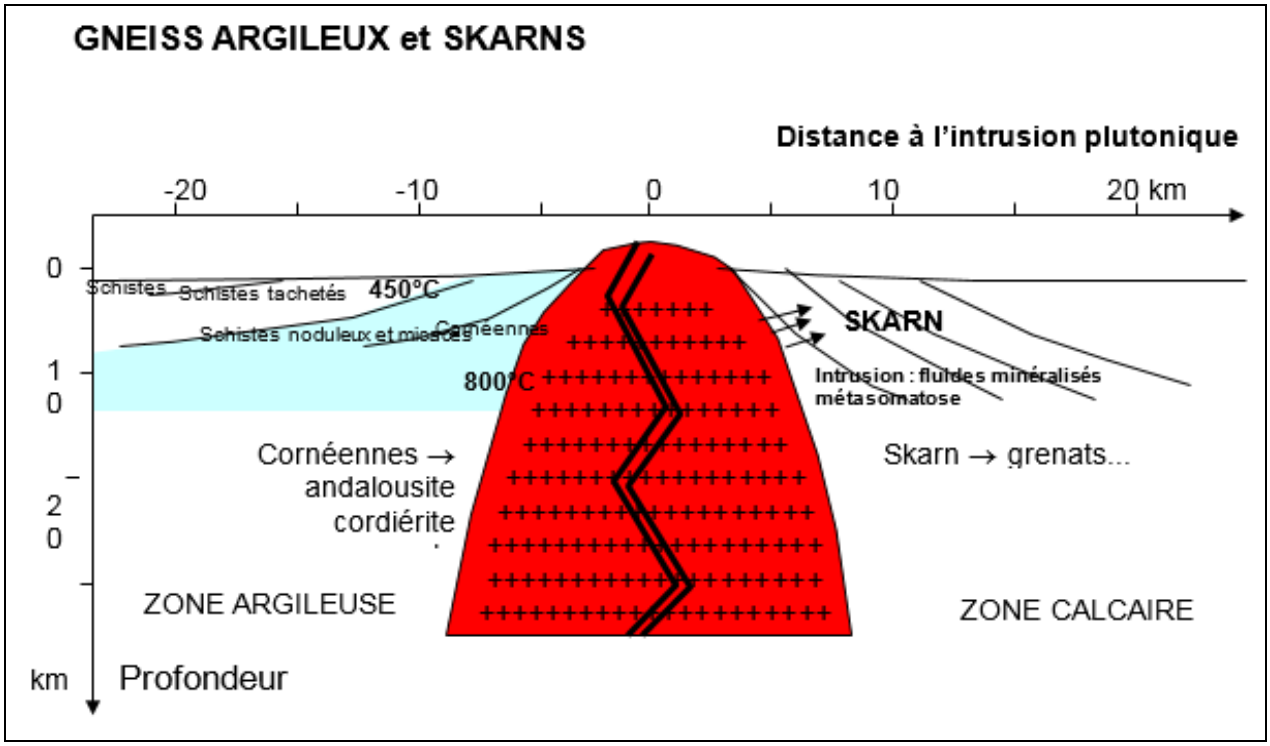
6. Mécanismes

6.1 Métamorphisme isochimique

La plupart des roches de l'auréole de métamorphisme ne sont que peu transformées, ainsi les grès ordoviciens se sont recristallisés en quartzite, et les calcaires dévoniens en cipolin, sorte de marbre. Il n'y a donc eu que recristallisation sous l'effet de la température sans modification chimique globale de la roche mère, si ce n'est éventuellement un départ d'eau et de CO_2. On parle alors de métamorphisme isochimique ou topochimique. C'est principalement la chaleur dissipée par le corps du pluton en refroidissement qui est responsable des réactions. A Flamanville, la température atteinte aurait été de 700°C.

Localement, dès que la température de 450°C est atteinte, il peut y avoir recombinaison des éléments chimiques avec formation des grenats, et des chiastolites, dans une cornéenne métamorphique

Dans de nombreuses petites veines (2 à 7 cm), présentes dans les cornéennes à pyroxènes reconnaissables par leur teinte très sombre, de couleur vert foncé-brune, les grenats sont généralement accompagnés de diopside et hédenbergite. D'autres cristaux probablement des pyroxènes ont également pu être observés, nous les considérerons comme des augites, c'est-à-dire des minéraux intermédiaires entre les pôles ferriques, représenté par l'hédenbergite ($Ca\ Fe^{2+}\ [Si_2O_6]$), et magnésien, représenté par le diopside ($Ca\ Mg\ [Si_2O_6]$).
De la pyrite est parfois présente en très faible concentration.



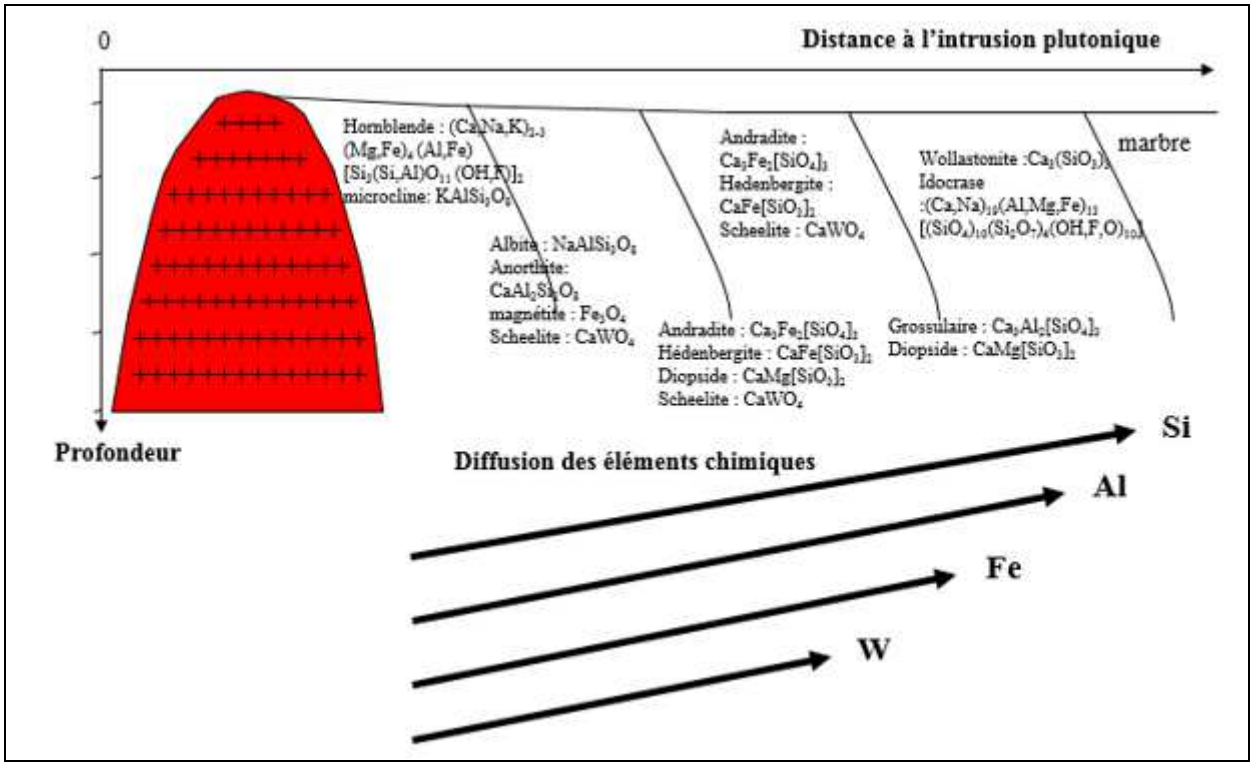


Figure 31 : Flamanville : Présentation des évolutions par métasomatose des roches gneissiques argileuses
Et présentation des distances relatives de diffusion des éléments chimiques à partir du pluton et minéraux associés

Composition des minéraux observés dans les cornéennes pyroxéniques de Flamanville :

Clinopyroxènes :
- Diopside : $Ca\ Mg\ [Si_2O_6]$
- Hédenbergite : $Ca\ Fe^{2+}\ [Si_2O_6]$
- Augite : $(Ca, Na)\ (Mg, Fe^{2+}, Al,Fe^{3+})\ [(Si,Al)_2O_6]$

Calcite : $CaCO_3$

Grenats :
- Grossulaire - Andradite : $Ca_3\ (Al,Fe)_2\ (SiO_4)_3$
- Hessonite : $Ca_3\ Al_2\ (SiO_4)_3$

Pyrite : FeS_2

Les analyses effectuées par Marcoux et al (2012) montrent que les clinopyroxènes ont des composiitons médianes entre diopside et hédenbergite.

Des diopsides cristallisées sont présentes dans la masse même des cornéennes en l'absence de tout autre minéral.
En revanche, les grenats ne sont présents que sous de la calcite cristallisée ; les échantillons les plus remarquables se rencontrant dans de petites géodes qui semblent être formées par la cristallisation de diopsides centimétriques.

La présence de calcite indique qu'il ne s'agit pas de cristallisation subcrustale, car dans ce cas, il n'y aurait pas de CO_2 et donc pas de carbonate mais belle et bien d'une cristallisation due au métamorphisme.

Le métamorphisme du magma igné mafique en présence des dépôts carbonatés, a permis la cristallisation des clinopyroxènes aux température supérieures (700°C) présents naturellement dans le magma mafique du pluton..
Dans les veines, où des roches carbonatées ont été piégées, il y a eu recombinaison des éléments chimiques et cristallisations de grenats andradites et hessonite, avec libération de CO_2.

6.2 Métasomatose

L'analyse chimique du granodiorite de Flamanville permet d'aborder le thème de la métasomatose. L'origine carbonatée des schistes de Néhou ne permet pas à elle seule d'expliquer la formation des grenats, et ce quelles qu'ont pu être les conditions de température.

Les éléments chimiques nécessaires à la constitution des grenats, l'aluminium et surtout le fer ne sont que peu présents dans les dépôts dévoniens (hors enrichissements en minerais de fer au-dessous de 70 m GNF), alors qu'ils sont très abondants dans le pluton. Les éléments métalliques ont ainsi migré du pluton vers l'encaissant sédimentaire et sont allés enrichir celui-ci en fer et aluminium.

On trouve sur le site de Flamanville deux types de grenats issus de ces migrations.

- Lorsque la migration des éléments métalliques se produit en grande quantité, non pas par diffusion mais par exemple par injection de fluides chauds sous pression, ces éléments ont pu croiser des failles, s'y infiltrer et cristalliser sous la forme de veines de grenatites, avec essentiellement des grossulaires riches en andradite. Ces veines ne sont présentes qu'aux abords immédiats du pluton, essentiellement perpendiculaires à la frontière avec les cornéennes.
- La migration des éléments métalliques, par effet hydrothermal ou par diffusion, diminue lorsqu'on s'éloigne de la granodiorite. Ainsi, les grenats qui se forment dans le skarn forment près du pluton, des grossulaires - andradite $Ca_3(Al_x,Fe_{1-x})_2(SiO_4)_3$, alors qu'en séloignant du pluton, la concentration en Fer est moins importante, seul l'aluminium arrive encore à diffuser, et il n'y a plus que cristallisation de grossulaire $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$, principalement.

Localement, la minéralisation apportée par le pluton est intermédiaire et l'association roche mère basique – éléments métalliques du pluton permet de former des skarns. J'ai ainsi pu trouver à Diélette, une petite géode referme même de l'épidote, de la pyrite, de nombreuses anorthites et de la « wollastonite ».

Composition des minéraux observés dans les skarns de Flamanville :

Epidote : rare
- pistacite : $Ca_2\ (Al,Fe^{3+})Al_2O(SiO_4/Si_2O_7)(OH)$

Anorthite : $CaAl_2\ Si_2O_8$ rare

Wollastonite : $CaSiO_3$?, rare

Pyrite : FeS_2

Grenats:
- Grossulaire - Andradite : $Ca_3 (Al,Fe)_2 (SiO_4)_3$
- Hessonite : $Ca_3Al_2 (SiO_4)_3$

6.2.1. Grenats des cornéennes à amphibole bleutées

Ces corméennes sont parcourues de veines très riches en pyrite.

Composition des minéraux observés dans les cornéennes bleues de Flamanville :

Pyrite : $Fe^{2+} S_2^{2-}$
Limonite : Fe_2O_3
Grenats:
- Andradite : $Ca_3Fe_2 (SiO_4)_3$
- Grossulaire : $Ca_3Al_2 (SiO_4)_3$

Ces grenatites renferment de petits cristaux de grenats de couleur rouge vif, de qualité gemme ou des grenats opaques jaunes orangés après oxydation des grenats ci-dessus.
Ces grenats sont probablement dus au métamorphisme des couches de gisements ferreux. Il s'agit donc d'un métamorphisme topochimique.

On remarquera néanmoins que les grenats prisonniers de la pyrite ne sont que peu au contact de l'oxygène, la qualité de la pyrite en atteste, la formation de ces grenats n'a donc pu se produire que par la présence conjuguée de Fe^{2+} et de calcium pour former de l'andradite $Ca_3 Fe_2 (SiO_4)_3$.

D'autres grenats ont été découverts, dans de petites poches, pleines de limonite. Ces grenats sont volants, sans adhérence au substrat. Plus ocre et surtout très opaque, il s'agit là de grenats andradite. Leur présence au sein d'une limonite de Fe^{3+} indique que les grenats se sont formés en milieu oxydant. De ce fait, les grenats renferment une certaine quantité de cations Fe^{3+} en substitution de l'aluminium, formant ainsi de la sciagite. Il serait intéressant de pouvoir scier ces grenats pour voir s'il y a une éventuelle zonation entre andradite et sciagite, mais les cristaux recueillis sont de bien petites dimensions et en trop petit nombre.

7. Conclusion

Le métamorphisme de Flamanville est un métamorphisme de contact dû au diapirisme léger d'un pluton granitique, il y a quelques 290 Ma, en fin d'orogenèse hercynienne.

Ce métamorphisme fut essentiellement thermique, ce qui permet d'expliquer que l'auréole de métamorphisme ne soit présente que sur une largeur de quelques dizaines de mètres, autour du pluton.

Ce diapirisme a néanmoins permis d'atteindre les 700°C, soit une température supérieure à celle de l'anatexie des roches anhydres. Les roches carbonatées et grès siliceux de dépôts dévoniens et siluriens ont ainsi pu d'une part évoluer vers des cornéennes mais aussi supporter l'immigration d'éléments métalliques dont le fer, particulièrement abondant dans l'auréole de métamorphique sous la forme de magnétite ou de pyrite.

Ce double mécanisme conjugué, explique que des grenats d'une grande diversité de nature et d'aspect ont pu cristalliser par action thermique seule au cours d'un métamorphisme topochimique, ou par formation de skarns, associée à de la métasomatose.

Bien d'autre sorties peuvent être programmées à Flamanville, car ce site est d'une richesse avec peu d'équivalents en France, mais il convient toujours de se préoccuper des marées et de la météo car les accès aux roches intéressantes ne peut se faire qu'occasionnellement, sur les plages et les falaises encore accessibles (un petit coucou à EDF). Les cornéennes pyroxéniques et surtout, les cornéennes amphiboliques , qui nous fournissent les plus jolies associations à grenats sont profondément enfouies sous la mer et seuls les vagues et autres courants marins ne sont susceptibles de remonter sur les plages ces blocs de cornéennes, et car la nouvelle centrale EPR empiète sur ce site unique en France et mondialement reconnu, et en limite beaucoup l'accès.

Références

(1) Conte rendu sur le granite de Flamanville, DUSSART Ophélie, LAGRANGE Marine , http://xxi.ac-reims.fr/cite-scolaire sezanne/texte/CONTE%20RENDU%20SUR%20LE%20GRANITE%20DE%20FLAMANVILLE.doc

(2) Géologie du Cotentin http://perso.orange.fr/nimzovinec/geologie-cotentin.htm

(3) http://www.etab.ac-caen.fr/discip/geologie/paleozoi/flamanville/granite/granite.html

(4) http://www.discip.crdp.ac-caen.fr/svt/pedagoj/resdoc/flamanvi/conclus.htm

(5) Mine de diélette : http://www.payscotentin.net/ports_phares/dielette.php

(6) Mine de diélette : http://www.discip.crdp.ac-caen.fr/svt/pedagoj/resdoc/flamanvi/dielette.htm

(7) Rapport EDF : géologie générale du site - sismicité et sismologie