

# **MAGNETITE**



*Groupe de cristaux de magnétite rhombo-dodécaédraux {110} avec Cristaux de pyrite octaédriques {111} Localité : Mine de Brosso , Cálea, Lésolo, District de Canavese, Province de Turin, Piedmont, Italie Taille : 11.2x7.9x4.2 cm - xls Magnétite 1.6 cm; xls Pyrite1.9 cm - Spécimen trouvé en 1979 section Salvere.*





**Magnétite, Cerro Huanaquino, Potosí, Bolivie.**

Classification des minéraux de STRUNZ Catégorie IV : oxydes et hydroxydes

Formule	$\text{Fe}_3\text{O}_4$ ou $\text{Fe}^{2+} \text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$
Couleur	gris métallique
Aspect	gras, mat
Système cristallisation	cubique, face centrée F
Densité	5,2
Température de fusion	1538°C

Solubilité	acide chlorhydrique
Macle	sur { 1 1 1 }, par contact
Clivage	partiel sur { 1 1 1 }
Cassure	irrégulière, sub-conchoïdale
Habitus	cristaux octaédriques
Dureté	6, Moh
Trait	noir
Eclat	sub-métallique
Fluorescence en lumière UV	aucune
Transparence	aucune, opaque même à 40 μ
Magnétisme	fortement

La **magnétite** est une espèce minérale composée d'oxyde de fer(II,III), de formule  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (parfois écrit  $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), avec des traces de magnésium Mg, de zinc Zn, de manganèse Mn, de nickel Ni, de chrome Cr, de titane Ti, de vanadium V et d'aluminium Al. La magnétite est un matériau ferrimagnétique.

Les variétés riches en titane sont qualifiées de magnétites titanifères, ou plus souvent de **titano-magnétites**.

Des cristaux de magnétite peuvent être biominéralisés, c'est-à-dire biosynthétisés par certaines espèces vivantes, qui semblent pouvoir les utiliser pour s'orienter dans l'espace.

## Historique de la description et appellations

### Étymologie

La magnétite est connue depuis au moins l'âge du fer ; la première mention écrite date de Pline l'Ancien en 77 ; elle est décrite par Wilhelm Karl Ritter von Haidinger en 1845 ; son nom dérive de l'allemand *Magnetit*, mot lui-même dérivé du latin *magnes*, *magnetis* signifiant aimant et dérivant ultimement du nom de la province de Magnésie, riche en magnétite.

## Topotype

Magnésia, Thessalie (Grèce).

## Caractéristiques physico-chimiques

### Propriétés physiques

Habitus

Elle forme des cristaux typiquement octaédriques, plus rarement dodécaédriques, exceptionnellement cubiques, qui peuvent atteindre près de 25 cm.

Magnétisme

À une température de 580 °C ([point de Curie](#)), le [magnétisme](#) disparaît pour réapparaître ensuite en refroidissant. La rémanence est de l'ordre de 480 Gauss. Ce minéral est un conducteur électrique.

### Cristallochimie

- Elle forme une série avec la magnésioferrite et la jacobsite.
- Elle fait partie du groupe du spinelle

Le groupe du spinelle

Rassemble des espèces de structure similaire. Il existe plus de 20 espèces. La formule générique est  $XY_2O_4$  où X représente un métal divalent (magnésium, fer, nickel, manganèse et/ou zinc) et Y un métal trivalent (aluminium, fer, chrome et/ou manganèse, titane).

- Chromite
- Franklinite
- Gahnite
- Magnésiochromite
- Minium
- Spinelle
- **Magnétite et [Maghémite](#)**



## Gîtologie

C'est un minéral ubiquiste commun, que l'on trouve dans de nombreux types de roches.

- Roches intrusives : dans les diorites et les gabbros, ainsi que dans leurs équivalents volcaniques (andésite et basalte).
- **Roches métamorphiques** : minéral classique dans les skarns, elle y est introduite par métasomatose dans les roches calcaires.
- Formations hydrothermales : elle peut y être présente comme minéral accessoire. Dans les fentes alpines, elle existe en très beaux échantillons (en Italie et en Suisse).
- Roches sédimentaires : la magnétite peut se rencontrer comme élément lourd détritique dans les sédiments ; des gisements de sables à magnétite sont exploités dans le nord de la Nouvelle-Zélande.
- Dépôt de fumerolles volcaniques : Vésuve et de l'Etna ; son faciès peut y être arborescent ou dendritique.
- Présent dans certaines météorites.

### Minéraux associés

- Apatite, chromite, ilménite, rutil, et les silicates dans les roches intrusives.
- chalcopryrite, hématite pentlandite, pyrite, pyrrhotite, sphalérite, et les silicates dans les roches hydrothermales et métamorphiques
- hématite, quartz dans les roches sédimentaires.

### Gisements producteurs de spécimens remarquables

Il est présent dans la plupart des concentrés de batée des orpailleurs et peut être séparé aisément à l'aide d'un aimant. On le trouve aussi en Autriche dans des schistes verts où les cristaux peuvent dépasser facilement les 5 mm d'arêtes.

Des cristaux mal formés de 250 kg ont été trouvés à Faraday en Ontario au Canada et dans les pegmatites de Teete au Mozambique.

### Exploitation des gisements

#### Utilisations

- C'est l'un des principaux minerais de fer.
- Colorant : pigment primaire pour la terre d'ombre et la terre de Sienne.

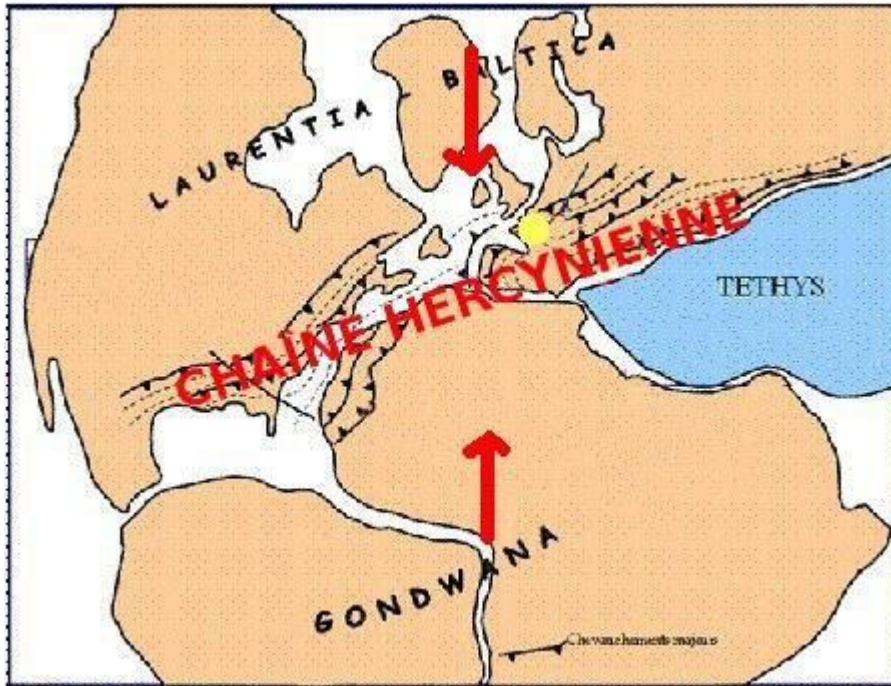
- Principal composant de la poudre de ferrites utilisée pour la fabrication des aimants.
- Datation des coulées de laves du fait de ses propriétés ferrimagnétiques, la magnétite est utile en paléomagnétisme car elle enregistre les variations de l'orientation du champ magnétique terrestre. Grâce à la magnétite on a pu ainsi déterminer sur des coulées rapprochées qu'à chaque inversion du dipôle terrestre il y a une phase de transition de 1 000 ans où le champ magnétique peut s'inverser en 3 jours.
- Élimination de l'arsenic dans l'eau

## Notes et références

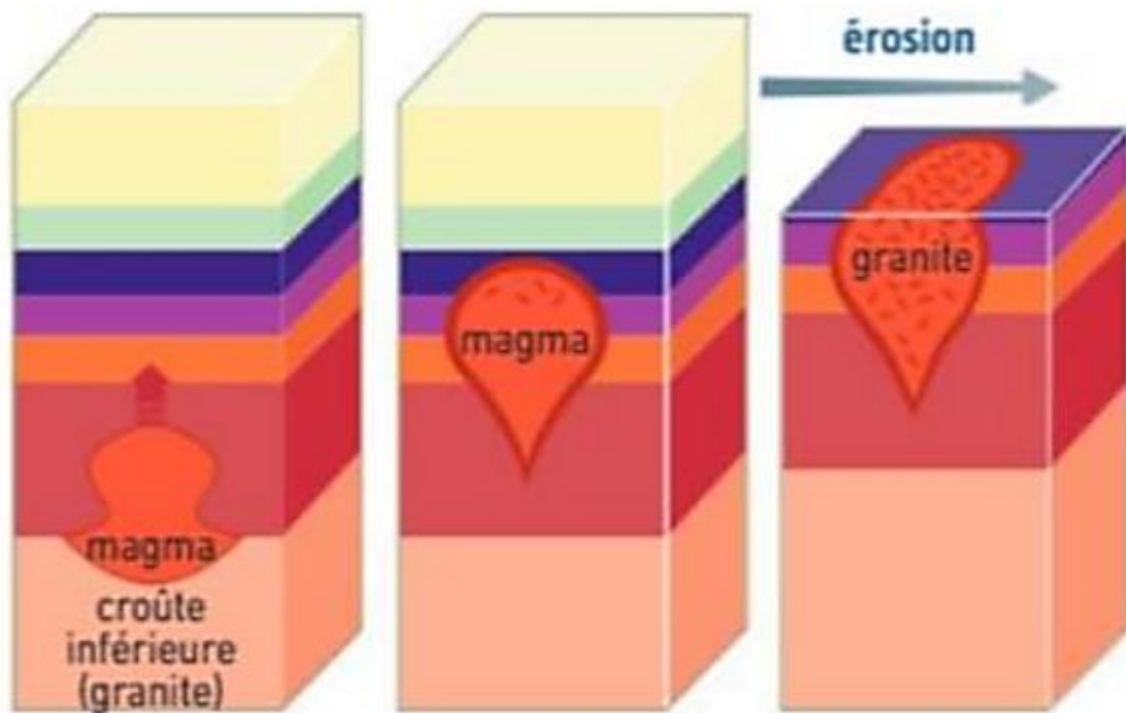
1. La classification des minéraux choisie est celle de Strunz, à l'exception des polymorphes de la silice, qui sont classés parmi les silicates.
2. Thomas R. Dulski, *A manual for the chemical analysis of metals*, vol. 25, ASTM International, 1996, 251 p. p. 71
3. « Oxyde de fer noir » dans la base de données de produits chimiques *Reptox* de la CSST (organisme québécois responsable de la sécurité et de la santé au travail), consulté le 24 avril 2009
4. Lowenstam HA (1962) *Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora)*. Bull. Geol. Soc. Am. 13, 435-438
5. Shepard (1852), *American Journal of Science*: 13: 392.
6. *Colloques internationaux du Centre national de la recherche*, Numéro 27 Par Centre national de la recherche scientifique (France) p. 80 1950
7. *Traité de minéralogie*, Volume 2 Par Ours Pierre Armand Petit Dufrénoy p. 462 1845
8. *Encyclopédie, ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts*, Volume 17 Par Denis Diderot, Jean Le Rond d'Alembert p. 279 1778
9. *The Handbook of Mineralogy Volume IV*, 2000 Mineralogical Society of America by Kenneth W. Bladh, Richard A. Bideaux, Elizabeth Anthony-Morton and Barbara G. Nichols
10. Cafer T. Yavuz, J. T. Mayo, Carmen Suchecki, Jennifer Wang, Adam Z. Ellsworth, Helen D' Couto, Elizabeth Quevedo, Arjun Prakash, Laura Gonzalez and Christina Nguyen, *et al.*, "Pollution magnet: nano-magnetite for arsenic removal from drinking water", *Environmental Geochemistry and Health*, Volume 32, Number 4, 327-334

## **MINE DE FER (MAGNETITE) DE DIELETTE**

**Une histoire géologique qui débute il y a plus de 500 Ma et qui s'étale sur plusieurs centaines de millions d'années...**



**C'est entre le début du Cambrien (-539 Ma) et la fin du Dévonien (-359 Ma) que se déposent les strates sédimentaires (grès et pélites).**



**Ensuite, entre 400 Ma et 250 Ma, une gigantesque chaîne de montagne se forme sur tout le continent européen : la chaîne Varisque (encore appelée chaîne Hercynienne).**



**Sédiments Dévonien métamorphisés par le granite et la skarnification.**



## DIOPSIDE

## GROSSULAIRE

Deux travaux sont accessibles dans la documentation, l'un de 1966 pas assez clair et aboutissant à des conclusions infirmées par la suite, et une thèse de doctorat 2012 qui rétablit l'entière vérité concernant la transformation profonde d'oolithes ferrugineuses à une couche de magnétite.

Origine

1966

couche géologique sédimentaire ; les couches minéralisées sont intercalées entre un niveau siliceux et un niveau calcaire

Il a subi d'importantes transformations lors de l'intrusion du granite de Flamanville.

Le minerai a subi peu de transformations.

Deux théories s'affrontent : l'une fait état d'une précipitation directe dans certaines conditions d'oxydoréduction et de pH et

Seule la gangue lorsqu'elle est carbonatée a subi des modifications.

2012

[https://www.researchgate.net/publication/286719584\\_The\\_late-hercynian\\_Dielette\\_magnetite\\_skarn\\_Armorican\\_massif\\_France](https://www.researchgate.net/publication/286719584_The_late-hercynian_Dielette_magnetite_skarn_Armorican_massif_France)

Le minerai a subi beaucoup de transformations.

l'autre qui présente la transformation d'une oolithe ferrugineuse ( $Fe_2O_3$ ) en magnétite par le métamorphisme avec une argumentation très sérieuse.

Intrusion d'une granodiorite dans les couches sédimentaires lors du carbonifère supérieur, pendant la phase finale de l'orogénèse varisque (ou hercynienne) vers 320 Ma et à une profondeur de l'ordre de 5000 m.

En fonction des couches traversées, couche siliceuse, couche gréseuse à oolithe ferrugineuse et couche calcaire, le phénomène induit la formation de skarn, de cornéennes et d'une couche de minerai à magnétite.

Pour information le CARBONIFERE :

**Pennsylvanien** ou **Silesien**

**Pennsylvanien supérieur :**

**Gzhélien** (303,7 ± 0,1 - 298,9 ± 0,2 Ma)

**Kasimovien** (307,0 ± 0,1 - 303,7 ± 0,1 Ma)

**Pennsylvanien moyen :**

**Moscovien** (315,2 ± 0,2 - 307,0 ± 0,1 Ma)

**Pennsylvanien inférieur :**

**Bashkirien** (323,2 ± 0,4 - 315,2 ± 0,2 Ma)

**Mississippien** ou **Dinantien**

**Mississippien supérieur :**

**Serpukhovien** (330,9 ± 0,2 - 323,2 ± 0,4 Ma)

**Mississippien moyen :**

**Viséen** (346,7 ± 0,4 - 330,9 ± 0,2 Ma)

**Mississippien inférieur :**

N° 1  
p. 1-154

Janvier-Mars 1966

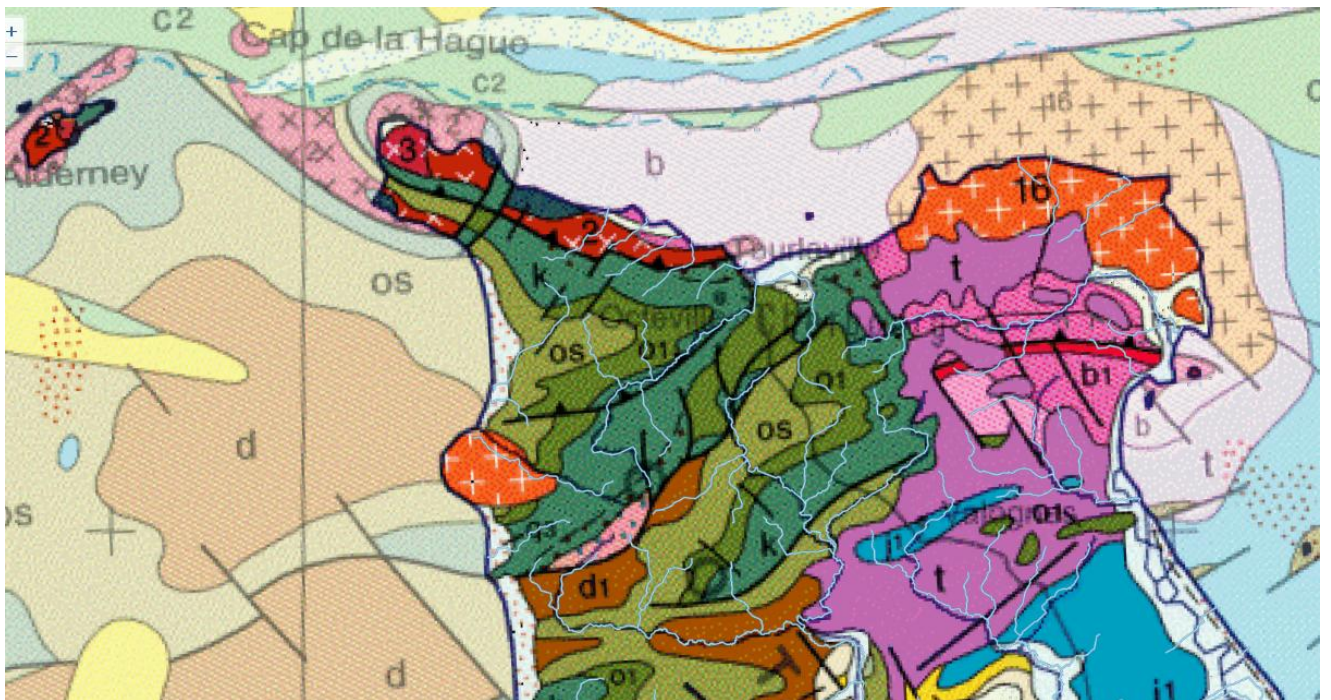
Tome LXXXIX

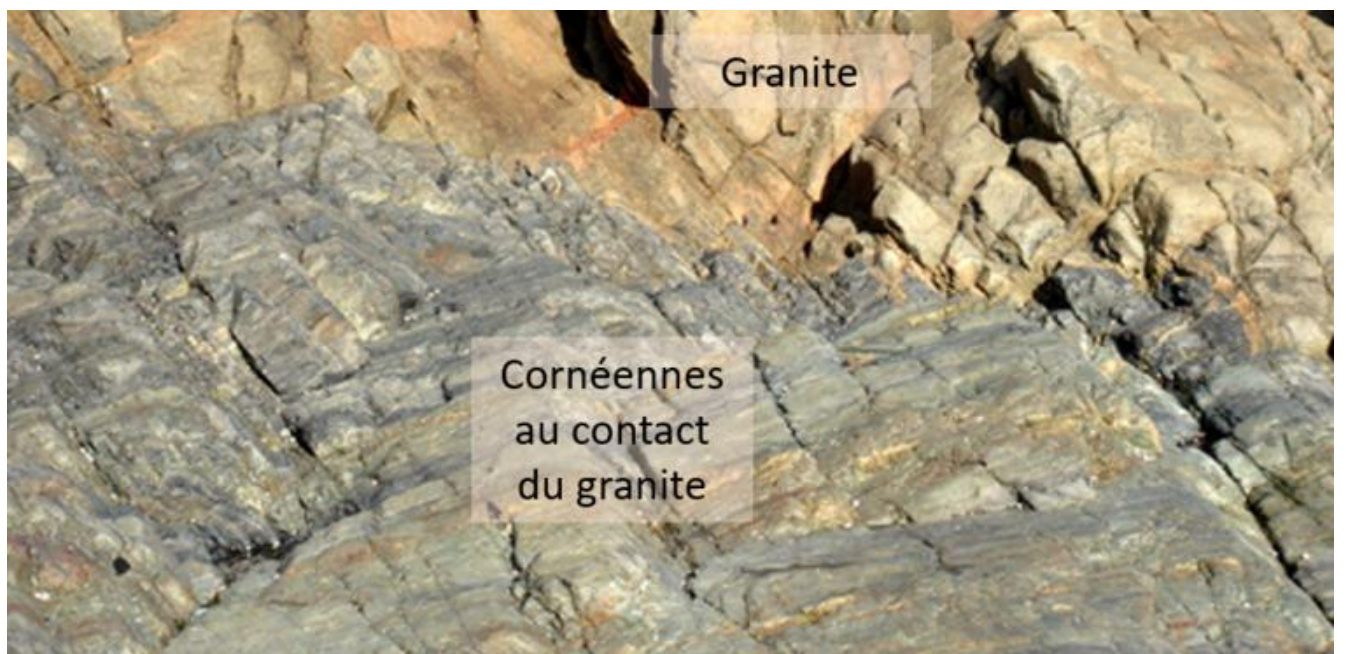
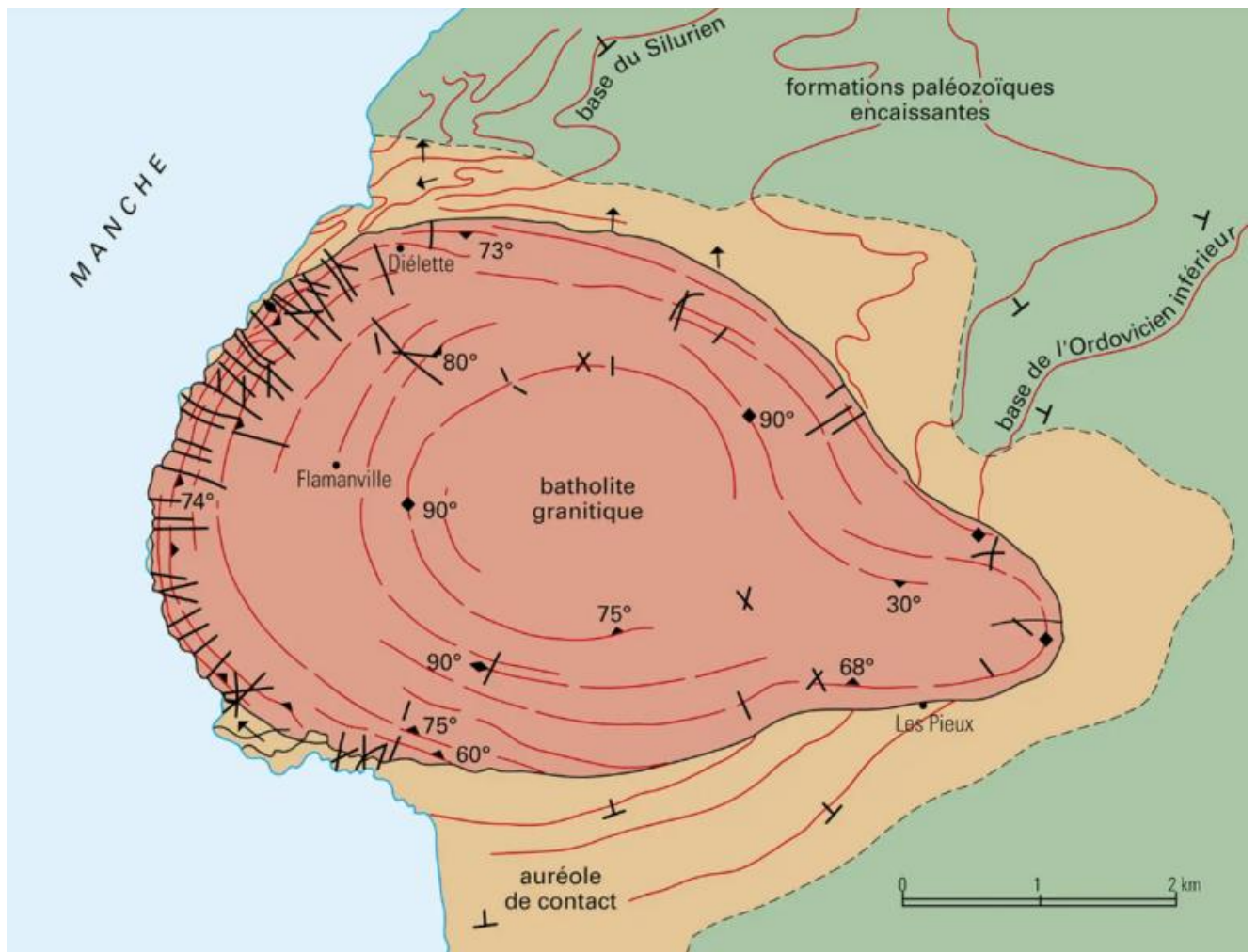
Bulletin  
de la  
**Société française**  
de  
**Minéralogie et de Cristallographie**

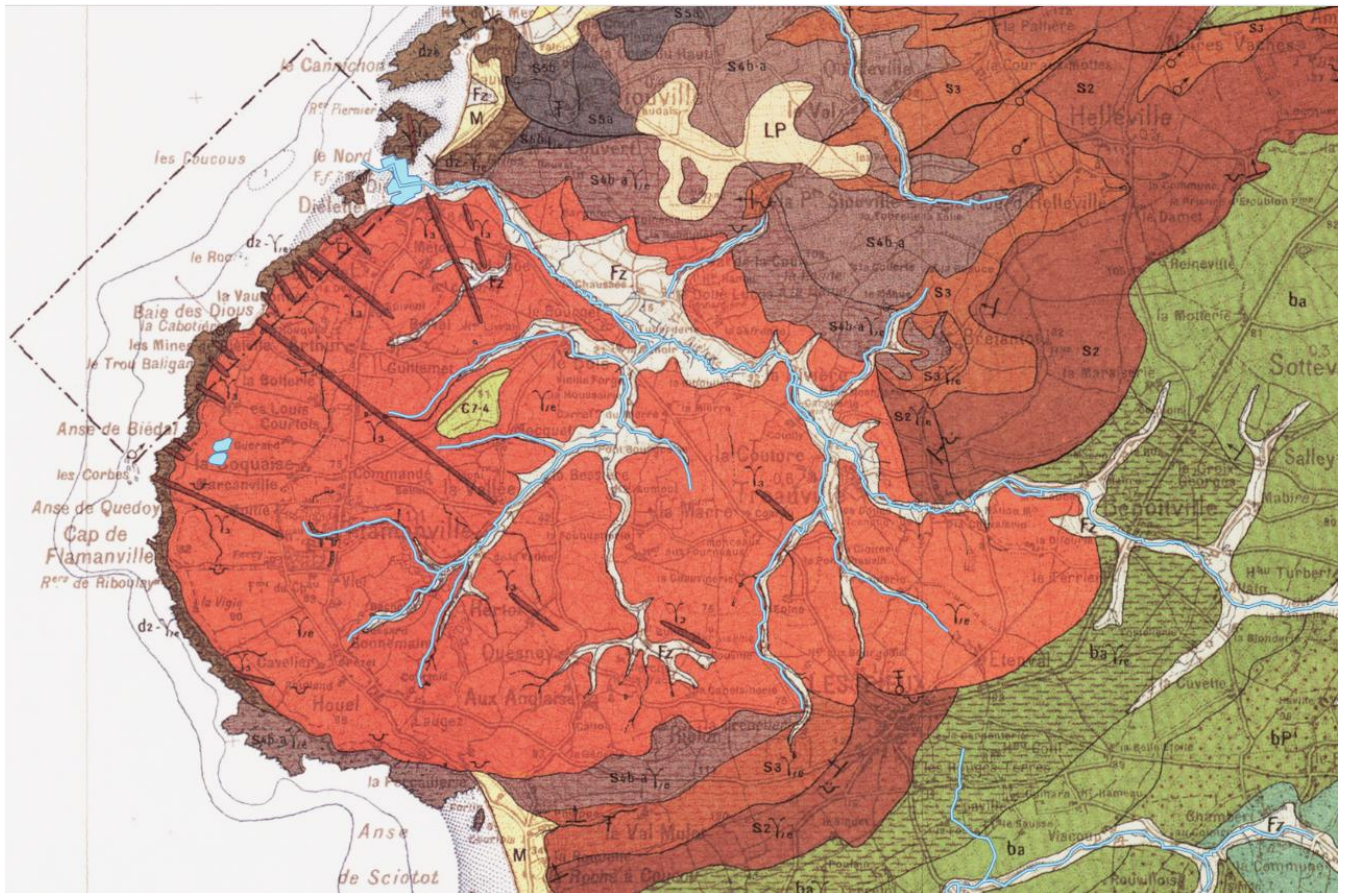
Périodique trimestriel publié avec le concours du Centre National de la Recherche Scientifique

MASSON et C<sup>o</sup>, dépositaires  
120, boulevard St-Germain, PARIS, 6<sup>e</sup>

[..\Downloads\12 GA oIFr DiA lettre EM.pdf](#)







## Géosite de Diélette-Siouville

Référence du site **BNO0231**

Typologie du Géo-site : **Géo-site de surface**

Localisation administrative **50576 SIOUVILLE-HAGUE**

**50604 TREAUVILLE**

**50184 FLAMANVILLE**

Coordonnées de l'emprise

Lieux-dits : **La Roque - Le Bec (site 1)**

**X = 295.349      Y = 2513. 676**

**Mont Saint-Gilles (site 2)**

**X = 296.406      Y = 2514.482**

**Le Platé (site 3)**

**X = 296.685      Y = 2514.833**

Mont Saint-Pierre – Les Banques - Le Fort  
(site 4) X = 296.734 Y = 2513.335

### **CONDITIONS D'ACCES**

Type coordonnées Lambert 2 Etendu métrique carte au 1/25 000

Origine :

Itinéraire : Au Sud-Est de Cherbourg, suivre la D650 sur 20 km jusqu'aux Pieux et prendre à droite la D23 sur 6 km jusqu'au port de Diélette.

Site 1 : à Diélette, longer la mer vers le Sud en suivant la D23 qui mène à la centrale nucléaire de Flamanville, stationner en bord de route, à mi-chemin entre le port et la centrale.

Sites 2 et 3 : à Diélette, rejoindre la cale nord du Port (parking de la gare maritime) pour accéder au platier rocheux (site 2) et à la plage du Platé (site 3). Accès à la carrière du Mont St-Gilles depuis la D4 à l'aplomb de la cale.

Site 4 : depuis Diélette, rejoindre Siouville par la D4 puis l'extrémité sud de la plage de Siouville par la D64. La plage offre vers le Sud un accès direct au platier rocheux au pied du Fort et du Mont St-Pierre. Le sentier littoral longeant la falaise par le haut permet d'accéder facilement aux anciennes ardoisières.

Carte(s) topographique(s) IGN à 1/25 000 CHERBOURG.CAP DE LA HAGUE (1210 OT)

Carte(s) géologique(s) BRGM à 1/50 000 CHERBOURG (0072)

### **DESCRIPTION DU SITE**

Description géologique :

Le géo-site de Diélette-Siouville permet d'observer l'auréole de métamorphisme développée lors de la mise en place du granite de Flamanville à la fin de l'orogénèse varisque, dans les terrains dévoniens du flanc sud du synclinal de Siouville. La coupe du Sud au Nord montre successivement la bordure nord du batholite granitique (site 1), la série dévonienne (Schistes et calcaires de Néhou) thermo-métamorphisée (cornéennes, grenatites) (site 2) puis très faiblement ou non métamorphisée (site 4).

Le granite de Flamanville (site 1) est un monzo-granite à enclaves basiques sombres et parcouru par des filons d'aplite (cf. BNO0198). Le contact avec les cornéennes est accessible dans les rochers littoraux en contrebas de la route.

L'auréole thermo-métamorphique proximale est exposée au niveau de la cale de Diélette (site 2) : des cornéennes rubanées de teintes variées et des grenatites

brunes dont un banc de 0,8 m d'épaisseur. Les cornéennes ont été exploitées dans la carrière du Mont St-Gilles. Le pendage général de 65° vers le Nord est orienté N080 avec développement d'une foliation sub-parallèle.

Les Schistes et calcaires de Néhou (Dévonien inférieur) sont bien exposés dans les rochers littoraux au pied du Mont St-Pierre (site 4) : à 1 km du contact avec le granite, le métamorphisme disparaît et la formation, fossilifère, montre divers faciès du Sud au Nord : schistes et grès calcaireux à brachiopodes, calcaires à polypiers et grauwackes de décalcification à fenestelles, schistes ardoisiers à petits bancs de grès (ardoisières du Mont St-Pierre). La formation présente un pendage général de 60° vers le Nord-Ouest orienté N035 et de nombreux replis à fort plongement axial vers l'Ouest liés à une schistosité de fracture N070 60°N.

Le versant du Platé (site 3) est occupé par un head weichsélien épais de 10 m, dont le pied est masqué par un cordon dunaire. Il surmonte une plage perchée émiennaise dont un lambeau, reposant sur les cornéennes, est visible au niveau de la cale.

Phénomène représentatif du site : Géosite de Diélette-Siouville

Description du site

Description physique :

Du Sud au Nord, le long du littoral :

- Site 1 : falaise granitique de 15 à 30 m de hauteur et rochers littoraux, de part et d'autre de la route d'accès à la

Centrale nucléaire de Flamanville.

- Site 2 : falaise de 5 à 10 m de hauteur et platier rocheux en bordure nord-est du port de Diélette et carrière

abandonnée creusée sur trois niveaux au flanc ouest du Mont St-Gilles. Le site 2 est séparé du site 1 par le Port de

Diélette.

- Site 3 : versant déprimé entre les collines du Mont St-Gilles et du Mont St-Pierre, bordé au pied par le cordon

dunaire de la plage du Platé.

- Site 4 : rochers de l'estran, falaise de 5 à 8 m de hauteur, excavations et déblais d'anciennes ardoisières taillées au

flanc nord du Mont Saint-Pierre.

Superficie : 88,42 hectares

facilement aux anciennes ardoisières.

Réglementée Oui Accessibilité Autorisation préalable

Période d'ouverture : Payant :

Facile

Métamorphisme de contact

***Age du phénomène***

385 Ma

***ancien***

DEVONIEN REPERE

***récent***

CARBONIFERE SUPERIEUR

300 Ma

***Age du terrain***

407 Ma

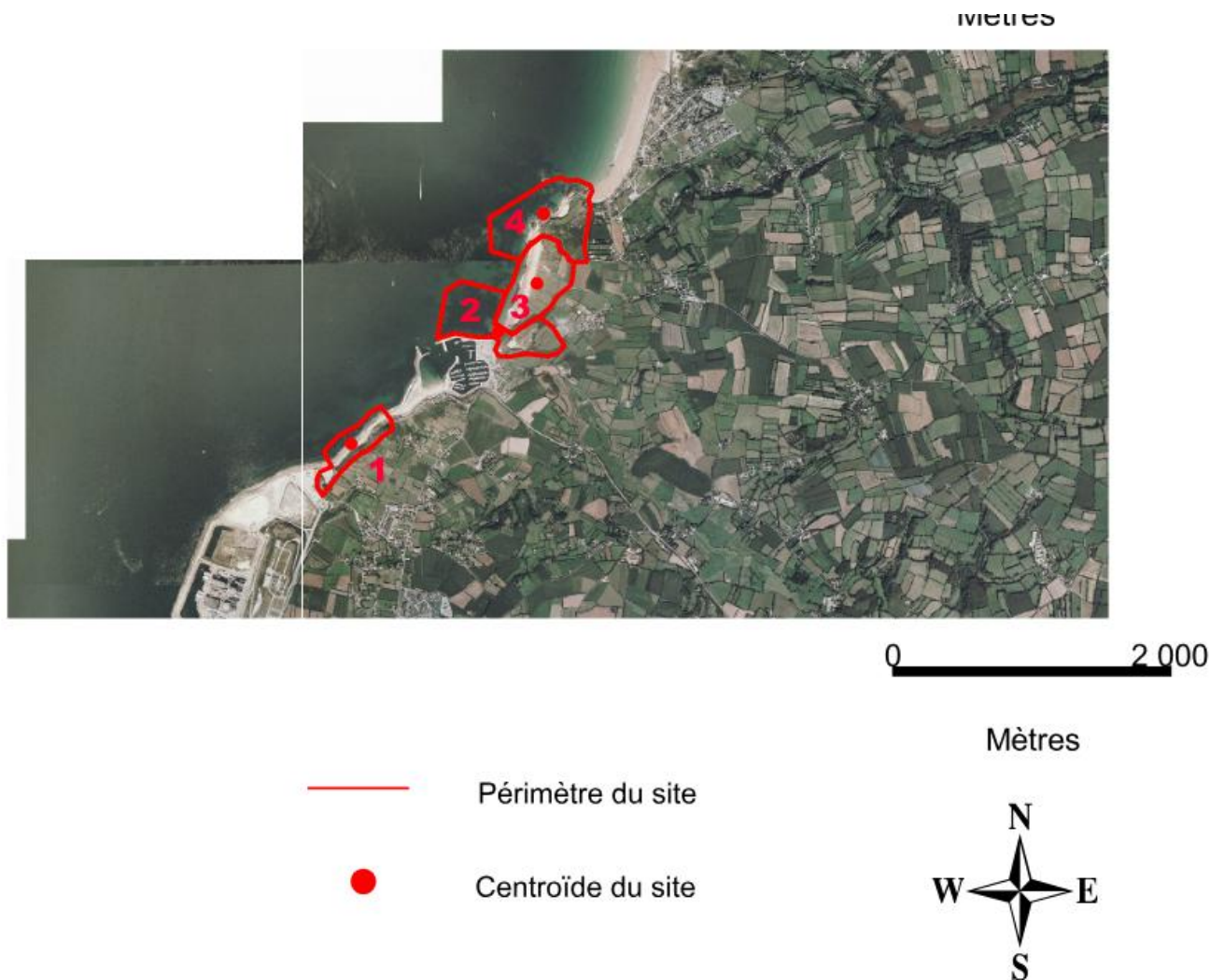
***ancien***

DEVONIEN INFERIEUR

***Récent***

HOLOCENE

0



**Réglementée Oui Accessibilité AVEC Autorisation préalable**

### ***DESCRIPTION GEOLOGIQUE***

Le géo-site de Diélette-Siouville permet d'observer l'auréole de métamorphisme développée lors de la mise en place du granite de Flamanville à la fin de l'orogénèse varisque, dans les terrains dévoniens du flanc sud du synclinal de Siouville. La coupe du Sud au Nord montre successivement la bordure nord du batholite granitique (site 1), la série dévonnaïque (Schistes et calcaires de Néhou) thermo-métamorphisée (cornéennes, grenatites) (site 2) puis très faiblement ou non métamorphisée (site 4).

Le granite de Flamanville (site 1) est un monzogranite à enclaves basiques sombres et parcouru par des filons d'aplite (cf. BNO0198). Le contact avec les cornéennes est accessible dans les rochers littoraux en contrebas de la route.

L'auréole thermométamorphique proximale est exposée au niveau de la cale de Diélette (site 2) : des cornéennes rubanées de teintes variées et des grenatites brunes dont un banc de 0,8 m d'épaisseur. Les cornéennes ont été exploitées dans la

carrière du Mont St-Gilles. Le pendage général de 65° vers le Nord est orienté N080 avec développement d'une foliation sub-parallèle.

Les Schistes et calcaires de Néhou (Dévonien inférieur) sont bien exposés dans les rochers littoraux au pied du Mont St-Pierre (site 4) : à 1 km du contact avec le granite, le métamorphisme disparaît et la formation, fossilifère, montre divers faciès du Sud au Nord : schistes et grès calcaireux à brachiopodes, calcaires à polypiers et grauwackes de décalcification à fenestelles, schistes ardoisiers à petits bancs de grès (ardoisières du Mont St-Pierre). La formation présente un pendage général de 60° vers le Nord-Ouest orienté N035 et de nombreux replis à fort plongement axial vers l'Ouest liés à une schistosité de fracture N070 60°N.

Le versant du Platé (site 3) est occupé par un head weichsélien épais de 10 m, dont le pied est masqué par un cordon dunaire. Il surmonte une plage perchée émiennaise dont un lambeau, reposant sur les cornéennes, est visible au niveau de la cale.

Phénomène représentatif du site :

Age du phénomène

Ancien	Dévonien moyen	385 Ma
Récent	Carbonifère supérieur	300 Ma

Age du terrain

Ancien	Dévonien inférieur	385 Ma
Récent	Holocène	0 Ma

### ***DESCRIPTION PHYSIQUE :***

Du Sud au Nord, le long du littoral :

- Site 1 : falaise granitique de 15 à 30 m de hauteur et rochers littoraux, de part et d'autre de la route d'accès à la Centrale nucléaire de Flamanville.

- Site 2 : falaise de 5 à 10 m de hauteur et platier rocheux en bordure nord-est du port de Diélette et carrière abandonnée creusée sur trois niveaux au flanc ouest du Mont St-Gilles. Le site 2 est séparé du site 1 par le Port de Diélette.

- Site 3 : versant déprimé entre les collines du Mont St-Gilles et du Mont St-Pierre, bordé au pied par le cordon dunaire de la plage du Platé.

- Site 4 : rochers de l'estran, falaise de 5 à 8 m de hauteur, excavations et déblais d'anciennes ardoisières taillées au flanc nord du Mont Saint-Pierre.

Superficie : 88,42 hectares

## ***Intérêt géologique principal***

### *Métamorphisme*

A la fin de l'orogénèse varisque, le thermo-métamorphisme lié à la mise en place du granite de Flamanville a transformé les Schistes et calcaires de Néhou (Dévonien) du synclinal de Siouville en cornéennes rubanées variées et en grenatites brunes.

## ***Intérêt(s) géologique(s) secondaire(s) :***

### *Plutonisme*

Faciès du granite de Flamanville (monzogranite) à enclaves basiques, parcouru de filons d'aplite et contact avec les cornéennes de sa ceinture thermo-métamorphique.

### *Géomorphologie*

Morphologie littorale à profil concave liée à la mise en place d'un head weichsélien surmontant une plage éémienne. Cordon dunaire holocène.

### *Ressources naturelles*

Exploitation artisanale ancienne des schistes ardoisiers dévoniens du Mont St-Pierre et production d'ardoises utilisées dans les toitures du bâti traditionnel ancien local.



Granite de Flamanville à enclaves basiques sombres - site 1 (© F.P. GIGOT)



Contact entre le granite, au 1<sup>er</sup> plan et les cornéennes, en arrière-plan - site 1 (© F.P. GIGOT)

Exploitation des cornéennes du Mont St-Gilles pour la production de granulats, abandonnée depuis 2011.



Cornéennes de la cale de Diélette (site 2), plage du Platé et Mont St-Pierre en arrière-plan (© F.P. GIGOT)



Carrière du Mont St-Gilles - site 2 (© F.P. GIGOT)



Banc de grenatite intercalé dans les cornéennes - site 2  
(© F.P. GIGOT)



Cornéennes surmontées par la plage éémienne et le head weichsélien préservés, près de la cale de Diélette  
- site2 (© F.P. GIGOT)

Proximité de l'ancienne mine de Diélette qui exploitait la magnétite dans le Dévonien thermo-métamorphique (cf. BNO0158).

*Paléontologie*

fenestelles et polypiers.

Couches fossilifères du Dévonien à faune de brachiopodes,



Lumachelle à brachiopodes et fenestelles - site 4  
(© F.P. GIGOT)

*Sédimentologie*  
calcaires de Néhou.

Faciès de la formation dévonienne des Schistes et

*Minéralogie*

Grenats (grossulaire andraditique) dans les couches de grenatites. La présence de molybdénite et de scheelite a été signalée dans la carrière du Mont St-Gilles.

*Tectonique*  
schistosités.

Déformation varisque de la série dévonienne : plis,

### ***Intérêt(s) pédagogique(s)***

Pour tous publics  
et filons d'aplite.

Observation du granite de Flamanville à enclaves basiques

Evocation de la mise en place d'un pluton granitique.

Observation des effets de l'intrusion d'un pluton granitique sur son encaissant : cornéennes variées de l'auréole proximale, relation entre les minéraux du métamorphisme et la nature de la roche parent (grenats).

Observation de plis et de schistosités.



Plis dans le Dévonien, à axes plongeant fortement vers l'Ouest - site 4 (© F.P. GIGOT)

Exploitation ancienne des schistes ardoisiers dévoniens du Mont-St-Pierre et utilisation dans le bâti traditionnel ancien.



Petit front de taille dans une ardoisière du Mont St-Pierre - site 4 (© F.P. GIGOT)

Pierre et utilisation dans le bâti traditionnel ancien.

Exploitation des cornéennes du Mont St-Gilles.

Evocation des variations climatiques du Quaternaire : climat tempéré de l'Eémien (plage perchée) et climat périglaciaire du Weichsélien (head).

### ***Intérêt pour l'histoire de la géologie***

#### ***Intérêt(s) annexe(s)***

##### ***Archéologie***

Gisements moustériens au pied du Mont Saint-Pierre, sommet de plage éémienne (site 4)

Auteur(s) Identifiant Date Référence Titre

Graindor M.-J. BNO0148B 01/01/1963 BRGM Carte géol. France (1/50 000),  
feuille Cherbourg (72). Orléans :

BRGM. Notice explicative par Graindor  
M.-J. (1963), 14 p.

Graindor M.-J. BNO0149B 01/01/1963 BRGM Notice explicative, Carte géol.  
France (1/50 000), feuille Cherbourg (72). Orléans : BRGM, 14 p. Carte géologique  
par Graindor M.-J. (1963).

Gresselin F. BNO0317B 01/01/1990 Thèse de doctorat, Univ. Caen, 340 p. Evolution varisque du Massif armoricain oriental. Insertion dans une transversale ouest européenne.

Doré F., Pareyn C., Larsonneur C., Rioult M., Juignet P. BNO0112B 01/01/2006 Ed. Dunod Paris, 2<sup>e</sup> édition, 216 p. Guide géologique Normandie-Maine.

Poncet J. BNO0371B 01/01/1968 Thèse, Univ. Caen, 3 vol., 367 p. Contribution à l'étude sédimentologique et stratigraphique du Dévonien de Basse-Normandie.

## **Nouvelle contribution à l'étude pétrographique et métallogénique du gîte de Diélette (Manche)**

## Nouvelle contribution à l'étude pétrographique et métallogénique du gîte de Diélette (Manche)

PAR M<sup>lle</sup> SIMONNE CAILLÈRE ET F. KRAUT,  
Laboratoire de Minéralogie du Muséum, Paris.

**Résumé.** — Le gisement de fer de Diélette est d'origine sédimentaire ; les couches minéralisées sont intercalées entre un niveau siliceux et un niveau calcaire. Ce dernier a subi d'importantes transformations lors de la mise en place du granite de Flamanville. Le métamorphisme a peu affecté le minerai, seule la gangue, lorsqu'elle est carbonatée, a subi des modifications.

Depuis le travail classique d'Auguste Michel-Lévy, le granite de Flamanville et son auréole de contact ont gardé un très vif intérêt pour les géologues et les pétrographes (A. Michel-Lévy, 1893). Au point de vue métallogénique le gisement de fer de Diélette, impliqué dans ce métamorphisme, a soulevé des controverses notamment en ce qui concerne l'évolution du dépôt, dont tous les auteurs admettent maintenant l'origine sédimentaire.

En 1931, M<sup>me</sup> E. Jérémme a complété la description de A. Michel-Lévy par une contribution basée essentiellement sur des données chimiques. (E. Jérémme 1931).

Elle a étudié des échantillons prélevés entre la mine et le village de Diélette, au contact du granite et des roches sédimentaires ; au-dessous du mont Saint-Gilles, dans la baie de Sciottot, et des blocs de minerai sur le carreau de la mine.

Nous donnerons ici les résultats de l'étude des échantillons que nous avons recueillis dans la mine, aux travers-bancs 90 et 150. Ces travers-bancs recoupent les deux synclinaux dans lesquels se loge le gisement ; par conséquent en les suivant, on rencontre plusieurs fois la même couche minéralisée ou le même niveau stratigraphique (S. Caillère et F. Kraut, 1957 et 1965).

Nous décrirons d'abord le granite avec son cortège filonien, visible dans la mine, puis les roches sédimentaires et métamorphiques dans lesquelles sont intercalées les couches ferrifères, enfin le minerai.

### ROCHES ÉRUPTIVES.

Le granite porphyroïde de Flamanville est constitué par de grands cristaux de microcline,

par de l'oligoclase, de la hornblende et de la biotite. D'après M<sup>me</sup> E. Jérémme, la roche exploitée dans la grande carrière de Diélette est un terme de passage entre le granite akéritique et la granodiorite (an. 1, E. Jérémme, 1931). Elle englobe des enclaves de monzonite micacée (an. 11, E. Jérémme, 1931) composée essentiellement de biotite.

M<sup>me</sup> Jérémme a observé en outre, dans des blocs de minerais, des veinules d'un granite alcalin, à orthose, oligoclase et biotite, plus ou moins riche en quartz, qui renferme parfois de la cordiérite. Ses paramètres I.4. (1)2.3 montrent que ce granite diffère de celui de Flamanville. Il est plus pauvre en magnésie et en chaux et plus riche en silice (an. 4, E. Jérémme, 1931).

Nous avons recueilli dans le village, en bordure de la mer entre l'église et la jetée est du port de Diélette, un granite à orthose perthitisée, oligoclase, hornblende et biotite.

L'analyse, colonne 1 :

	(1)	(2)	(3)
SiO <sub>2</sub> .....	64,50	65,40	48,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	18,00	17,60	14,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	1,20	0,70	6,00
FeO.....	1,50	1,90	4,00
TiO <sub>2</sub> .....	0,25	0,30	0,30
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	0,15	0,25	0,25
CaO.....	3,80	3,50	9,40
MgO.....	1,50	1,80	1,70
Na <sub>2</sub> O.....	2,50	2,00	2,50
K <sub>2</sub> O.....	5,00	5,20	5,00
H <sub>2</sub> O <sub>-</sub> .....	1,10	1,00	7,10
	99,50	99,65	99,40

permet de calculer les paramètres 1.4.3.3. Ce granite alcalin se retrouve dans la mine, entre le puits et la première couche, au travers banc

150. En dehors de l'orthose perthitisée, on y reconnaît la hornblende et la biotite plus ou moins chloritisée. La roche renferme aussi de l'oligoclase et du quartz. L'analyse (colonne 2) a donné les paramètres 1.4.3.2(3).

Il existe entre ces deux granites et les filonnets observés par M<sup>me</sup> Jérémme dans les blocs de minerais (an. 4, E. Jérémme, 1931) une grande analogie. Au niveau stratigraphique 4, au travers-banc 90, on trouve une roche altérée dépourvue de quartz. Elle est formée par l'orthose, l'oligoclase, un peu d'amphibole, d'épidote, de chlorite, de sphène et de la calcite.

L'analyse chimique (colonne 3) met en effet en évidence une assez forte teneur en chaux.

La venue éruptive pénètre dans le niveau stratigraphique 5 où elle se présente comme un véritable granite avec quartz abondant, microcline et oligoclase. On y observe de la hornblende, de la biotite.

Dans la branche W du 2<sup>e</sup> synclinal au travers-banc 90, la couche n° 2 est traversée par deux filons de roches microgrenues. L'un est un microgranite, l'autre est constitué par de l'oligoclase qui apparaît en phénocristaux et sous forme d'une pâte finement cristallisée. Au travers-banc 150 on retrouve la même roche formée par l'oligoclase.

#### LES ROCHES MÉTAMORPHIQUES.

Les roches métamorphiques auxquelles est lié le gisement de Diélette résultent de la transformation de sédiments calcaires phylliteux ou quartzeux.

#### Roches d'origine calcaire.

##### *Calcaires non transformés.*

On rencontre principalement ces roches au niveau stratigraphique 7, mais il existe, ailleurs, des accidents calcaires. Il s'agit soit de calcaires proprement dits, soit de grès à ciment calcaire ou de calcaires gréseux.

Dans la branche W du 1<sup>er</sup> synclinal au travers-banc 90, on a recueilli un calcaire dans lequel l'examen microscopique révèle la présence de grains de quartz.

D'après l'analyse chimique : SiO<sub>2</sub> : 11,6 ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 3,6 ; CaO : 43,2 ; MgO : 5,2 ; perte au feu : 36,7 ; total : 100,3, la roche légèrement magnésienne est formée par 7,7 % de calcite, 5 % de giobertite, 12 % de quartz et 4 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

*Bull. Soc. franç. Minér. Crist., 1965.*

Le métamorphisme a plus ou moins transformé ces sédiments. Les minéraux de néoformation, parfois très accessoires, remplacent ailleurs presque complètement le calcaire originel.

##### *Roches faiblement métamorphisées.*

Il arrive que le calcaire ne renferme que quelques paillettes de muscovite seule ou accompagnée d'épidote ou de dipyre.

##### *Cornéennes pyroxéniques.*

Ici le métamorphisme ne laisse subsister que de faibles résidus calcaires. On y reconnaît presque toujours le diopside accompagné par le grenat, la préhnite ou le dipyre, l'épidote, l'amphibole et un plagioclase, en général l'andésine. A ces minéraux, s'ajoute, dans certains cas, l'orthose qui provient du granite.

Voici l'analyse d'une cornéenne recueillie dans la branche est du 1<sup>er</sup> synclinal au travers-banc 90 où le niveau stratigraphique 4 comporte un accident calcaire métamorphisé : SiO<sub>2</sub> 45,50 ; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12,35 ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6,55 ; FeO 7,20 ; TiO<sub>2</sub> 0,75 ; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,07 ; CaO 19,00 ; MgO 5,4 ; perte au feu 3,3 ; total 100,12.

La composition minéralogique virtuelle fait apparaître 60 % de diopside, 14 % de quartz et 12 % de magnétite.

En ce qui concerne l'alumine, on peut l'attribuer au grenat ou plus vraisemblablement au pyroxène qui ne serait pas le diopside théorique, mais un diopside auitique.

D'une façon générale, il n'est pas certain que dans les cornéennes de Diélette, le pyroxène soit un diopside sensu stricto, comme il a été généralement admis.

Voyons à ce propos, l'analyse publiée par M<sup>me</sup> Jérémme (an. 9, 1931) d'une roche presque monominérale qu'elle appelle « parapyroxénite ». Elle fait apparaître l'abondance de la silice, du fer ferreux et de la chaux alors que la quantité de magnésie est de 2,4 %.

On peut calculer 90 % d'un pyroxène constitué par 13 % de diopside et 77 % d'hédenbergite.

Quant au grenat, « andradite » d'après M<sup>me</sup> Jérémme, nous avons essayé de déduire sa composition chimique de l'analyse d'une grenatite formant des veinules dans une cornéenne pyroxénique (an. 10, 1931).

D'après le calcul, les filonnets renferment 75 % de grenat, dont 52 % d'andradite et 23 % d'almandin et 13 % de diopside.

**Roches d'origine phylliteuse.**

Elles résultent du métamorphisme de dépôts argileux et sont connues au travers-banc 90, dans le niveau stratigraphique 2 au contact d'un accident éruptif et dans les deux synclinaux au niveau 4. Il s'agit de schistes micacés avec prédominance de la biotite renfermant accessoirement de l'orthose, du zircon et de la tourmaline.

Au voisinage du granite, au niveau 2, la roche se charge d'andalousite.

Au-delà de la nouvelle couche, au travers-banc 150, on suit sur plus de 150 m des schistes tachetés à andalousite et cordiérite.

**Roches d'origine siliceuse.**

Elles constituent la presque totalité du niveau stratigraphique 5 on les observe dans les deux travers-bancs des deux synclinaux.

Il s'agit de quartzite, micacé à zircon et tourmaline, avec parfois de l'orthose et exceptionnellement de la hornblende.

**Le minéral.**

Le minéral se localise principalement dans les couches n° 2 et n° 5, qui sont très rapprochées alors que des stériles épais les séparent des autres couches.

La gangue de ces minerais est siliceuse et micacée. On n'y voit que localement la calcite ou des minéraux calciques de métamorphisme; par contre les feldspaths émanant du granite se retrouvent dans la plupart des échantillons.

Quant à la minéralisation elle est constituée par la magnétite et l'hématite. La magnétite présente parfois des phénomènes d'anisotropie, tandis que l'hématite est presque toujours isotrope.

Prenons comme exemple l'analyse du minéral de la couche n° 1 prélevé dans la branche est du 1<sup>er</sup> synclinal au travers-banc 150 (colonne 1).

	(1)	(2)
SiO <sub>2</sub> .....	18,7	14,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	6,5	6,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	53,3	56,3
FeO.....	16,5	15,6
TiO <sub>2</sub> .....	0,6	0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	0,5	0,6
CaO.....	1,7	1,6
MgO.....	1,7	0,3
K <sub>2</sub> O.....	1	0,5
Na <sub>2</sub> O.....	tr.	1,2
Perte au feu.....	—	1,8
	<u>100,5</u>	<u>99,5</u>

Elle conduit à calculer environ :

Magnétite.....	54	50
Hématite.....	17	21
TiO <sub>2</sub> .....	0,50	0,40
Apatite.....	2	2
Orthose.....	6,5	
Quartz.....	15	
Mica par différence.....	5	
	<u>100,00</u>	<u>99,40</u>

Ces résultats montrent que l'oxyde dominant est la magnétite et que dans la gangue prédomine le quartz.

En résumé, si le métamorphisme a provoqué des transformations importantes dans le calcaire et a exercé une influence notable sur les roches phylliteuses, il a peu affecté les niveaux siliceux.

Quant aux couches minéralisées, rien n'autorise à admettre qu'elles se soient notablement transformées sous l'action des phénomènes de contact. Elles sont caractérisées par les mêmes paragenèses et les mêmes particularités que les minerais de l'Anjou où les conditions de gisement excluent toute hypothèse d'un tel métamorphisme.

Comme à Diélette, on trouve à Segré un minéral à gangue siliceuse et micacée dans lequel la magnétite souvent anisotrope s'associe à l'hématite et à la maghémite. L'analyse chimique de l'échantillon de la couche B de Segré, colonne 2 du tableau précédent fait ressortir cette analogie.

L'origine de la magnétite dans les gisements sédimentaires a fait l'objet de nombreuses controverses. Certains auteurs considèrent que ce minéral est le résultat de transformations diagénétiques, métasomatiques, tectoniques ou métamorphiques (L. Cayeux, 1906; G. S. Saleeb Roufaïel, 1962).

D'autres, au contraire, pensent que la magnétite peut se former par précipitation directe dans certaines conditions d'oxydoréduction et de pH. Des recherches poursuivies dans différentes régions nous ont déjà conduits à opter pour cette hypothèse (S. Caillère et F. Kraut, 1954 et 1957).

En conclusion, le gisement de Diélette n'est qu'un épisode dans un ensemble sédimentaire. Celui-ci débute par des formations phylliteuses sur lesquelles repose un important niveau siliceux. Ce dernier s'achève par le dépôt des principales couches minéralisées. Elles sont recouvertes par un banc calcaire, seul niveau profondément modifié par le métamorphisme.

L'auréole qui entoure le massif de Flaman-

ville est un cas typique de métamorphisme ; malgré la présence d'une masse considérable de minerai rien ne la distingue d'un cas banal. Les

silicates de néogénèse sont peu ferrifères, la magnétite et l'hématite sont des oxydes que l'on trouve aussi bien loin de toute venue éruptive.

## BIBLIOGRAPHIE

CAILLÈRE, S. et KRAUT, F. (1954). — *Mém. Mus. nation. Hist. nat., Sér. C, Sci. Terre*, 4, 191 p.

CAILLÈRE, S. et KRAUT, F. (1957). — *C. R. Acad. Sci., Paris*, 245, 2049-51

CAILLÈRE, S. et KRAUT, F. (1965). — *Mém. Mus. nation. Hist. nat., Sér. C, Sci. Terre*, 5, 5-102.

CAYEUX, L. (1909). — *Les Minerais de fer oolithique*

*de France*, fasc. 1, 240 p., Imprimerie Nationale, Paris.

JÉRÉMINÉ, E. (1931). — *Bull. Soc. franç. Minér. Crist.*, 54, 25-46.

MICHEL-LÉVY, A. (1893-1894). — *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, 5, 317-57.

SALEEB ROUFAIEL, G. S. (1962). — *Contribution à l'étude du gisement ferrifère de Diélette, Manche*, Thèse, Nancy, 1962 et *Sci. Terre*, 1962, mémoire n° 2, 184 p.

## GÉOLOGIE DE LA FRANCE, N° 2, 2012

[https://www.researchgate.net/publication/286719584\\_The\\_late-hercynian\\_Diélette\\_magnetite\\_skarn\\_Armorican\\_massif\\_France](https://www.researchgate.net/publication/286719584_The_late-hercynian_Diélette_magnetite_skarn_Armorican_massif_France)

## Résumé

Le « skarn ferrifère » de Diélette (Massif armoricain) s'est développé dans l'auréole de métamorphisme de contact du massif de granodiorite hercynien de Flamanville. L'encaissant gréso-pélitique dévonien inférieur s'est transformé en un ensemble de cornéennes, les niveaux carbonatés se transformant en grenatites à grossulaire (Gr<sub>64</sub>Ad<sub>27</sub>Py<sub>9</sub> à Gr<sub>84</sub>Ad<sub>9</sub>Py<sub>7</sub>) et en pyroxénites à diopside – hédénbergite (Di<sub>65</sub>Hd<sub>35</sub> à Di<sub>20</sub>Hd<sub>80</sub>) accompagnés d'un peu d'anorthite. Cette transformation se réalise lors de l'étape prograde, entre 390° et 525 °C, pour une pression estimée à 1 kbar.

Cette étape a aussi transformé l'hématite primaire des bancs de grés oolithiques en magnétite, par métasomatose dès 500 °C, et sous des fO<sub>2</sub> comprises entre 10-18 et 10-24 donnant naissance à la minéralisation ferrifère économique ; ce phénomène a pu se poursuivre lors de l'étape rétrograde.

L'étape rétrograde est discrète et ne semble donner que des disséminations de sulfures de Fe-Cu-Mo. Elle se réalise sous des aS<sub>2</sub>= 10-8 à 10-13 et des aO<sub>2</sub>= 10-25 à 10-35 pour des températures inférieures à 390°- 400 °C.

Ces très faibles valeurs, associées aux fortes valeurs de δ<sup>18</sup>O de la magnétite (+ 7,4 et + 10,7), suggèrent que la formation du skarn s'est réalisée sans la participation de fluides superficiels. On peut estimer à 20 000 ans la durée de vie du système hydrothermal à l'origine du skarn, un laps de temps cohérent avec la durée de

refroidissement du massif (100 kbars), et le volume de silice transporté (13 Mt). Diélette n'est pas un skarn ferrifère à proprement parler dans la mesure où un thermo-métamorphisme a simplement provoqué la transformation par métasomatose de niveaux ferrifères préexistants.

La minéralisation véritablement de type skarn se limite aux disséminations et petits filons à molybdénite – scheelite observés sporadiquement dans l'auréole de contact.

Le skarn à magnétite tardi-hercynien de Diélette (Massif armoricain, France)

(Armorican massif, France)

Eric MARCOUX (1), Erwann LEBRUN (1), Elsa BAGES (1)

(1) Université d'Orléans – OSUC/ISTO - UMR 7327 CNRS, Bâtiment ISTE, Campus géosciences, 1a rue de la Férollerie, 45071 Orléans cedex 2, France

eric.marcoux@univ-orleans.fr

\* Manuscrit présenté le 26 janvier 2012, accepté le 15 avril 2012

Géologie de la France, n° 2, 2012, p. 5-25, 14 fig.

Mots-clés : Diélette, skarn, magnétite, oolithe, grenatite, Massif armoricain

Keywords: Diélette, skarn, magnetite, oolithe, grenatite, Armorican massif an iron-bearing skarn since the thermos-metamorphism has only transform preexisting iron layers by a metasomatic process. The only true type-skarn mineralization is represented by molybdenite – scheelite veinlets and disseminations, sparsely observed in the contact metamorphic aureole.

## Introduction

Située face aux îles Anglo-Normandes et à une vingtaine de kilomètre au sud-ouest de Cherbourg, la mine de Diélette fut la plus importante mine de fer française après celles de Lorraine, avec une production de 50 Mt de minerai entre 1840 et 1962. Considérée comme l'élément principal du fameux « skarn de Diélette », cette ancienne mine a cependant fait l'objet de très peu de travaux géologiques, les skarns étant eux-mêmes peu représentés et mal connus en Armorique. Les rares travaux se sont concentrés sur la minéralisation polymétallique et la pétrographie de son encaissant (Chauris, 1965, 1977 et 1979 ;

Chauris et Guigues, 1969), ou la structure générale du granite de Flamanville, adjacent au Port de Diélette (Brun et al., 1990).

Ce travail a pour objectif de combler partiellement cette lacune par un examen détaillé du skarn sensu stricto et de ses conditions de genèse.

## Contexte géologique et métallogénique

### ***Histoire géologique du Massif armoricain***

Le Massif armoricain est un des massifs principaux de la chaîne varisque. C'est un puzzle de terrains anciens rassemblant la Bretagne, le Cotentin, une grande partie de la Vendée et qui s'étend jusqu'au Choletais et l'Anjou. Ce puzzle est le résultat d'une histoire tectonique polyphasée amorcée dès le Précambrien, mais construite pour l'essentiel à l'Hercynien.

On divise habituellement le Massif armoricain en trois ensembles structuraux séparés par des accidents tectoniques majeurs à valeur de décrochements cisailants, le long desquels ces ensembles ont coulissé : les zones nord-armoricaine, centre armoricaine et sud-armoricaine.

Ces accidents majeurs de la géologie armoricaine sont le cisaillement dextre nord-armoricain (CNA) et le cisaillement sud-armoricain (CSA), faisceau à plusieurs branches, avec un jeu résultant également dextre estimé à plus de 200 km.

Ces ensembles recouvrent cinq domaines distingués sur la base de leurs natures pétrographiques, de leurs successions litho-stratigraphiques, de leurs styles de plissement et de déformation, ainsi que de leur âge (Cogné, 1974) :

- l'ensemble nord-armoricain, avec un domaine domnonéen au nord, constitué d'un socle précambrien poly-métamorphique et poly-orogénique, plissé et écaillé mais peu schistosé, globalement assez peu affecté par l'orogénèse varisque et un domaine mancennien, composé de terrains du Néoprotérozoïque, appelés briovériens (de la Briovera gauloise, actuellement Saint-Lô), plissés et granitisés lors de l'orogénèse cadomienne, puis recouverts de séries sédimentaires paléozoïques modérément déformées à l'Hercynien ; ce domaine traduit pour l'essentiel la fermeture de l'océan Celtique de 600 à 560 Ma (Chantraine et al., 2001) ;

- l'ensemble centre-armoricain dominé par des séries sédimentaires épicontinentales paléozoïques déposées sur un socle briovérien, borné au sud par l'anticlinorium de Lanvaux ; c'est un domaine fortement déformé montrant des intrusions granitiques hercyniennes d'importance croissante vers l'ouest ;

- l'ensemble sud-armoricain, pays d'un puissant empilement de nappes repris par les décrochements majeurs. Il est composé du domaine ligérien constitué d'une succession paléozoïque soumise à un méta- morphisme de faible intensité, limité au sud par une des branches de la zone de cisaillement sud-armoricaine et injecté de

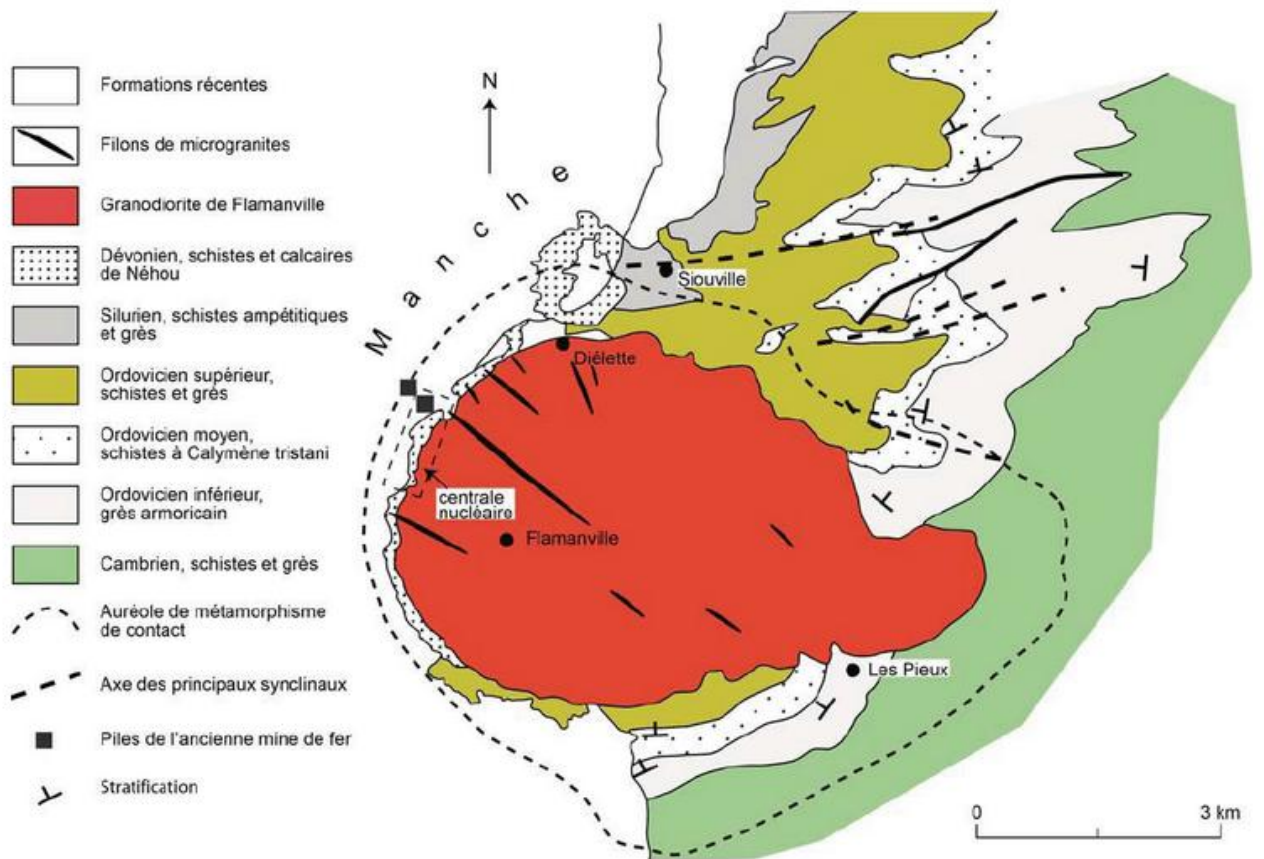
lames de leucogranites syntectoniques, et d'un domaine méridional, fréquemment appelé ouest-vendéen ou de l'anticlinal de Cornouaille, essentiellement migmatitique.

Ces grands accidents ont guidé la mise en place par injection entre 335 et 300 Ma, de différentes lignées granitiques armoricaines, respectivement les leucogranites sud-armoricains, les monzo-granites centre-armoricains. Le granite de Flamanville appartient à la lignée des « granites rouges nord-armoricains », indépendante des deux accidents nord et sud-armoricains. Ces plutons se distribuent selon un axe orienté N50°E de l'Aber-Ildut à Barfleur dans le Cotentin, sur près de 300 km.

### ***Géologie du Cotentin et de la région de Diélette***

La région de Flamanville-Diélette fait partie du domaine domnonéen du Massif armoricain aussi appelé domaine Nord-est-armoricain (Butaeyea et al., 2001) ou encore normando-breton par Chauris (1977) et issu de la superposition de l'orogénèse varisque sur l'orogénèse cadomienne, et en fait très peu affecté par l'orogénèse hercynienne (Chauris, 1977) (fig. 1). Le port de Diélette se situe dans la partie septentrionale du département de la Manche (Cotentin), au Sud-ouest de Cherbourg, sur le contact nord du granite de Flamanville.

Le contexte géologique est constitué un ensemble de séries grésopélitiques, rarement calcaires, cambriennes à dévoniennes, reposant sur un socle protérozoïque de gneiss et de schistes peu métamorphiques (Brun et al., 1990). Cette série dessine le synclinal de Siouville, d'axe ENE-WSW, et déversé vers le Sud, dénotant une tectonique de couverture (Graindor, 1998)



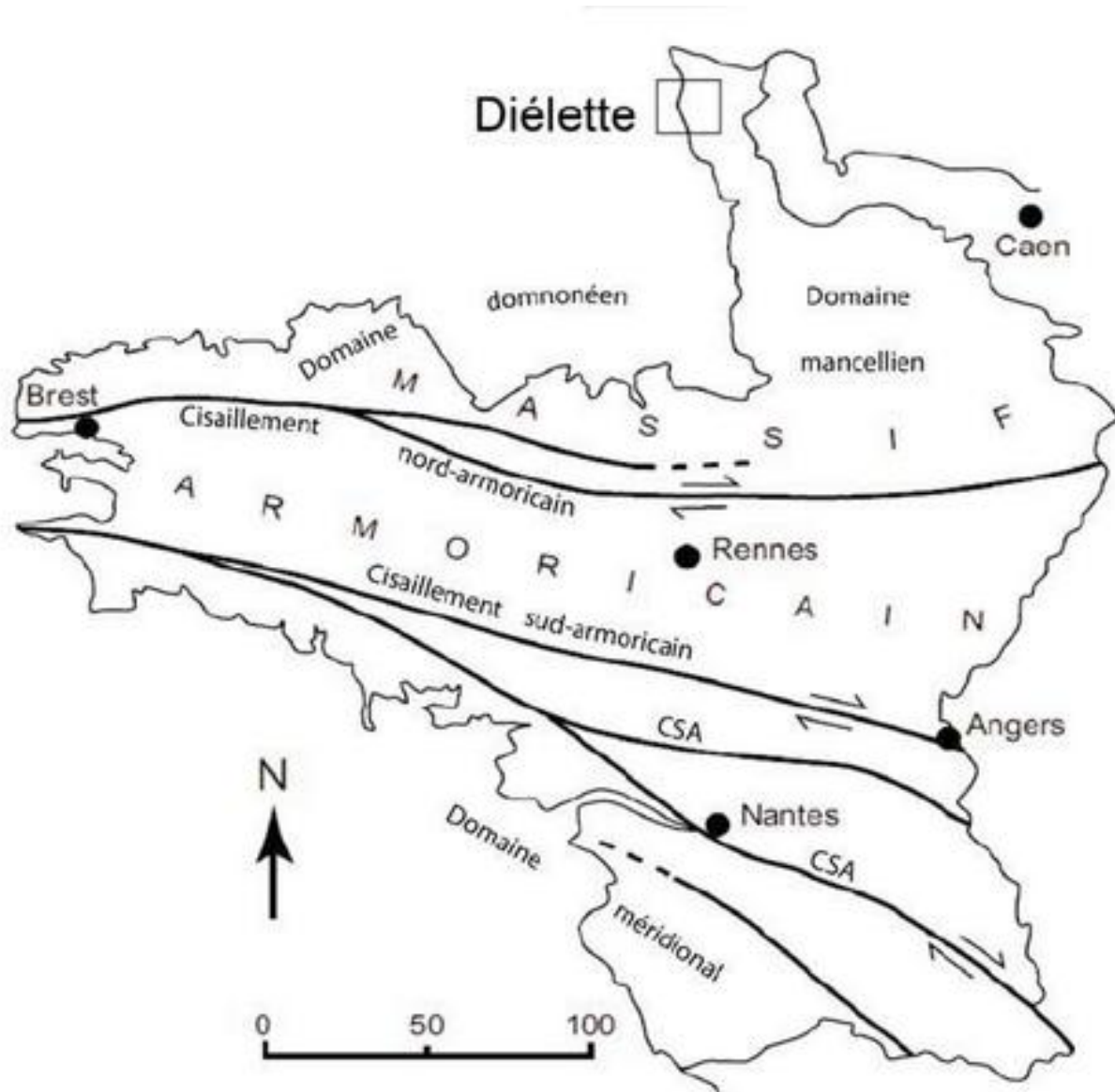


Figure 1 - Carte géologique du secteur de Diélette et sa situation dans le Massif armoricain. Sur la carte générale, les principaux domaines armoricains sont indiqués ainsi que les grands cisaillements. CSA désigne les autres branches majeures de l'accident sud-armoricain.

Sur la côte ouest du Cotentin, la grano-diorite de Flamanville forme un petit massif elliptique de 7,4 par 4,5 km intrusif dans les séries sédimentaires paléozoïques du flanc Sud du synclinal de Siouville (fig. 1). C'est une granodiorite porphyrique à hornblende et biotite à phénocristaux d'oligoclase zoné (26 à 15 % An), d'orthose et de microcline (Chauris, 1965, 1979 ; Chauris et Guigues, 1969) avec quelques enclaves pluri-décimétriques d'encaissant et de xénolites mafiques, non skarnifiés. La scheelite et la molybdénite décrites par Chauris (1965) dans des petits filons intra-granitiques et dans l'auréole de contact, sont des attributs intrinsèques de la lignée granitique S décrite par Pitcher (1983) et associée à un contexte de collision

continentale. La granodiorite de Flamanville est syntectonique, mise en place à moins de 5 km de profondeur en contexte transpressif dans une croûte superficielle froide et peu résistante (Brun et al., 1990), très probablement au Carbonifère supérieur. Des dykes stériles de microgranites et d'aprites à disposition radiale sont présents dans et en bordure de la granodiorite.

Le magma, hybride, résulterait d'un mélange partiel en base de croûte entre deux magmas, crustal et mantellique, ce dernier attesté par la présence d'enclaves basiques, et qui aurait déclenché la fusion partielle de la croûte. Une chambre magmatique, après élévation dans la croûte inférieure, serait restée bloquée à l'interface croûte inférieure ductile/croûte supérieure fragile et des injections se seraient propagées jusqu'en surface, créant le massif de Flamanville (Brun et al., 1990). Les failles NNW-SSE, injectées de dykes felsiques, observables au Sud du synclinal de Siouville, auraient alors permis l'ascension du magma.

#### *Auréole de métamorphisme et minéralisations*

Une auréole de métamorphisme de contact se développe sur 500 m à 1 km autour de la granodiorite, transformant les roches encaissantes en cornéennes et en skarns à pyroxénites et grenatites, particulièrement bien exposées sur l'estran aux environs du port de Diélette (fig. 2). Les formations dévoniennes des « schistes et calcaires de Néhou », qui comportent par endroits des grès oolithiques ferrugineux, y sont presque totalement transformées, et recoupées par des dykes de microgranites et d'aprites.

L'ancienne mine de Diélette, étudiée en détail plus loin, appartient à cette auréole de contact. Elle exploitait les « skarns ferrifères » développés près de la granodiorite aux dépens de niveaux gréseux riches en oolithes ferrugineuses, métasomatisés en niveaux riches en hématite ± magnétite massive (Caillère et Kraut, 1965 ; Graindor, 1998).

#### *Cadre structural*

La structuration régionale montre une succession d'anticlinaux et de synclinaux avec une orientation d'ensemble N70°E. Les plans axiaux de ces plis d'amplitude kilométrique sont légèrement recourbés aux abords du massif de Flamanville (Brun et al., 1990). Des plis d'ordre inférieur, isopaques à semblables, d'amplitude métrique à hectométrique, sont visibles dans les cinq cents premiers mètres autour du granite et forment au Nord-Ouest de celui-ci trois synclinaux successifs ayant des axes faiblement plongeants. Les travers-bancs de l'ancienne mine de fer de Diélette recoupaient ces trois synclinaux.

Les axes de plis orientés N118°W en moyenne et la linéation d'intersection mesurée sont fortement plongeants (60°) par rapport aux mesures prises plus près de la granodiorite.

Les formations de la gare maritime montrent ainsi des S0 nettement replissées en antiforme avec un axe mesuré moyen plongeant de 38° vers 76°W. Certaines diaclases se disposent autour de cet axe, d'autres perpendiculairement.

Le Mont Saint-Gilles (S0: N73°E à pendage NO de 71° en moyenne) montre sur les nombreuses surfaces structurales des linéations d'intersection similaires aux axes de plis de la gare maritime ainsi que l'axe d'un pli d'amplitude hectométrique. La stratification de la zone de la centrale nucléaire est peu visible en raison de l'abondance de grenats et de pyroxènes néoformés. La seule linéation observable ici est orientée 56°W avec un plongement de 26°. Aucune schistosité n'est visible dans cette zone. Le niveau à magnétite a très bien conservé sa stratification, globalement orientée N48°E à pendage NO de 59°. La linéation d'allongement orientée N63°W plonge de 22°. Les plans de stratification sont légèrement replissés et leurs polaires s'alignent selon un plan d'orientation N153°W 67 ce qui donne un axe de plis de 63W plongeant de 23°, en accord avec les linéations mesurées. Aucune schistosité n'est clairement exprimée dans cette zone. La linéation mesurée dans le port de Diélette est très semblable : 90 W à plongement de 29°.

Plus au nord, la stratification autour du Mont Saint-Pierre, globalement orientée N35°E à pendage 65° vers le NO, mais est fortement replissée localement, avec des plis de gaufrage de longueur d'onde décamétrique, dissymétriques similaires à isoclinaux, inclinés à déversés et à axe plongeant. Ces plis sont parfois faillés à la charnière et évoluent localement en kink. À l'échelle du Mont Saint-Pierre, on remarque un léger plissement des S0 ayant un axe calculé orienté 149 W plongeant de 63°, parallèle aux autres axes et linéations mesurés.

Nos mesures sur des sites localisés à des distances variables du massif montrent que la mise en place de la granodiorite de Flamanville provoque une horizontalisation des axes de plis qui viennent alors mouler la granodiorite quand on se rapproche de celle-ci (fig. 3). Cette horizontalisation s'explique par la forme actuelle du pluton en goutte d'eau retournée et tronquée par l'érosion, cohérente avec la forme déterminée par géophysique (Brun et al., 1990).

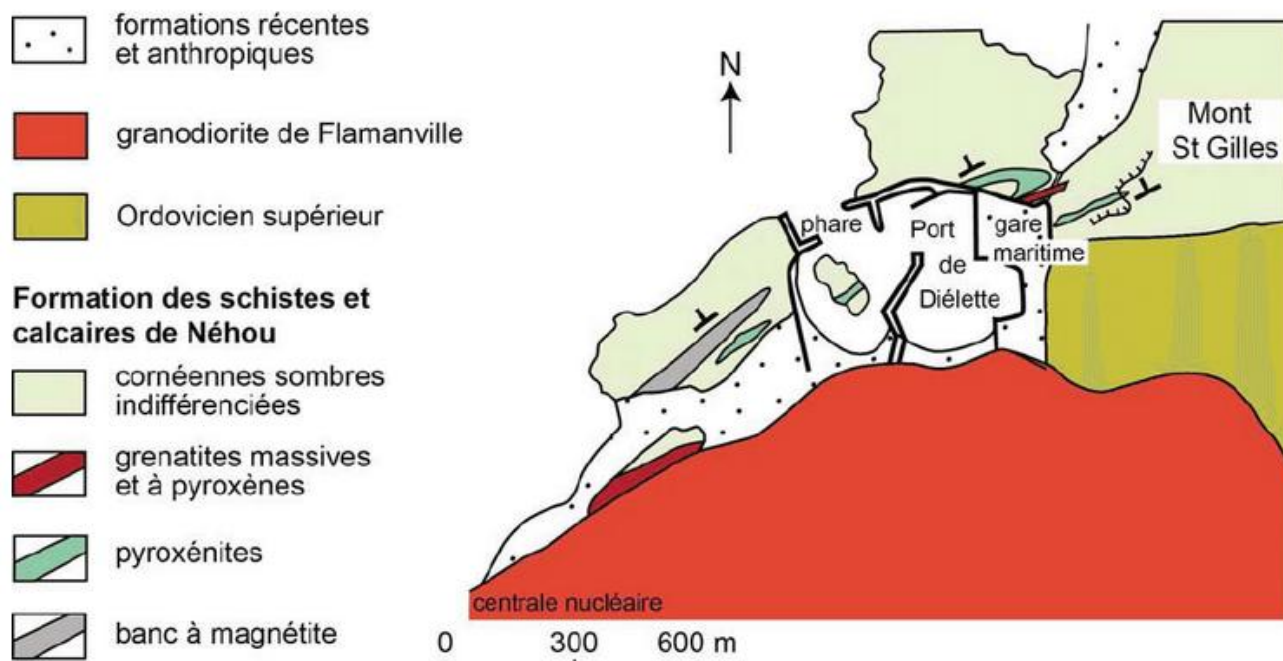


Figure 2 - Carte géologique détaillée du secteur de Diélette et situation des sites mentionnés dans le texte. Les mesures stratigraphiques essentielles du skarn sont indiquées.

La schistosité associée aux plissements carbonifères est mal exprimée sur le terrain où elle se manifeste parfois sous forme d'une schistosité de fracture assez fruste (gare maritime) ou par des plans de dissolution vacuolaire (Mont Saint-Pierre). Les diaclases, quand elles ne représentent pas des plans de schistosité mal exprimés, font un angle d'une soixantaine de degrés avec le contact de la granodiorite. La linéation observable un peu partout n'est donc pas une linéation d'intersection mais plutôt d'allongement. L'intensité de la déformation plicative n'est pas égale partout comme l'attestent les figures de charge du Mont Saint-Pierre qui contrastent nettement avec les ombres de pression de la gare maritime.

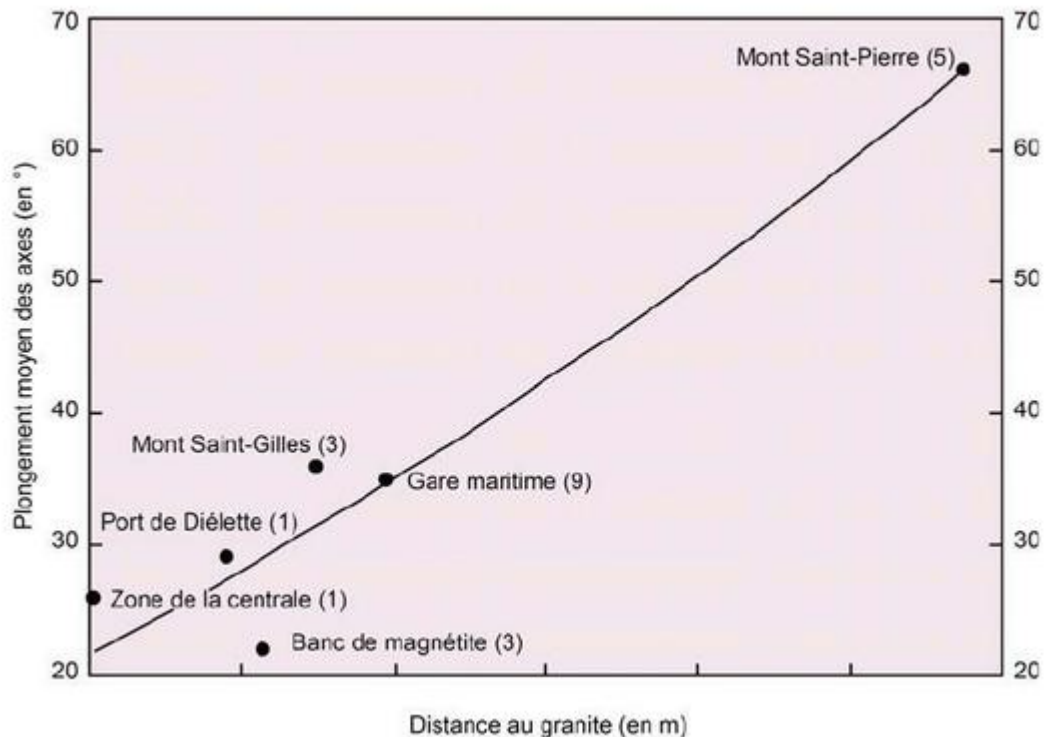


Figure 3 - Évolution du plongement des axes de plis avec l'éloignement à la granodiorite de Flamanville (graduations de 100 m sur l'abscisse). La courbe de tendance est pondérée du nombre de mesures, indiqué entre parenthèses pour chaque zone.

Cette différence d'intensité, marquée par la dysharmonie des plis, souligne aussi l'hétérogénéité primaire de compétence de la roche. Cette déformation se traduit aussi par un net aplatissement des oolites des formations ferrifères.

### *Minéralisations*

Le « skarn de Diélette » a été exploité pour le fer par intermittence de 1840 à 1962 par la Société des Mines et Carrières de Flamanville (Bruneau, 1914 ; EDF, 2010). Le gisement, estimé à 70 millions de tonnes de fer (dont 50 Mt exploités) à teneur moyenne de 48 à 58 % Fe, constitue le plus gros gisement de fer de l'Ouest de la France. Plus de 10 km de galeries furent creusés sous la mer aux niveaux -90 m et -150 m et des réserves « importantes » seraient toujours en place, mais actuellement situées près de la centrale nucléaire de Flamanville. Ce gisement se présente sous la forme de sept couches parallèles, replissées en trois synclinaux, minéralisées en magnétite-hématite (fig. 4). Ces plis réduisent le volume de stérile et les plis faillés dédoublent l'épaisseur de certaines couches.

Les couches ferrifères étaient initialement des grès à oolites ferrugineuses du Dévonien inférieur (Coblencien ~ 416- 402 Ma), transformées en hématite-magnétite par métamorphisme de contact. Le nucléus des oolites est constitué de quartz, de pyroxène – épidote ou de calcite, la zone corticale est à lamelles d'hématite et

cristaux automorphes de magnétite qui remplacent parfois des fossiles de brachiopodes.

Des sulfures fins (rarement en plages centimétriques) ont également été observés, assez systématiquement dans les pyroxénites ; ils se présentent en disséminations lenticulaires à contrôle structural de faible extension (20 cm maximum) et en petits filons millimétriques sécants. Les couches à magnétite en sont dépourvues. Il s'agit essentiellement de pyrrhotite avec plus ou moins de pyrite et de chalcopryrite, avec exceptionnellement des lamelles de pentlandite (port de Diélette). Ces sulfures disséminés sont communs dans toutes les roches mafiques.

D'autres minéralisations, à Fe-Mo-W-Cu, résultent de la mise en place de la granodiorite de Flamanville. Il s'agit de minéralisations sulfurées (pyrrhotite, chalcopryrite, pyrite) avec magnétite, scheelite et molybdénite à contrôle structural portées par les pyroxénites, en plusieurs endroits de l'auréole de métamorphisme (Mont Saint-Gilles, mine de fer, sud-ouest de la jetée du port ) , ainsi que de minces filons quartzeux intra-massif à molybdénite et/ou scheelite, ainsi que de pegmatites à scheelite (carrière au nord-ouest des Pieux). Ces minéralisations tardi-magmatiques ont été décrites comme le « skarn Mo-W de Flamanville » par Chauris (1965). Scheelite et molybdénite n'ont pas été retrouvées au cours de nos travaux.

#### *Skarn de Diélette*

L'auréole métamorphique de Diélette montre pour l'essentiel des cornéennes de teinte sombre, à texture finement gréseuse et cassure conchoïdale, présentant des alternances de niveaux grisâtres à noirs concordantes avec la stratification. Ces cornéennes à quartz et biotite dominants avec chlorite, muscovite, titanite, andalousite et zircon, sont d'anciens niveaux pélitiques. Localement, on observe des bancs parfois plurimétriques de silicates calciques dominants, caractéristiques des skarns, ainsi que des bancs de grès à magnétite, qui correspondent à d'anciens niveaux grés-carbonatés. Trois types de roches à silicates calciques dominants ont été distingués : les grenatites massives (plus de 80 % de grenat), souvent en association intime avec les grenatites à pyroxène (avec entre 10 et 30 % de pyroxène), et les pyroxénites, à dominance de pyroxène, avec ou sans grenat.

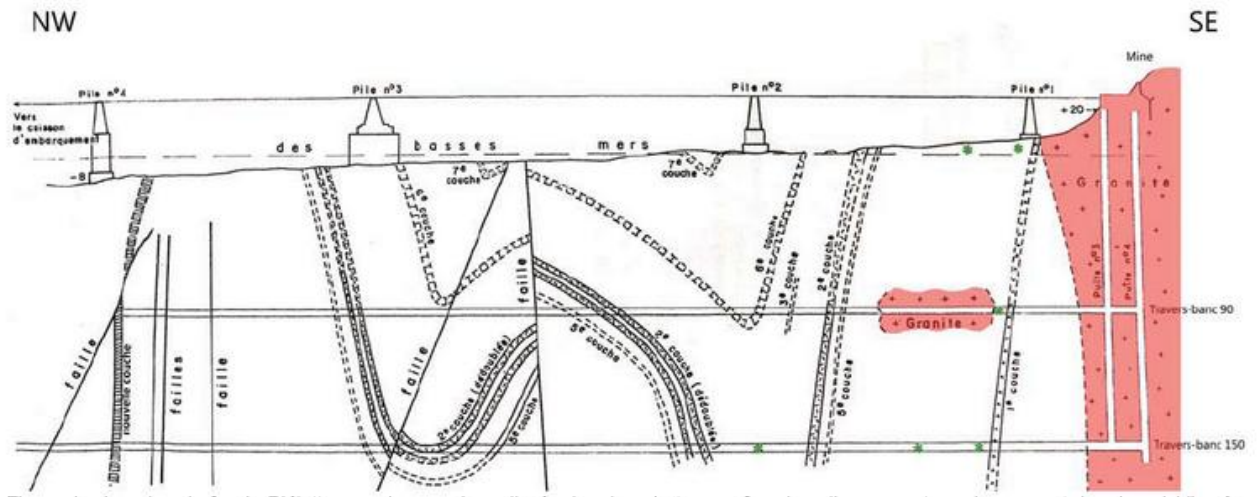


Figure 4 – La mine de fer de Diélette avec les couches plissées de minerai et en surface les piles servant au chargement du minerai (d'après Chauris, 1979). L'intervalle entre les deux niveaux d'exploitation est de 60 m.



Figure 5 - Allure des bancs de silicates calciques près de la centrale nucléaire. A et B : alternance de granites (brun-rouge) et de Figure 5 - Allure des bancs de silicates calciques près de la centrale nucléaire. A et B : alternance de granites (brun-rouge)

et de pyroxénites (blanchâtres à verdâtres) ; C : détail des grenatites avec grenats automorphes ; D : contact granodiorite (à droite) – grenatite. pyroxénites (blanchâtres à verdâtres) ; C : détail des grenatites avec grenats automorphes ; D : contact granodiorite (à droite) – grenatite.

Aucun banc de pyroxénite ni de grenatite n'a été observé à plus de 500 m de la granodiorite. Deux sites sont particulièrement remarquables pour étudier ces roches : le bord de mer au nord de la centrale nucléaire, et les rochers de la gare maritime de Diélette (fig. 5 et 6).

Les cornéennes sont absentes au contact entre le granite et les grenatites. Elles apparaissent sous forme lenticulaire à environ 20 m du contact puis deviennent dominantes à environ 30-40 m du granite, jusqu'à la gare maritime. On observe cependant dans le port même un niveau métrique de pyroxénite à grenat associé à deux niveaux plus minces de grenatites, orienté N51°E à pendage NO de 54°.

Les rochers au nord de la centrale nucléaire, en contrebas de la route qui longe la mer depuis le port de Diélette (le « chemin de la mine »), montrent le contact franc entre la granodiorite et les skarns (fig. 5). Le skarn est composé de bancs parfois plurimétriques de grenatites massives (grenats millimétriques à 4 cm) qui alternent avec des bancs aussi puissants de grenatites à pyroxènes, et plus rarement de pyroxénites à grenat. Au niveau du contact, on observe ainsi un banc de grenatite massive de près de 8 m de puissance constituée de grenats automorphes centimétriques, alternant avec des bancs centimétriques plus riches en pyroxènes. En s'éloignant du contact, la grenatite s'enrichit progressivement en pyroxène, passant localement à des bancs de grenatites à pyroxénites. La stratification S0 est globalement N40°E avec un pendage de 39° à 60° nord. Dans la zone de contact, des dykes de pegmatites et d'aplite émis par le granite recourent à l'emporte-pièce les skarns. Cependant, aucune enclave de skarn n'a été observée dans le granite.

Enfin, des dykes de microgranite porphyrique d'épaisseur parfois plurimétrique à biotite, hornblende et titanite, presque conformes à la stratification, ainsi que des filons d'aplite, recourent granites et skarns.

Les rochers de la gare maritime se situent à environ 400 m au nord de la granodiorite (fig. 6). La stratification S0 est globalement orientée N70°E avec un pendage NNO de 60°. La lithologie est dominée par les cornéennes sombres mais admet des bancs de pyroxénites et de grenatites, bien visibles de chaque côté de la cale. On remarque notamment sur la gauche en descendant un banc très oxydé de grenatite massive (0,2 à 0,6 m de puissance) à pyroxènes interstitiels, encadrée par deux bancs minces (0,10 m) de pyroxénites rubanées de teinte vert pâle à vert émeraude. Ces alternances grenatite-pyroxénite se prolongent de part et d'autre de

la cale sur plus de 100 m. On y observe des plis et la prédominance des bancs de pyroxénites qui deviennent plurimétriques et prennent une teinte gris verdâtre.

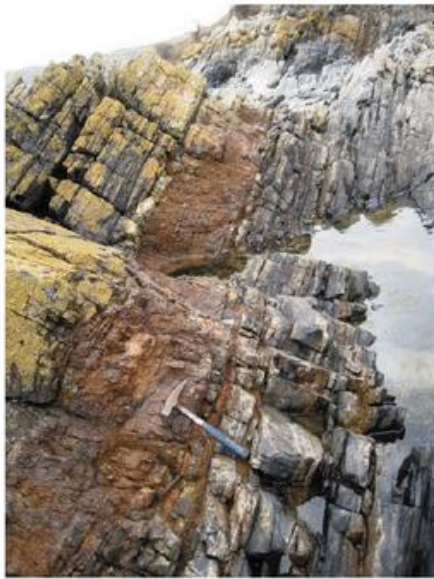
En allant vers le nord, on ne retrouve plus que des cornéennes avec quelques minces niveaux de pyroxénites.

L'orientation générale de la stratification est similaire (N60°E à pendage NNO de 70°). Les cornéennes fortement plissées présentent localement des structures sédimentaires de type slump ou des figures de charges, et sont recoupées par deux filons de microgranites de puissance métrique, de direction N150°E.

Au-dessus de la cale, dans la carrière du Mont Saint-Gilles, des bancs décimétriques de pyroxénites et d'autres plus minces de grenatites à pyroxènes peuvent être suivis sur presque 25 m. La stratification est alors de N75°E avec un pendage NNO de 70-75°. Les grenatites sont plus développées près de la granodiorite, alors que les pyroxénites s'expriment davantage à quelque distance, une disposition conforme à la zonalité minérale habituelle des skarns (Einaudi and Burt, 1982).

Outre ces grenatites et pyroxénites, l'auréole de métamorphisme admet également sept couches gréseuses à magnétite, anciennement exploités pour le fer.

L'appellation usuelle de « skarn » de ces couches ferrifères métamorphisées sera discutée plus loin. L'ennoyage de la mine est globalement orientée N70°E avec un pendage NNO de 60°.



A

à **magnétite**, anciennement exploités pour le fer. L'appellation usuelle de « skarn » de ces couches ferrifères métamorphisées sera discutée plus loin. L'envoyage de la



B



C



D

Figure 6 - Allure des bancs à silicates calciques près de la gare maritime. A : banc oxydé de grenatite au sein de cornéennes ; B : bloc montrant une alternance de banc de grenatite (oxydé), de pyroxénite (blanchâtres) et de cornéennes (gris) ; C : détail d'un banc de pyroxénite montrant le rubanement ; D : banc de pyroxénite (blanc verdâtre) au sein des cornéennes (gris sombre).

La lithologie est dominée par les cornéennes sombres mais admet des bancs de pyroxénites et de grenatites, bien visibles de chaque côté de la cale. On remarque notamment sur la gauche en descendant un banc très oxydé de grenatite massive (0,2 à 0,6 m de puissance) à pyroxènes interstitiels, encadrée par deux bancs minces (0,10 m) de pyroxénites rubanées de teinte vert pâle à vert émeraude. Ces alternances grenatite-pyroxénite se prolongent de part et d'autre de la cale sur plus de 100 m. On y observe des plis et la prédominance des bancs de pyroxénites qui deviennent plurimétriques et prennent une teinte gris verdâtre.

En allant vers le nord, on ne retrouve plus que des cornéennes avec quelques minces niveaux de pyroxénites. L'orientation générale de la stratification est similaire (N60°E

à pendage NNO de 70°). Les cornéennes fortement plissées présentent localement des structures sédimentaires de type slump ou des figures de charges, et sont recoupées par deux filons de microgranites de puissance métrique, de direction N150°E.

Au-dessus de la cale, dans la carrière du Mont Saint-Gilles, des bancs décimétriques de pyroxénites et d'autres plus minces de grenatites à pyroxènes peuvent être suivis sur presque 25 m. La stratification est alors de N75°E avec un pendage NNO de 70-75°. Les grenatites sont plus développées près de la granodiorite, alors que les pyroxénites s'expriment davantage à quelque distance, une disposition conforme à la zonalité minérale habituelle des skarns (Einaudi and Burt, 1982).

Outre ces grenatites et pyroxénites, l'auréole de métamorphisme admet également sept couches gréseuses à magnétite, anciennement exploités pour le fer.

L'appellation usuelle de « skarn » de ces couches ferrifères métamorphisées sera discutée plus loin. L'ennoyage de la mine et la construction de l'EPR de la centrale nucléaire de Flamanville interdisent tout accès aux travaux miniers. Une de ces couches à magnétite est superbement exposée à l'Ouest du port de Diélette, au sud du phare, à environ 200 m de la granodiorite, et reste accessible à l'observation à marée basse (fig. 7).



Figure 7 - Banc métrique de magnétite sur l'estran au sud du phare de Diélette. Noter le pendage très fort du banc. Au fond : l'EPR de Flamanville.

Elle est orientée N 48-60°E avec un pendage NNO de 59 à 75°, interstratifiée dans les cornéennes. D'allure lenticulaire, elle se suit sur près de 150 m avant de disparaître sous le sable (extrémité SO) ou de se pincer (extrémité NE). Sa puissance réelle est d'environ 10 m et elle est recoupée, ainsi que les cornéennes, par des filons aplitiques. Une petite couche annexe, bien plus réduite, affleure une cinquantaine de mètres au sud-est de la précédente, au contact d'un banc de pyroxénite.

#### *Minéralogie et géochimie du skarn*

Au microscope optique, les grenatites massives montrent une roche majoritairement (plus de 80 %) composée de grenats automorphes de taille variable (200 µm à plus de 1 cm) généralement non zonés. Des clinopyroxènes, xénomorphes à sub-automorphes sont également présents, dans les fractures et interstices des grenats, associés à du quartz. De la titanite et de la séricite, un peu de pyrite (intra-grenat), et de la préhnite (gare maritime) complètent la paragenèse.

Les grenatites à pyroxènes (10 à 30 % de clinopyroxènes) possèdent une texture plus nettement rubanée, due à l'alternance millimétrique à centimétrique de lits à clinopyroxènes xénomorphes dominants et de lits à grenats (xénomorphes à sub-automorphes) dominants. Du quartz est présent notamment dans les lits à clinopyroxènes, et l'on observe également de l'anorthite (Na<sub>2</sub>O comprise entre 0,25 et 0,98 % - cf. annexe 1) et de la pyrite. Des fissures (de l'ordre de 500 µm de puissance) remplies de quartz et de clinopyroxènes recoupent les grenats.

Les pyroxénites offrent davantage de variations. La pyroxénite « standard » est massive, de teinte blanc verdâtre, majoritairement constituée d'une matrice à quartz, biotite et clinopyroxènes, portant des cristaux sub-automorphes à automorphes de clinopyroxène (50 à 100 µm en moyenne) et de titanite. Les grenats, inframillimétriques à centimétriques, sont présents dans certains bancs. D'autres pyroxénites sont rubanées suite à l'alternance de lits de compositions minéralogiques différentes.

La pyroxénite bordant la grenatite de la gare maritime, est ainsi composée d'une alternance de lits millimétriques vert-grisâtre (très riches en clinopyroxène) et gris-violacé (clinopyroxène moins abondant au profit du quartz). Des fractures sécantes sur le rubanement recoupent l'échantillon et sont remplies de quartz et de lawsonite. De l'anorthite (Na<sub>2</sub>O comprise entre 0,39 et 0,95 % - cf. annexe 1), de la titanite et de la pyrite ont également été observées.

Toujours à la gare maritime, sur le côté est de la cale, un banc de pyroxénite particulière de teinte grise est essentiellement constituée de calcite, quartz, avec quelques rares clinopyroxènes, et des traces de chalcopyrite.

Les grenats de Diélette sont tous des grossulaires avec une fraction de pyralspite allant de 5 à 9 %. Leur chimisme varie cependant le long de la solution solide grossulaire – andradite, mais est indépendant de la nature

de la roche : grenatite massive ou à pyroxène. La composition des grenats de la centrale (grenatite massive et à pyroxène) varie entre  $Gr_{64}Ad_{27}Py_9$  et  $Gr_{82}Ad_{12}Py_6$ , celle des grenats du port (grenatite à pyroxène) entre  $Gr_{68}Ad_{25}Py_7$  et  $Gr_{81}Ad_{13}Py_6$ , et ceux de la gare maritime (grenatite massive) entre  $Gr_{76}Ad_{17}Py_7$  et  $Gr_{84}Ad_9Py_7$ . (fig. 8 ; tableau 1).

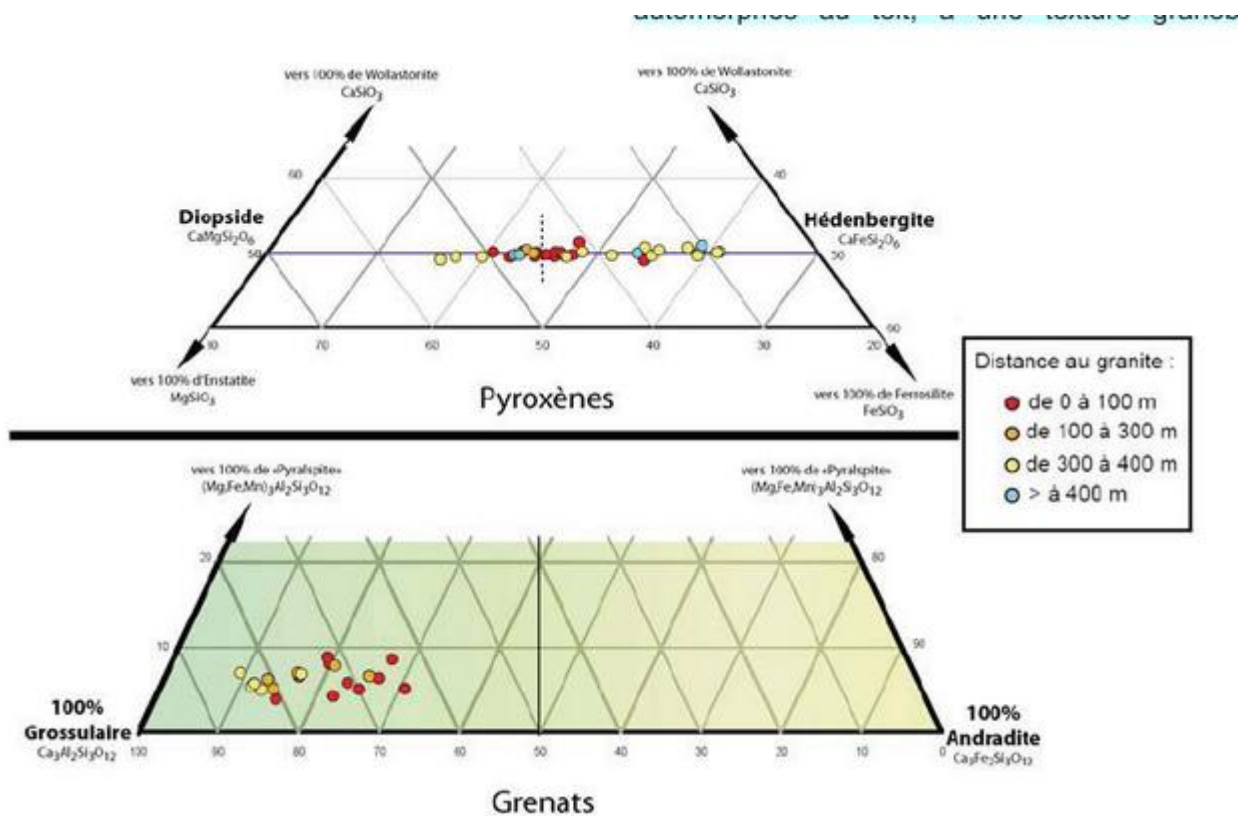


Figure 8 - Diagrammes ternaires illustrant la composition des pyroxènes et des grenats en fonction de la distance à la granodiorite (voir analyses en annexe 1).

<b>Grenat</b>		<b>% Ad, Gr, Py</b>
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 <sub>64</sub> Ad <sub>27</sub> Py <sub>9</sub>
	$(Ca_{2,90}Fe^{2+}_{0,17}Mn_{0,01}Ti_{0,05})_{3,13}(Al_{1,60}Fe^{3+}_{0,25})_{1,85}(SiO_4)_3$	Gr <sub>82</sub> Ad <sub>12</sub> Py <sub>6</sub>
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 <sub>68</sub> Ad <sub>25</sub> Py <sub>7</sub>
	$(Ca_{2,90}Fe^{2+}_{0,17}Mn_{0,04}Ti_{0,08})_{3,19}(Al_{1,54}Fe^{3+}_{0,26})_{1,80}(SiO_4)_3$	Gr <sub>81</sub> Ad <sub>13</sub> Py <sub>6</sub>
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 <sub>76</sub> Ad <sub>17</sub> Py <sub>7</sub>
	$(Ca_{2,84}Fe^{2+}_{0,18}Mn_{0,02}Ti_{0,03})_{3,07}(Al_{1,70}Fe^{3+}_{0,19})_{1,89}(SiO_4)_3$	Gr <sub>84</sub> Ad <sub>9</sub> Py <sub>7</sub>
<b>Pyroxène</b>		<b>% Di et Hd</b>
centrale nucléaire	$Ca_{0,96}(Mg_{0,32}Fe_{0,68}Al_{0,04}Mn_{0,01})_{1,05}(Si_2O_6)$	Di <sub>40</sub> Hd <sub>60</sub>
	$Ca_{1,00}(Mg_{0,58}Fe_{0,41}Al_{0,03}Mn_{0,01})_{1,03}(Si_2O_6)$	Di <sub>60</sub> Hd <sub>40</sub>
port	$Ca_{0,99}(Mg_{0,52}Fe_{0,47}Al_{0,04}Mn_{0,01})_{1,04}(Si_2O_6)$	Di <sub>55</sub> Hd <sub>45</sub>
gare maritime	$Ca_{0,99}(Mg_{0,18}Fe_{0,81}Al_{0,02}Mn_{0,02})_{1,03}(Si_2O_6)$	Di <sub>20</sub> Hd <sub>80</sub>
	$Ca_{0,97}(Mg_{0,54}Fe_{0,44}Al_{0,04}Mn_{0,01})_{1,03}(Si_2O_6)$	Di <sub>55</sub> Hd <sub>45</sub>
mont Saint-Gilles	$Ca_{0,98}(Mg_{0,30}Fe_{0,69}Al_{0,02}Mn_{0,01})_{1,02}(Si_2O_6)$	Di <sub>30</sub> Hd <sub>70</sub>
	$Ca_{0,96}(Mg_{0,68}Fe_{0,31}Al_{0,06}Mn_{0,01})_{1,06}(Si_2O_6)$	Di <sub>65</sub> Hd <sub>35</sub>

Tableau 1 - Formules structurales extrêmes des grenats et pyroxènes des différents sites du skarn de Diélette. Pourcentage de grossulaire (Gr), d'andradite (Ad) et de pyralspite (Py) pour les grenats (Mn a été négligé), de diopside (Di) et d'hédenbergite (Hd) pour les pyroxènes (Al et Mn ont été négligés). Voir annexe 1 pour le détail des analyses.

Une légère zonation cœur-bordure a été observée au MEB dans des grenats de la gare maritime. Cette zonation résulte de variations des teneurs en MgO (0,6 à 2,0 %) dans les termes les plus ferrifères, et des teneurs en MnO (0,4 à 2,6 %) dans les termes les plus alumineux (fig. 9).

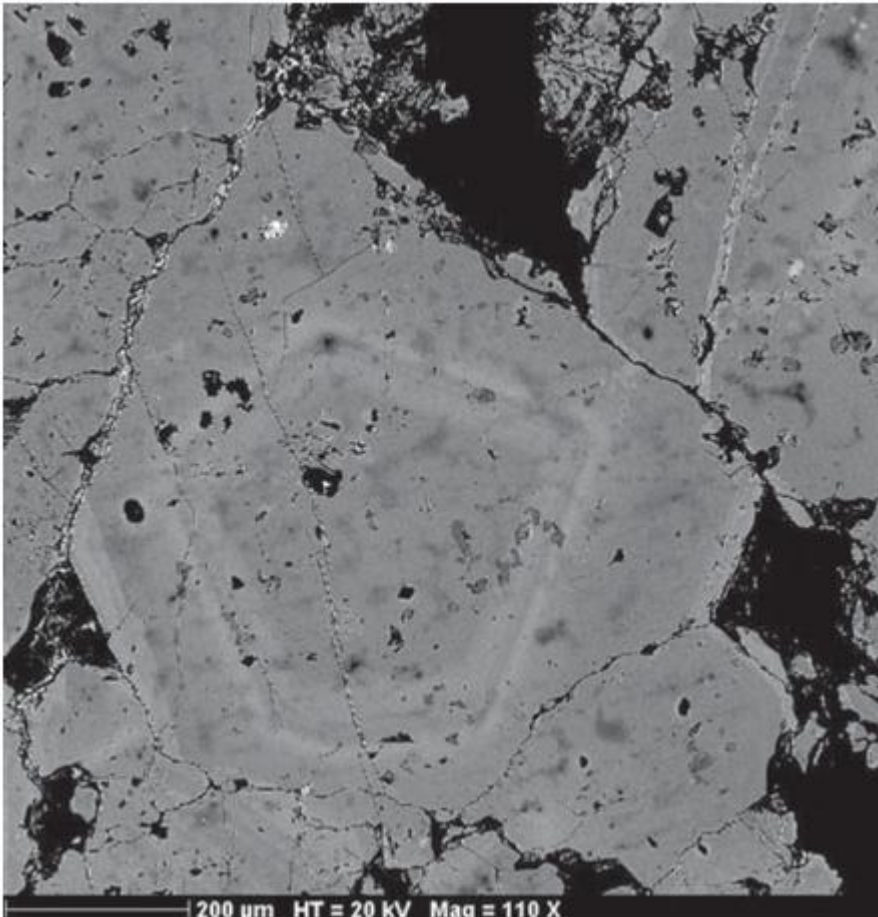


Figure 9 - Zonation chimique dans un grenat grossulaire (grenatite de la gare maritime). Les bandes les plus claires ont 2,6 % MnO contre 0,4 % MnO au cœur (photo MEB JEOL, ISTO).

Les **clinopyroxènes** se situent dans la zone médiane de la solution solide diopside – hédénbergite. Les compositions des clinopyroxènes sont indépendantes de la nature de la roche et varient de :  $Di_{40}Hd_{60}$  à  $Di_{60}Hd_{40}$  dans les grenatites à pyroxènes et pyroxénites à grenat de la centrale, de  $Di_{65}Hd_{35}$  à  $Di_{30}Hd_{70}$  dans la pyroxénite sans grenat du Mont Saint-Gilles, de  $Di_{55}Hd_{45}$  à  $Di_{20}Hd_{80}$  pour les pyroxénites de la gare maritime, et se situent vers  $Di_{55}Hd_{45}$  dans la grenatite à pyroxène du port. L'homogénéité ou l'hétérogénéité des compositions varie selon les sites.

L'**anorthite** observée à la gare maritime, au Mont Saint-Gilles, au port et près de la centrale, est associée aux clinopyroxènes les plus ferrifères. La titanite est commune en cristaux automorphes submillimétriques, parfois en teneurs de quelques pourcents. Son analyse à la microsonde (annexe 1) montre des teneurs significatives en vanadium (1,8 %  $V_2O_3$ ). La wollastonite n'a jamais été observée, ni signalée à Diélette.

### ***Minéralogie des formations ferrifères***

Le gisement de fer de Diélette était composé de sept niveaux plissés de grès à oolithes ferrugineuses, transformés en bancs riches en magnétite par le métamorphisme de contact (Caillère et Kraut, 1965). La puissance de ces bancs n'est pas mentionnée dans les travaux mais celle de la couche affleurant sur la grève (8-10 m) peut être extrapolée. L'accès aux anciennes exploitations est actuellement impossible, mais un banc affleure au sud du phare et les volantes du minerai exploité sont communes sur les grèves et le platier rocheux. Ces volantes ont permis l'observation d'anciennes oolithes, de taille comprise habituellement entre 0,3 et 0,8 mm, et de forme pseudo-losangique qui témoigne d'un aplatissement modéré lors du plissement hercynien (fig. 10). Leur couronne est constituée de lamelles d'hématite disposées en cocardes aplaties. Le nucléus est composé de quartz ou de quartz – hématite en proportions variables, plus rarement de fragments lithiques.

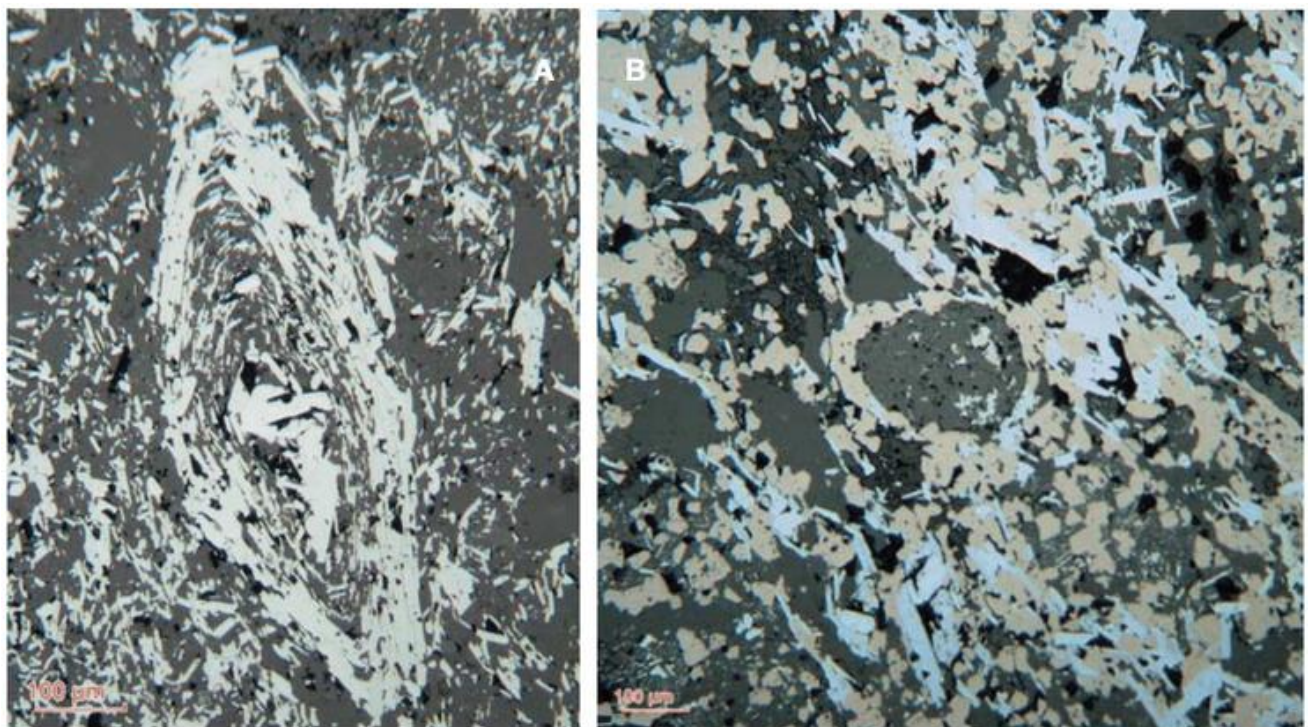


Figure 10 - Minerai de fer de Diélette. A : oolithe aplatie à lamelles d'hématite entièrement pseudomorphosées en magnétite (gris brunâtre) ; B : minerai interstitiel pseudo-oolithique à hématite (lamelles gris-bleuté) et magnétite (cristaux gris-brun).

La magnétite envahit les niveaux à oolithes de cristaux automorphes trapus disséminés, qui peuvent s'agglomérer jusqu'à former des agrégats coalescents effaçant totalement la texture oolithique. Les analyses modales réalisées sur plusieurs stations du niveau ferrifère affleurant montrent que la quantité de magnétite varie : 52 % au toit, 33 % au centre, et 40 % au mur, le plus proche de la granodiorite. La magnétite présente cependant une évolution texturale significative,

passant de cristaux sub-automorphes au toit, à une texture granoblastique équi-granulaire à angles dièdres proches de 120° au mur.

La roche conserve toujours sa texture gréseuse et présente une légère fabrique soulignée par les baguettes d'hématite.

Les pseudomorphoses claires d'hématite par la magnétite sont rares.

Les analyses à la microsonde électronique révèlent l'homogénéité chimique des compositions des cristaux de magnétite (tableau 2). On note des traces d'Al (jusqu'à 1,24 %), de Mn (jusqu'à 1,31 %) et d'autres faibles mais systématiques de V (0,08 à 0,23 %), mais pas de silice. L'hématite, presque toujours associée à la magnétite se présente sous forme de lattes automorphes de quelques centaines de microns qui soulignent la stratification. Au sein du niveau ferrifère affleurant, l'hématite passe de 6 % au toit, à 22 % au centre et n'apparaît qu'en traces au mur, le plus proche de la granodiorite. On la trouve parfois incluse et automorphe dans la magnétite qui la remplace.

L'analyse à la microsonde révèle des traces de titane, d'aluminium et de vanadium. L'ilménite, xénomorphe, est un minéral accessoire présent au sein des rubans à magnétite (1 % au toit à plus de 3 % au mur).

Localement, dans des fissures tardives recoupant la petite lentille de magnétite, on observe de la ferrocapholite millimétrique en remplissage de fractures tardives, et de la monazite contenant un peu de calcium et de thorium (tableau 2). L'épidote, la tourmaline, ainsi que l'apatite, décrites par Caillère et Kraut (1965) le long des travers-bancs de l'ancienne mine de Diélette, n'ont pas été retrouvées dans les échantillons prélevés.

Deux analyses isotopiques d'oxygène ont été réalisées sur deux échantillons de magnétite.

Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  sont de + 7,4 et + 10,7.

### ***Discussion***

Les éléments géologiques et structuraux obtenus sur le terrain ainsi que les analyses minéralogiques, permettent de préciser les conditions de formation de l'auréole métamorphique à skarn de Diélette.

### ***Étape prograde***

L'auréole thermo-métamorphique synchrone des plissements carbonifères, transforme les « Schistes et calcaires de Néhou » en cornéennes (à andalousite du Mont Saint-Pierre) et en skarns à grenat – pyroxène lorsqu'il y a métagénèse. La dissipation de la chaleur apportée par la granodiorite de Flamanville s'opère essentiellement par advection forcée de fluides et non par conduction. Une

dissipation thermique par conduction impliquerait un métasomatisme par diffusion chimique qui conduirait à la formation d'un endoskarn et rendrait très improbable la formation de niveaux skarnifiés isolés comme le pli décamétrique à bancs de pyroxénites de la gare maritime. L'étape de skarnification prograde est principalement marquée par l'apport de silice magmatique .

magnétite														
TiO <sub>2</sub>	0,25	0,43	0,19	0,05	0,00	0,03	0,00	0,07	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,02	0,50	0,48	0,09	0,20	0,10	0,59	1,24	0,41	0,02	0,21	0,65	0,26	0,27
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,12	0,11	0,14	0,23	0,08	0,18	0,10	0,06	0,10	0,05	0,11	0,17	0,11
FeO	31,60	31,56	31,42	31,14	31,04	31,14	29,68	29,84	29,56	29,67	31,16	31,06	31,11	31,07
MnO	0,17	0,11	0,07	0,00	0,06	0,00	1,26	1,19	1,59	1,31	0,09	0,26	0,14	0,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	68,61	69,06	68,92	68,87	68,55	68,96	67,70	66,88	68,56	68,74	69,07	68,47	68,88	68,74
total	101,79	101,78	101,19	100,29	100,08	100,31	99,41	99,32	100,19	99,84	100,59	100,55	100,56	100,29

ilménite			
FeO	40,10	40,73	38,90
TiO <sub>2</sub>	50,50	50,29	50,94
MnO	8,91	8,48	11,01
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,16	2,36	2,30
Total	101,66	101,85	103,15

magnétite					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	98,94	99,10	99,38	96,15	99,22
TiO <sub>2</sub>	0,55	0,75	0,51	1,44	magnétite
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,03	0,98	0,65	0,65	0,96
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,20	0,14	0,15	0,21	0,09
Total	100,71	100,95	100,68	98,45	100,27

monazite	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34,83
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,51
CaO	1,08
CeO <sub>2</sub>	36,07
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,12
ThO <sub>2</sub>	2,39
Total	100,00

Tableau 2 - Composition de magnétite, ilménite et hématite et monazite de Diélette (analyses à la microsonde électronique CAMECA SX 50, laboratoire BRGM-ISTO, Orléans, France). Les éléments P, Si, F, Na, Ca, Mg n'ont pas été détectés dans les oxydes, ni Mg et Mn dans la monazite

Ces fluides siliceux à l'origine des skarns silico-calciques à pyroxène et grenat, percolent à travers l'encaissant grâce à sa forte porosité primaire, réagissent avec lui augmentant ainsi la fraction de fluides métamorphiques (riche en calcium et en CO<sub>2</sub> issus de la décarbonatation), et finissent par former les minéraux du skarn. Ces réactions forment des vacuoles généralement comblées à leur tour lors de l'étape rétrograde ou supergène (Meinert et al., 2005). Il est probable que la scheelite relève également de ce stade prograde.

Les variations de composition observées dans les grenats et les pyroxènes sont peu dépendantes de la distance à la granodiorite, tout au plus peut-on noter une légère tendance pour les hédénbergites les plus ferrifères (Hd > 65 %) à se situer loin du granite, et pour les grossulaires les plus ferrifères à se situer au plus près du granite (cf. fig. 8).

Ces résultats soulignent le rôle déterminant de la composition primaire de l'encaissant. Les grenats sont ainsi d'autant plus proches du pôle grossulaire, alumineux, que la fraction pélitique du protolite est importante. La zonalité grenat – pyroxène est dictée par la distance à la granodiorite, les grenats cristallisant généralement en majorité aux abords de l'intrusion. L'hétérogénéité lithologique

initiale de l'encaissant, décrite par Caillère et Kraut (1965), est le principal responsable des variations de compositions des silicates calciques.

L'ensemble des observations minéralogiques faites à Diélette permet de remonter aux conditions de pression, température et de fugacité en oxygène lors de la formation des skarns. Les conditions limites de formation du « skarn de Diélette » sont de 5 kbars maximum, pour des températures allant de 350° à 650 °C environ (fig. 11).

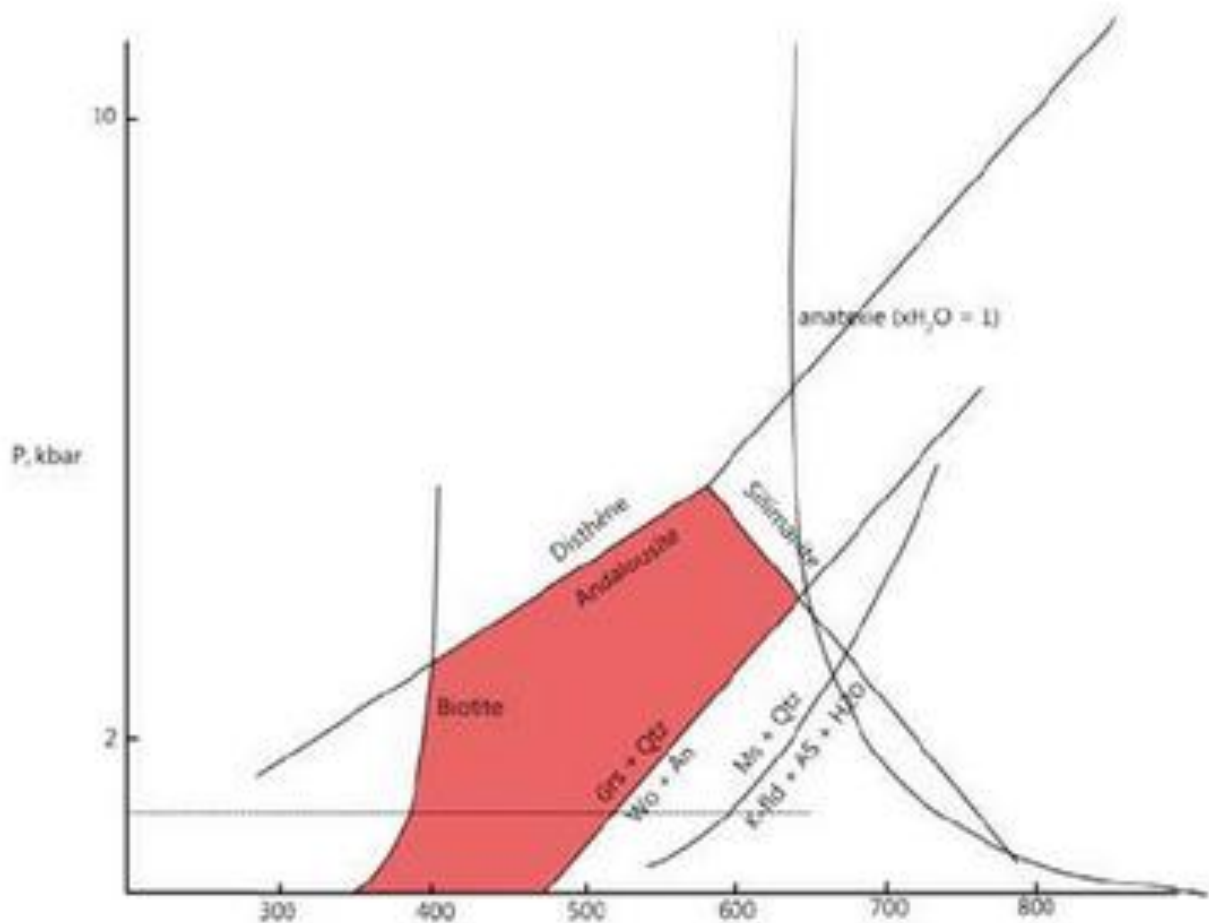


Figure 11 - Diagramme pression-température illustrant les conditions de formation de l'étape prograde du skarn de Diélette. La paragenèse prograde s'inscrit dans le champ de stabilité rouge. An : anorthite ; AS : silicate d'alumine ; Grs : grossulaire ; K-fld : feldspath potassique ; Ms : muscovite ; Qtz : quartz ; Wo : wollastonite. La droite en pointillé représente la profondeur théorique de mise en place de la granodiorite de Flamanville, selon Brun et al. (1990). Modifié de Bucher et Frey (1994) et Wynkler (1976)

Les variations de pression ayant une influence limitée lors du métamorphisme des roches carbonatées, l'utilisation du diagramme  $t^{\circ}\text{C}-f\text{O}_2$  permet de resserrer l'éventail des températures de l'étape prograde, entre  $390^{\circ}$  et  $525^{\circ}\text{C}$  (fig. 12) pour des  $f\text{O}_2$  inférieures à 10-15. Ces températures sont en accords avec la température théorique calculée au contact entre granodiorite et encaissant de  $525^{\circ}\text{C}$  (tableau 3). La pression régnant lors de la formation du skarn peut être estimée proche de celle calculée par Brun et al. (1990) pour la mise en place du granite de Flamanville soit environ 1 kbar.

La position des courbes de réaction est cependant sujette à modifications en fonction de la pression totale et de la pression partielle de  $\text{CO}_2$  du fluide responsable de la skarnification. Aucune analyse d'inclusion fluide n'a pu être réalisée pour remonter à la composition du fluide de l'étape prograde. La fraction de  $\text{CO}_2$  dans le fluide ne peut donc être estimée qu'à partir des valeurs moyennes généralement considérée dans la littérature :  $x\text{CO}_2 \approx 0,1$  (Meinert et al., 2005), une valeur faible qui est cohérente avec la rareté des carbonates dans le skarn.

Par ailleurs, l'étape prograde est anhydre mais contrairement à d'autres skarns ferrifères (Meinert, 1984 ; Meinert et al., 2005 ; Lingang et al., 2010), l'étape rétrograde est elle aussi anhydre (pas d'amphibole, très peu de chlorite et d'épidote). Les rares minéraux hydratés (ferrocarpholite) sont très localisés et probablement issus de l'altération supergène. La silice est cependant dissoute en solution aqueuse et, à partir d'une estimation du volume total des skarns prograde, de leur teneur en silice et de la solubilité de la silice dans l'eau (Eldursi et al., 2009 ; Labotka, 1991), on peut calculer le volume de fluide fourni par la granodiorite de Flamanville, soit :  $4,32 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ , (pour un volume de l'intrusion de l'ordre de  $24 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$  si l'on admet une épaisseur de 1 km), et le tonnage de silice transporté à 13,8 Mt. On néglige dans ce calcul l'apport de silice primaire, provenant de l'encaissant (tableau 4), et on admet une salinité des fluides faible. Cette quantité de silice est donc vraisemblablement un minimum.

L'importance de ce volume d'eau se heurte a priori à l'absence de minéraux hydratés aux stades prograde et rétrograde. Ce résultat implique donc un système ouvert permettant une migration facile des fluides aqueux n'ayant pas réagi avec l'encaissant ou cristallisé, aucun filon notable de quartz n'ayant été observé dans les schistes et calcaires, métamorphisés ou non.

température moyenne d'une granodiorite (T)	900 °C
gradient géothermique	30 °C/km
profondeur de mise en place	5 km
température de l'encaissant ( $\tau$ )	150 °C
température au contact ( $T_c$ )	525 °C
$T_c = \tau + (T - \tau)/2$	

Tableau 3 - Température théorique calculée au contact granodiorite-encaissant (d'après Durand, 2006 ; Kornprobst, 2007).

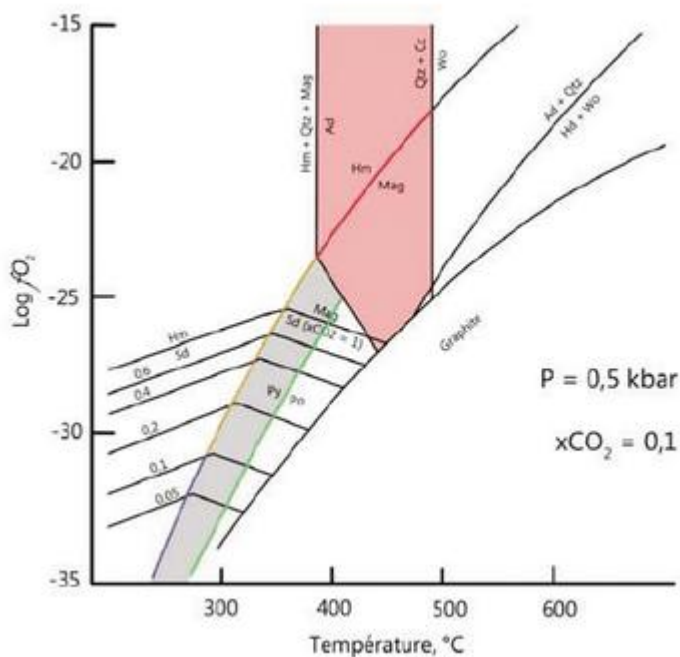


Figure 12 - Diagramme température –  $fO_2$  et champs de stabilité des associations minéralogiques de Diélette. Le champ rouge correspond aux conditions de l'étape prograde. Les courbes rouge, orange et bleue représentent la courbe de stabilité univariante de l'assemblage hématite – magnétite. La courbe verte représente la courbe de stabilité univariante de l'assemblage pyrite – pyrrhotite. Ad : andradite ; Cc : calcite ; Hd : hédénbergite ; Hm : hématite ; Mag : magnétite ; Po : pyrrhotite ; Py : pyrite ; Qtz : quartz ; Sd : sidérite ; Wo : wollastonite. Modifié de Meinert (1982), Ushida et Iiyama (1982), Meinert et al. (2005), Oyman (2010)

### *Bancs ferrifères oolithiques : paléo-environnement et transformations métamorphiques*

Les bancs ferrifères à magnétite montrent des reliques plus ou moins bien conservées d'oolithes qui confirment une origine du minerai par transformation de grès oolithiques ferrifères dévoniens (cf. fig. 10). Les fossiles de brachiopodes, la

lithologie argilites – calcaires – grès des « Schistes et calcaires de Néhou », les zircons détritiques tracent un paléo-environnement marin littoral, parfois agité, et une profondeur inférieure à celle de compensation des carbonates (CCD). La genèse des oolithes en milieu littoral, conséquence des va-et-vient des courants en fin de période régressive, semble maintenant bien établie (Vatan, 1967 ; Young, 1989 ; Sturesson et al., 1999 ; Mücke et Farshad, 2005 ; Cojan et Renard, 2006).

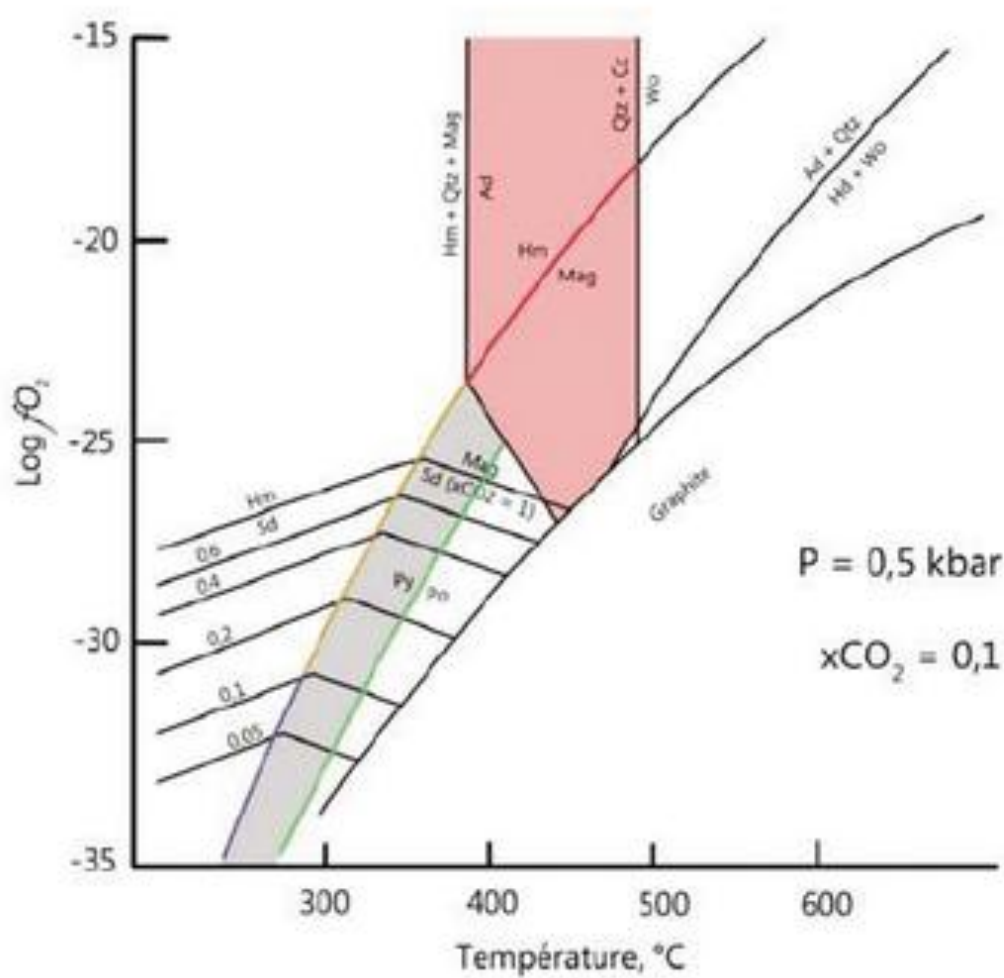
Le minéral ferrifère primaire du minerai oolithique de Diélette n'est pas clairement identifié. Les oolithes les mieux conservées ne montrent que de l'hématite dans leur zone périphérique, mais bien que l'hématite primaire constitue parfois des oolithes (Oggiano et Mameli, 2006), ce minéral peut résulter d'une transformation diagénétique précoce de chamosite (Sturesson, 1995). La présence avérée d'hématite primaire apporterait de nouvelles contraintes sur la genèse, en termes d'état d'oxydation et de pH. La magnétite peut cependant être écartée des possibles minéraux ferrifères primaires, de par son champ de stabilité limité aux hautes températures et aux pH très élevés (Olowe et al., 1989).

L'impact du métamorphisme de contact sur la formation des « Schistes et calcaires de Néhou » a été forte sur ses niveaux ferrifères. Dans les conditions de pression retenues précédemment, l'hématite se transforme en magnétite (transformation dite muschketovite) par métasomatisme lors de l'étape prograde dès 500 °C et une  $fO_2$  comprise entre 10-18 et 10-24 (fig. 13) et se poursuit lors de l'étape rétrograde. Cette transformation a aussi pu avoir lieu en totalité à basse température (fig. 13), mais à condition que la fraction de  $CO_2$  ait été suffisamment faible pour ne pas transformer l'hématite et la magnétite déjà présente en sidérite, d'autant plus qu'une fraction non négligeable de  $CO_2$  peut conduire à l'oxydation de la magnétite (Sangster, 1969). Le nucléus des oolithes, le plus souvent quartzeux et donc très pauvre en calcium, explique l'absence de grenats et de pyroxènes dans les bandes à magnétite. Les fortes valeurs de  $\delta^{18}O$  de la magnétite soulignent que les interactions entre le minerai et d'hypothétiques fluides météoriques ( $\delta^{18}O$  négatif) ont été nulles ou faibles (Rose et al., 1985).

### *Étape rétrograde*

La particularité du « skarn de Diélette » est la rareté des silicates calciques symptomatiques de l'étape rétrograde (épidote, vésuvianite, amphiboles□), représentée aussi par de rares sulfures (pyrrhotite et chalcopirite dominantes), disséminés dans l'ensemble de l'auréole de contact (Chauris, 1979). La cristallisation des sulfures nécessite en effet des fugacités de soufre élevées qui ne sont atteintes qu'en fin de processus, lors de l'étape rétrograde (Meinert et al., 2005). L'activité en soufre peut être estimée d'après la paragenèse vers  $a_{S_2} = 10^{-8}$  à  $10^{-13}$  pour des températures inférieures à 390°-400 °C (fig. 13). Les conditions d'activité en  $O_2$  de

l'étape rétrograde sont quant à elles comprises entre  $aO_2 = 10^{-25}$  et  $10^{-35}$  (courbe verte de la figure 12).



	% vol du skarn	masse molaire (g/mol)	masse molaire de SiO <sub>2</sub> (g/mol/minéral)	densité	masse totale (kt)	nombre total de moles (mol)	masse totale de SiO <sub>2</sub> (kt)
grenat (Gr <sub>75</sub> -Ad <sub>25</sub> )	30%	464,88	180,25	3,6	8821,5	189,759.10 <sup>8</sup>	3 420,47
pyroxène (Di <sub>50</sub> -Hd <sub>50</sub> )	70%	232,32	120,17	3,5	20011,7	861,387.10 <sup>8</sup>	10 351,17
						<b>Total</b>	13 771,64

rayon polaire moyen (m)	3 500
rayon équatorial moyen (m)	2 250
ellipsité	0,77
épaisseur moyenne du skarn (m)	500
surface de la sphère prolata (m <sup>2</sup> )	32,67.10 <sup>6</sup>
volume du skarn (m <sup>3</sup> )	81,68.10 <sup>8</sup>

coefficient d'expansion thermique	2,10.10 <sup>-4</sup>
T (°C)	450
T (°K)	723,15
solubilité de SiO <sub>2</sub> dans H <sub>2</sub> O pure à 450 °C et 1,5 kbar	0,29%
<b>volume H<sub>2</sub>O pure (m<sup>3</sup>)</b>	<b>4,32.10<sup>12</sup></b>

Tableau 4 - Calcul du volume d'eau et de la quantité silice théoriques impliqués dans l'étape prograde. On considère la granodiorite de Flamanville comme une sphère prolata ( $a < c$ ) de surface égale à :  $S = 2.\pi.a^2 + (2.\pi.a.c.\sin^{-1}e)/e$ , avec :  $a$  = rayon équatorial,  $c$  = rayon polaire et  $e$  = ellipsité définie par :  $e = \sqrt{(1-a^2/c^2)}$

Ces très faibles valeurs, en accord avec les fortes valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$ , montrent que le système était isolé des fluides superficiels durant la formation du skarn.

L'absence de vésuvianite et d'épidote peut s'expliquer par un défaut de silice des fluides magmatiques lors de l'étape rétrograde (Grammatikopoulos et Clark, 2006), ou par un apport insuffisant de fluides météoriques aqueux limitant ainsi la formation des minéraux rétrogrades hydratés (Meinert, 2005 ; Einaudi et Burt, 1982). La porosité, suffisamment importante pour que les skarns à grenat – pyroxène se développent, a pu être colmatée lors de cette étape prograde, ce qui a limité les infiltrations.

#### *Durée de vie du système hydrothermal*

On peut considérer le gradient thermique comme unique moteur de circulation des fluides magmatiques et estimer la durée de vie du système hydrothermal responsable des skarns de Diélette grâce aux équations de la chaleur en milieux poreux. Eldursi et al. (2009) ont ainsi pu déterminer les vitesses d'advection de fluides magmatiques en milieux poreux, dans les mêmes conditions thermobarométriques que Diélette (environ 1 kbar et 525 °C), soit une vitesse théorique calculée de 7.10-10 m/s (tableau 5).

L'étendue du skarn à grenat et pyroxène ne dépasse pas 500 m d'extension horizontale mais les fluides ont pu

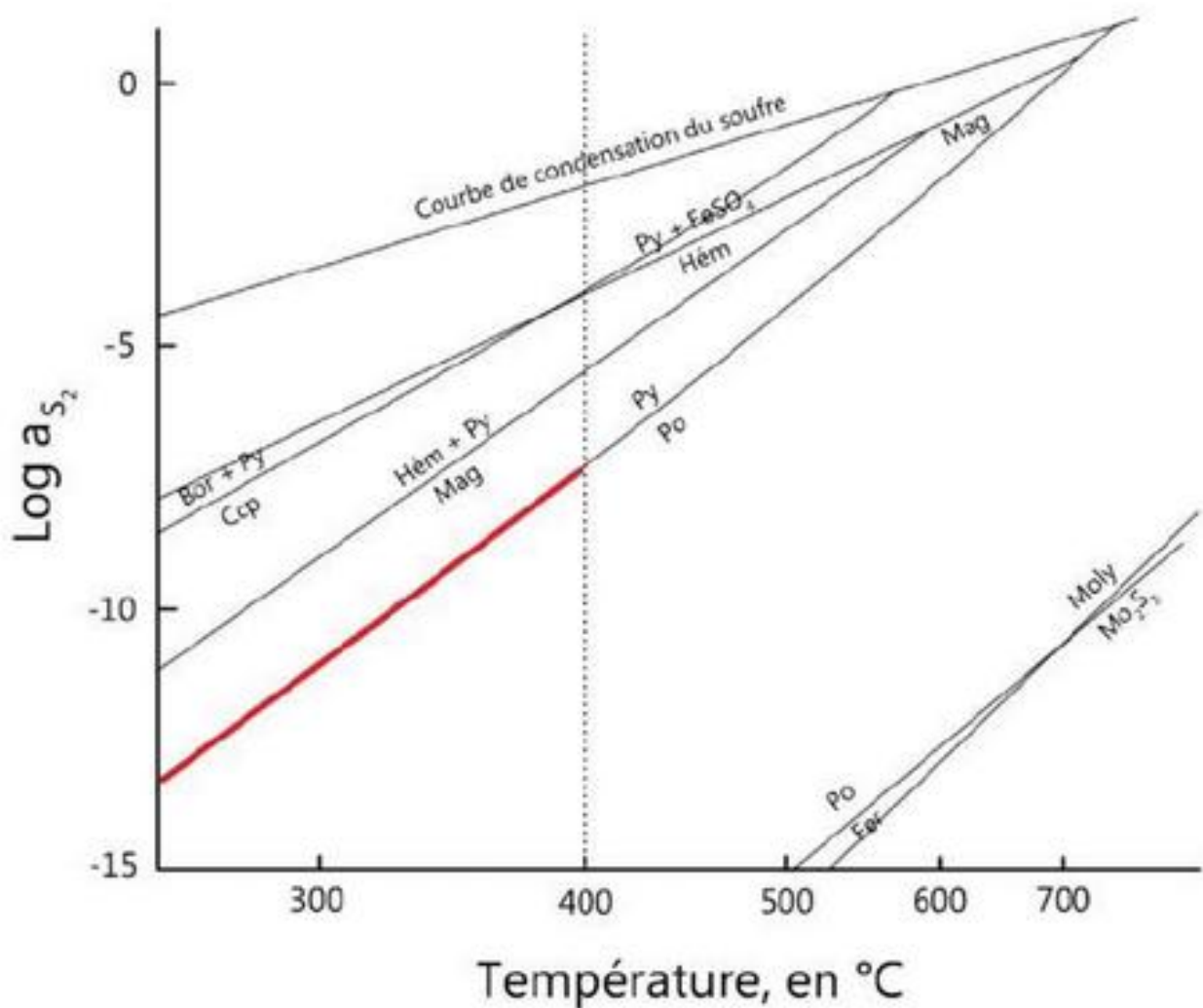


Figure 13 - Diagramme température –  $a_{\text{S}_2}$ . La courbe rouge représente les conditions de l'étape rétrograde. Bor : bornite ; Ccp : chalcopyrite ; Hém : hématite ; Mag : magnétite ; Moly : molybdénite ; Po : pyrrhotite ; Py : pyrite. L'isotherme 400  $^{\circ}\text{C}$  fait référence à la température minimale de l'étape prograde. Modifié de Vaughan et Craig (1978) et de Jébrak et Marcoux (2008).

#### *Comparaison avec d'autres skarns ferrifères*

Aucun skarn à minerai oolithique n'a pu être retrouvé dans la littérature scientifique, ce qui ferait de Diélette un cas unique.

Les skarns du sud-ouest de la Colombie britannique (Canada), datés du Mésozoïque inférieur, présentent la même minéralogie qu'à Diélette : magnétite dominante, grenat et pyroxènes plus ou moins ferrifères, sulfures mais aussi wollastonite et épidote (Sangster, 1969 et Meinert, 1984). Cependant, l'origine du fer est magmatique avec un apport volcano-sédimentaire. Les intrusions en relations avec les skarns sont de type I, oxydantes (Pitcher, 1983).

Le skarn s'est formé entre 800° à 450 °C pour l'étape prograde et 500° à 350 °C pour l'étape rétrograde, pour des pressions de l'ordre de 3 kbars, soit des conditions plus sévères qu'à Diélette. Les conditions d'activité d'O<sub>2</sub>, comprises entre 10-17 et 10-30, et celles d'aS<sub>2</sub>, sont similaires à celles proposées pour Diélette. La magnétite, qui remplit les pores et remplace partiellement les grenats, aurait été déposée suite à l'augmentation du pH par réaction des fluides à complexes ferro-chlorurés avec l'encaissant calcaire. La majorité des gisements ferrifères sont contrôlés structurellement par des charnières anticlinales.

Bien que situé dans un contexte géodynamique différent, le skarn ferrifère de Mengku (Xinjiang Altai, Nord-ouest de la Chine) présente de fortes analogies minéralogiques avec Diélette (Lingang et al., 2010). Le fer est d'origine magmatique avec un apport volcano-sédimentaire. Les conditions de skarnification, bien que non détaillées en termes d'activité d'O<sub>2</sub> et de S<sub>2</sub>, semblent identiques à celles de Diélette avec des températures de 500° à 250 °C pour l'étape prograde.

### ***Conclusion***

Les skarns de Diélette sont les témoins d'une dissipation par advection de la chaleur provenant de la granodiorite de Flamanville mise en place au Carbonifère supérieure, à une profondeur de ~ 5 km dans un environnement transpressif (fig. 14). Sa température initiale de mise en place dépasse les 550 °C.

L'étape prograde, d'une durée minimum de l'ordre de 20 000 ans, s'effectue en système ouvert mais isolé des fluides superficiels et voit l'apparition de grenats et pyroxènes métasomatiques, avec anorthite accessoire, à des températures comprises entre 525° et 390 °C et des activités d'O<sub>2</sub> comprises entre 10-18 et 10-24. Cette première étape résulte des échanges chimiques entre l'encaissant marno-calcaire, les « Schistes et calcaires de Néhou », et les fluides magmatiques siliceux, issus de la granodiorite de Flamanville, qui ont circulé à travers la porosité primaire de l'encaissant. Une porosité secondaire de fracture et de dissolution, par calcination et décarbonatation, se développe alors. Les variations de composition des grenats et pyroxènes reflètent la nature hétérogène de l'encaissant.

L'étape rétrograde, de plus basse température (< 390 °C), est à pyrrhotite et chalcoppyrite dominantes. Les conditions d'activité d'O<sub>2</sub> y sont plus faibles : entre 10-24 et < 10-35 pour des conditions d'aS<sub>2</sub> comprises entre 10-8 et 10-13. Les fluides, également d'origine magmatique, utilisent majoritairement la porosité secondaire de fracture et de dissolution.

Le minerai de fer oolithique du « skarn de Diélette » a pu commencer sa transformation d'hématite en magnétite dès l'étape prograde sous l'influence des fluides métasomatiques. Cependant, la présence de sulfures, même rares, durant l'étape rétrograde implique des activités d'O<sub>2</sub> plus faibles que celles nécessaires à la

stabilité de l'hématite (cf. fig. 12) et donc plus favorables à sa transformation en magnétite.

épaisseur du skarn (m)	vitesse de percolation des fluides magmatiques (m/s)	temps minimum pour développer le skarn (s)	temps (milliers années)
500	$7 \cdot 10^{-10}$	$7,14 \cdot 10^{11}$	22,6

Tableau 5 - Valeurs des paramètres régissant la durée minimum de percolation des fluides magmatiques lors de la skarnification prograde (vitesse de percolation d'après Eldursi et al., 2009) circuler plusieurs fois. Le temps minimum de mise en place du skarn est donc de l'ordre de 20 000 ans, ce qui est cohérent avec la durée de 100 000 ans estimée pour le refroidissement de la granodiorite de Flamanville (Brun et al., 1990).

Figure 14 – Synthèse des variations  $a_{O_2}$ –  $a_{S_2}$  en fonction de la température lors de la formation du skarn à

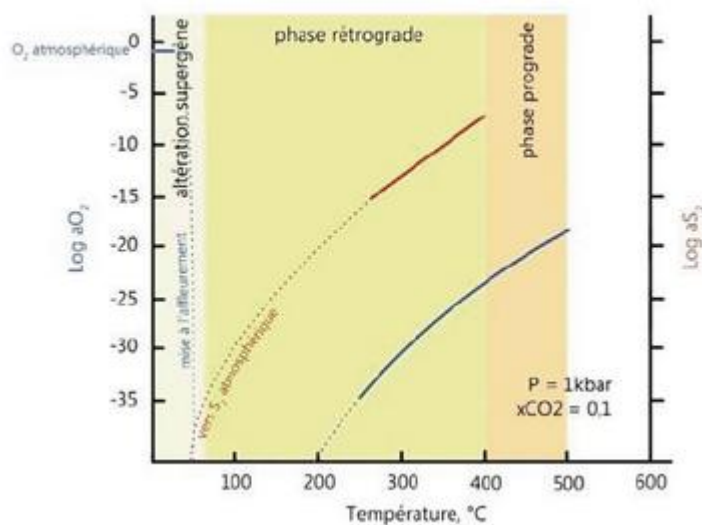


Figure 14 – Synthèse des variations  $a_{O_2}$ –  $a_{S_2}$  en fonction de la température lors de la formation du skarn à Diélette.

Bien que la minéralisation résulte de l'action des fluides métasomatiques issus de la granodiorite de Flamanville, le « skarn » de Diélette exploité pour le fer oolithique n'est pas un vrai skarn ferrifère puisqu'aucun grenat ou pyroxène n'a été observé au sein du minerai et que le fer  $a$ , au moins dans une très grande majorité, a une origine sédimentaire. La texture oolithique parfois conservée du minerai, démontre la source sédimentaire du fer qui constitue un gîte de type Clinton mais métasomatisé.

La présence d'intrusion(s) ne constitue donc pas un métallotecte pour ce type de gisements de fer : les métallotectes pour le fer oolithique de type Clinton (eustatisme et stratigraphie notamment) restent donc les plus pertinents. Cependant, l'intrusion a fortement contribué à l'élaboration d'un gisement en provoquant d'une part une métasomatose, qui a augmenté la teneur en fer du minerai par la transformation hématite - magnétite, et d'autre part un thermométamorphisme qui a provoqué une recristallisation et augmenté la taille moyenne des grains de magnétite, relevant notablement la maille de libération et rendant le traitement du minerai moins coûteux. La présence d'intrusion aux proches alentours de gîtes ferrifères oolithiques peut donc conduire à leur transformation en gisement.

### ***Remerciements***

Les auteurs tiennent à remercier Michel Jébrak, pour sa relecture constructive du manuscrit, ainsi que les deux reviewers anonymes.

### **Références**

**Brun J.P., Gapais D., Cogne J.P., Ledru P., Vignerresse J.L.** (1990) - The Flamanville Granite (Northwest France): an unequivocal example of a syntectonically expanding pluton. *Geological Journal*, 25, p. 271-286.

**Bruneau L.** (1914) - L'Allemagne en France : enquêtes économiques : mines, métallurgie, produits chimiques, colles, gélatines et engrais, Plon-Nourrit et Cie, Paris, 343 p.

**Bucher K., Frey M.** (1994) - Petrogenesis of metamorphic rocks – 6th édition, Springer-Verlag, Allemagne, 318 p.

**Butaeyea D., Lavillea E., Le Gall J.** (2001) - Géométrie et cinématique des chevauchements varisques du Nord-Est du Massif armoricain (France). *Earth and Planetary Sciences*, 332, p. 283-289.

**Caillère S., Kraut F.** (1965) - Les minerais de fer d'âge primaire de Normandie et de l'Anjou, Mémoires du muséum national d'histoire naturelle, série C. Sciences de la Terre, XII, 2, 102 p.

**Chantraine J., Egal E., Thiéblemont D., Le Goff E., Guerrot C., Ballèvre M., Guennoc P.** (2001) - The Cadomian active margin (North Armorican Massif, France) : a segment of the North Atlantic Panafrican belt. *Tectonophysics*, 331, p. 1-18.

**Chauris L.** (1965) - Les minéralisations pneumatolytiques de Massif Armoricain. Mémoires du BRGM, 31, 252 p.

**Chauris L., Guigues J.** (1969) - Massif Armoricaïn – Gîtes minéraux de la France Vol.1, Mémoires du BRGM, 74, 69 p.

**Chauris L.** (1977) - Les associations paragénétiques dans la métallogénie varisque du Massif armoricaïn. Mineral. Deposita (Berl.), 12, p. 353-371.

**Chauris L.** (1979) - Les grandes lignes de la métallogénie normande. Bull. trim. Soc. Géol. Normandie et Amis Muséum Havre, France, LXVI, 4, 6 p.

**Cogné J.** (1974) - Le Massif armoricaïn - Zn. Géologie de la France. J. Debelmas Ed. Vol. 1, p. 105-161.

**Cojan I., Renard M.** (2006) - Sédimentologie – 2eédition, Éditions Dunod, Paris, 444 p.

**Durand C.** (2006) - Circulations fluides, transferts de matière et évolution minéralogique entre deux réservoirs à géochimie contrastée – Les septa carbonatés dans les granites du Quérigut (Pyrénées, France), (Thèse de doctorat – Université de Besançon), [en ligne]. [http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/13/44/63/PDF/Cyril\\_DURAND\\_-\\_These\\_-\\_2006\\_.pdf](http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/13/44/63/PDF/Cyril_DURAND_-_These_-_2006_.pdf)

**EDF, Sous-chapitre 2.5** – Géologie générale du site, synthèse géologique du granite de Flamanville commandée par EDF [en ligne]. <http://www.edf.fr/html/epr/rps/chap02/chap02-3.pdf> (consulté le 27/02/2010).

**Einaudi M.T., Burt D.M.** (1982) - A special issue devoted to skarn deposits – Introduction-Terminology, Classification, and Composition of Skarn Deposits. Economic Geology, 77, 4, p. 745-754.

**Eldursi K., Branquet Y., Guillou-Frottier L., Marcoux E.** (2009) - Numerical investigation of transient hydrothermal processes around intrusions: Heat-transfer and fluid-circulation controlled mineralization patterns. Earth and Planetary Science Letters, 288, p. 70-83.

**Graindor M.J.** (1998) - Carte géologique de la France au 1/50 000 – Feuille Cherbourg. Éditions BRGM.

**Grammatikopoulos T.A., Clark A.H.** (2006) - A comparative study of wollastonite skarn genesis in the Central Metasedimentary Belt, southeastern Ontario, Canada. Ore Geology Reviews, 29, p. 146-161.

**Jébrak M., Marcoux E.** (2008) - Géologie des ressources minérales. Editions Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, 668 p.

**Kornprobst J.** (2007) - Métamorphisme et roches métamorphiques – signification géodynamique – 3eédition. Editions Dunod, Paris, 235 p.

- Labotka T.C.** (1991) - Chemical and physical properties of fluids. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 26, 1, p. 43-104.
- Lingang X., Jingwen M., Fuquan Y., Hennig D., Jianmin Z.** (2010) - Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39, 5, p. 423-440.
- Meinert L.D.** (1982) - Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico. *Economic Geology*, 77, p. 919-949.
- Meinert L.D.** (1984) - Mineralogy and petrology of iron skarns in western British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 79, p. 869-882.
- Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S.** (2005) - World Skarn Deposits. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, p. 299-336.
- Mücke A., Farshad F. (2005)** - Whole-rock and mineralogical composition of Phanerozoic ooidal ironstones: Comparison and differentiation of types and subtypes. *Ore Geology Reviews*, 26, p. 227-262.
- Oggiano G., Mameli P.** (2006) - Diamictite and oolitic ironstones, a sedimentary association at Ordovician–Silurian transition in the north Gondwana margin: New evidence from the inner nappe of Sardinia Variscides (Italy). *Gondwana Research*, 9, p. 500-511.
- Olowe A.A., Rezel D., Génin J.M.R.** (1989) - Mechanism of formation of magnetite from ferrous hydroxide in aqueous corrosion processes. *Hyperfine Interactions*, 46, p. 429-436.
- Oyman T.** (2010) - Geochemistry, mineralogy and genesis of the Ayazmant Fe–Cu skarn deposit in Ayvalik, (Balıkesir), Turkey. *Ore Geology Reviews*, 37, 3-4, p. 175-201.
- Pitcher W.S.** (1983) - Granite type and tectonic environment, in: Hsu, K.(Ed.), *Mountain building process*, Academic Press, Londres, p. 19-40.
- Rose A.W., Herrick D.C., Deines P.** (1985) - An oxygen and sulfur isotope study of skarn-type magnetite deposits of the Cornwall type, Southeastern Pennsylvania. *Economic Geology*, 80, p. 418-443.
- Sangster D.F.** (1969) - The contact metasomatic magnetite deposits of Southwestern British Columbia. *Geological survey of Canada*, 172, Ottawa, 45 p.
- Sturesson U.** (1995) - Llanvirnian (Ord.) iron ooids in Baltoscandia: element mobility, REE distribution patterns, and origin of the REE. *Chemical Geology*, 125, p. 45-60.

**Sturesson U., Dronov A., Saadre T.** (1999) - Lower Ordovician iron ooids and associated oolitic clays in Russia and Estonia: a clue to the origin of iron oolites? *Sedimentary Geology*, 123, p. 63-80.

**Ushida E., Iiyama J.T.** (1982) - Physico-chemical study of skarn formation in the Shinyama iron-copper ore deposit of the Kamaishi mine, Northeastern Japan. *Economic Geology*, 77, p. 809-822.

**Vatan A.** (1967) - Manuel de sédimentologie. Éditions Technip, Paris, 397 p.

**Vaughan D.J., Craig J.R.** (1978) - Mineral chemistry of metal sulfides. Cambridge University Press, États-Unis, 493 p.

**Wynkler H.G.F.** (1976) - Petrogenesis of metamorphic rocks – Fourth edition, Springer-Verlag, New-York, 334 p.

**Young T.P.** (1989) - Phanerozoic ironstones: an introduction and review. In: Young, T.P. et Taylor, W.E.G., 1989. *Phanerozoic Ironstones*, Geological Society Special Publication, 46, p. 9-25.

#### **Detailed Mineral List:**

[① Epidote](#)

**Formula:**  $(CaCa)(AlAlFe^{3+})O[Si_2O_7][SiO_4](OH)$

#### **References:**

[\*\*Belot, Victor R. \(1978\) \*Guide des minéraux, coquillages et fossiles: où les trouver en France, comment les reconnaître et les collectionner. Guides Horay.\*\*\*](#)

[① Grossular](#)

**Formula:**  $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$

[① Hematite](#)

**Formula:**  $Fe_2O_3$

[① Ilmenite](#)

**Formula:**  $Fe^{2+}TiO_3$

#### **References:**

[Belot, Victor R. \(1978\) Guide des minéraux, coquillages et fossiles: où les trouver en France, comment les reconnaître et les collectionner. Guides Horay.](#)

## ① Magnetite

**Formula:**  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$

**References:**

[Belot, Victor R. \(1978\) Guide des minéraux, coquillages et fossiles: où les trouver en France, comment les reconnaître et les collectionner. Guides Horay.](#)

## ① Marcasite

**Formula:**  $\text{FeS}_2$

**References:**

[Belot, Victor R. \(1978\) Guide des minéraux, coquillages et fossiles: où les trouver en France, comment les reconnaître et les collectionner. Guides Horay.](#)

## ① 'Mica Group'

**References:**

[Belot, Victor R. \(1978\) Guide des minéraux, coquillages et fossiles: où les trouver en France, comment les reconnaître et les collectionner. Guides Horay.](#)

## ① Molybdenite

**Formula:**  $\text{MoS}_2$

## ① Native Gold

**Formula:** Au

**References:**

[www.ifrance.com](http://www.ifrance.com) (n.d.)

<http://www.ifrance.com/orpailage/repertoire/lieux.htm>

## [① Pyrite](#)

**Formula:** FeS<sub>2</sub>

**References:**

[Belot, Victor R. \(1978\) \*Guide des minéraux, coquillages et fossiles: où les trouver en France, comment les reconnaître et les collectionner.\* Guides Horay.](#)

## [① Pyrrhotite](#)

**Formula:** Fe<sub>1-x</sub>S

**References:**

[Belot, Victor R. \(1978\) \*Guide des minéraux, coquillages et fossiles: où les trouver en France, comment les reconnaître et les collectionner.\* Guides Horay.](#)

## [① Rutile](#)

**Formula:** TiO<sub>2</sub>

**References:**

[Belot, Victor R. \(1978\) \*Guide des minéraux, coquillages et fossiles: où les trouver en France, comment les reconnaître et les collectionner.\* Guides Horay.](#)

## [① Scheelite](#)

**Formula:** Ca(WO<sub>4</sub>)