

R ✓

RP - 50396

DOCUMENT PUBLIC

Mémento roches et minéraux industriels

L'olivine et la dunite

décembre 2000
BRGM/RP-50396-FR



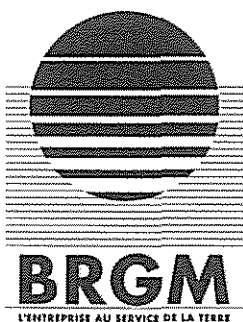
DOCUMENT PUBLIC

Mémento roches et minéraux industriels

L'olivine et la dunité

P.M. Thibaut

décembre 2000
BRGM/RP-50396-FR



Mots clés : Olivine, Dunite, Péridotite, Forstérite, Fayalite, Fondant, Lherzolite, Serpentine, Wehrlite, Harzburgite, Cortlandite, Kimberlite, Sidérurgie, Fonderie, Réfractaire, Abrasif.

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

Thibaut P.M. (2000) – Mémento roches et minéraux industriels : l'olivine et la dunite. Rapp. BRGM RP-50396-FR, 63 p., 8 fig., 21 tabl.

Sommaire

1. DÉFINITION ET PROPRIÉTÉS FONDAMENTALES	7
1.1. DÉFINITION	7
1.2. PROPRIÉTÉS FONDAMENTALES	8
2. GÉOLOGIE ET GISEMENTS	9
2.1. DESCRIPTION MINÉRALOGIQUE	9
2.2. ALTERATIONS	9
2.3. MODES DE GISEMENT	10
2.3.1. Roches magmatiques	10
2.3.2. Roches métamorphiques	12
2.3.3. Gîtes particuliers	12
2.4. MÉTHODES DE PROSPECTION DES GISEMENTS ET DE CARACTÉRISATION DES MINÉRAIS	13
2.4.1. Méthodes de prospection des gisements	13
2.4.2. Caractérisation des minerais et évaluation des gisements	13
2.5. MÉTHODES D'EXPLOITATION ET DE TRAITEMENT	14
3. UTILISATION ET SPÉCIFICATIONS INDUSTRIELLES	17
3.1. DONNÉES GÉNÉRALES	17
3.2. UTILISATION DE L'OLIVINE DANS LA SIDERURGIE	19
3.2.1. Fabrication de la fonte	19
3.2.2. Spécifications industrielles	22
3.3. UTILISATION DE L'OLIVINE DANS LA FONDERIE	23
3.3.1. Fabrication des moules de fonderie	23
3.3.2. Spécifications industrielles	24
3.4. UTILISATION DE L'OLIVINE DANS LES REFRACTAIRES	25
3.4.1. Fabrication des réfractaires	25
3.4.2. Spécifications industrielles	26
3.5. UTILISATION DE L'OLIVINE COMME ABRASIF DE SABLAGE ET DE DECOUPE AU JET D'EAU	26
3.5.1. Propriétés et applications industrielles	26
3.5.2. Spécifications industrielles	27
3.6. AUTRES UTILISATIONS	29

4. PANORAMA MONDIAL DE LA PRODUCTION D'OLIVINE/DUNITÉ	31
4.1. DONNEES GENERALES	31
4.2. PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS	32
4.2.1. Norvège	32
4.2.2. Japon	34
4.2.3. Espagne	37
4.2.4. USA	38
4.2.5. Italie	42
4.2.6. Autriche	44
4.2.7. Mexique	45
4.2.8. Pakistan	45
4.2.9. Suède	45
4.2.10. Inde	46
4.2.11. Canada	47
4.2.12. Chine	47
4.2.13. Pays de la CIS	47
4.2.14. Yougoslavie	48
4.2.15. Autres gisements	48
4.3. PERIDOTS DE QUALITE GEMME	48
5. PANORAMA FRANÇAIS DES RESSOURCES POTENTIELLES ET DE LA CONSOMMATION D'OLIVINE/DUNITÉ	49
5.1. RESSOURCES POTENTIELLES EN FRANCE	49
5.1.1. Corse	49
5.1.2. Pyrénées	52
5.1.3. Massif Central	52
5.2. APPROVISIONNEMENT DE LA FRANCE EN OLIVINE	54
6. COÛTS	57
7. PRODUITS DE SUBSTITUTION	59
BIBLIOGRAPHIE	61

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Composition chimique de différentes olivines commercialisées.....	7
Tabl. 2 - Classification des roches du groupe des péridotites	11
Tabl. 3 – Estimation de la répartition de la consommation d'olivine/dunite dans le monde en 1990	17
Tab. 4 – Estimation de la répartition de la consommation d'olivine/dunite dans le monde en 1994.....	18
Tabl. 5 – Caractéristiques chimiques et physiques des pellets à magnétite et olivine fabriquées par le groupe suédois LKAB.....	21
Tabl. 6 – Fourchettes granulométriques de quelques qualités commerciales d'olivines utilisées pour sablage.....	28
Tabl. 7 – Composition chimique des olivines de sablage fabriquées par Scangrit (UK) à partir d'olivines norvégiennes	28
Tabl. 8 – Estimation de la production mondiale d'olivine en 1997.....	31
Tabl. 9 – Composition chimique de trois olivines commerciales norvégiennes.....	34
Tabl. 10 – Estimation de la répartition de la consommation d'olivine/dunite/serpentine au Japon en 1987	35
Tabl. 11 – Composition chimique des olivines commercialisées par le Japon	36
Tabl. 12 – Différentes qualités d'olivine produites au Japon.....	37
Tabl. 13 – Composition chimique de la dunite espagnole.....	38
Tabl. 14 – Consommation d'olivine en Amérique du Nord	41
Tabl. 15 – Composition chimique des olivines des USA.....	42
Tabl. 16 – Estimation de la consommation d'olivine en Italie	43
Tabl. 17 – Composition chimique de l'olivine italienne	44
Tabl. 18 – Composition chimique de l'olivine autrichienne.....	45
Tabl. 19 – Composition chimique de l'olivine suédoise.....	46
Tabl. 20 – Principales caractéristiques des lherzolites des Pyrénées.....	52
Tabl. 21 – Evolution des importations en France des substances minérales regroupées sous la rubrique douanière 25 17 49 00, en provenance de Norvège, dont tout ou partie pourrait correspondre à de l'olivine/dunite	54

Liste des figures

Fig. 1 – Répartition de la consommation mondiale d'olivine en 1994.....	18
Fig. 2 – Principaux pays producteurs d'olivine	32
Fig. 3 – Estimation de la consommation d'olivines/dunite/serpentine au Japon en 1987	35
Fig. 4 – Localisation des principaux gisements d'olivine dans les états de Washington et de la Caroline du Nord, aux Etats-Unis.....	39
Fig. 5 – Répartition de la consommation d'olivine en Amérique du Nord	41
Fig. 6 – Répartition de la consommation d'olivine en Italie	43
Fig. 7 – Provinces péridotiques en France	50
Fig. 8 – Massif de péridotite du Monte Maggiore, Corse	51

1. Définition et propriétés fondamentales

1.1. DEFINITION

Le terme "olivine" a été utilisé pour la première fois par J. Werner en 1790 pour désigner le minéral du même nom, en raison de sa couleur vert olive.

On désigne sous le nom d'olivines ou périclites un groupe de minéraux dont la composition est celle d'un silicate de magnésium et de fer, qui appartiennent à une solution solide continue dont les termes extrêmes sont la forstérite, pôle magnésien de composition $Mg_2 SiO_4$, et la fayalite, pôle ferreux de composition $Fe_2 SiO_4$. Entre ces deux pôles, la composition chimique des olivines est très variable, la magnésie et le fer pouvant se remplacer en toutes proportions. Le ratio Mg/Fe varie de 16/1 pour la forstérite à 2/1 pour la fayalite. Globalement, la composition chimique de l'olivine peut s'écrire $(Mg, Fe)_2 SiO_4$.

La composition chimique de quelques olivines commercialisées est donnée dans le tableau 1.

	Norvège dunite	Norvège (A/S Olivin)		Autriche (Magnolithe)	Italie (Nuova Cives)	Suède (Handöl)	USA Etat de Washington (Olivine Corp.)	USA Etat de Caroline du Nord (Unimin)	Japon (Toho)
		qualité standard	qualité réfractaire						
MgO	47-51	48-50	49-51	49-51	41-43	46	49.4	50.5	max. 47
SiO ₂	41-43	42-43	41.5-42.5	39-41	42-44	41	41.2	40.1	min. 42
Fe ₂ O ₃	6.5-7.7	6.8-7.3	6.5-7.0	8-9	1.2-2.7	8.2	7.1	6.7	2
Al ₂ O ₃	0.5-1.0	0.5-0.8	0.4-0.5						
CaO	0.05-0.06	0.05-0.1	0.05-0.1	0.4 max.	1.5-2.6	0.8	0.2	0.2	0.4
Oxydes*				NA	NA	2	1.8	1	max. 8.5
PF	0.2-1.5	0.7-1.5	0.2-0.5	NA	NA	1.8	0.7	0.7	max. 2.5

*Al₂O₃, TiO₂, MnO, Cr₂O₃, NiO, CaO, K₂O, Na₂O.

Source : Harben, 1999.

Tabl. 1 - Composition chimique de différentes olivines commercialisées.

Ce sont des minéraux caractéristiques des roches éruptives basiques et ultrabasiques (périclites, gabbros, basaltes) et ce sont les principaux minéraux constitutifs des dunites. Plus accessoirement, on les rencontre comme minéraux de métamorphisme de certaines roches sédimentaires silico-magnésiennes (dolomies).

Bien que la définition géologique classique d'une dunite corresponde à une roche composée d'au moins 90 % d'olivine, l'utilisation commerciale des termes "olivine" et "dunite" est le résultat de définitions plus spécifiques. En effet, commercialement, le

terme "olivine" désigne un matériau correspondant à un minimum de 85 % de forstérite, contenant 45 à 50 % de MgO, 39 à 42 % de SiO₂, 5 à 8 % de Fe₂O₃, avec une perte au feu de 1 à 2 %. Le terme "dunite" désigne une roche contenant 36 à 45 % de MgO, 36 à 39 % de SiO₂, avec une perte au feu d'environ 10 % (*Teague, 1983*).

1.2. PROPRIETES FONDAMENTALES

La propriété la plus importante de l'olivine est sa teneur en magnésie qui peut atteindre 51 %, d'où son utilisation comme fondant magnésien. Avec une température de frittage de 1 450°C et une température de fusion de 1 665-1 743°C (l'olivine pure fond à 1 910°C), l'olivine présente d'excellentes qualités réfractaires. En outre, elle a un coefficient d'expansion thermique faible et uniforme, d'environ 1,1 % jusqu'à 1 200°C et une bonne résistance au choc thermique.

L'olivine est inerte, elle contient moins de 1 % de silice libre, elle a une dureté assez élevée (6,5-7 sur l'échelle de Mohs), une densité de 3,27 à 3,37 et une cassure conchoïdale, toutes ces propriétés étant mises à profit dans son utilisation comme abrasif de sablage et pour la découpe au jet d'eau sous pression.

Sa poussière est incolore ou claire, ce qui permet son utilisation comme charge minérale.

2. Géologie et gisements

2.1. DESCRIPTION MINÉRALOGIQUE

On désigne sous le nom générique d'olivine ou de périclote un groupe de minéraux appartenant à une solution solide dont les termes extrêmes sont : la forstérite ($\text{Mg}_2 \text{SiO}_4$) et la fayalite ($\text{Fe}_2 \text{SiO}_4$). Ils cristallisent dans le système orthorhombique. La structure est constituée par un empilement pratiquement hexagonal compact d'atomes d'oxygène ; les atomes de Si occupent les sites tétraédriques et ceux de Mg ou de Fe les sites octaédriques.

Les olivines présentent souvent un léger remplacement de (Mg, Fe) par Mn et Ca, ainsi que par des traces de Cr et Ni, surtout dans les termes riches en magnésium. La présence éventuelle de Fe^{3+} est principalement due à une oxydation, conséquence de l'altération.

Les beaux cristaux sont rares et ont été exploités comme gemme dès l'Antiquité dans les veines d'une périclote serpentinisée de l'île de Zebirget (Mer Rouge). Ils sont utilisés en joaillerie sous le nom de chrysolite : cristaux d'un beau jaune-vert, aplatis et striés, sans clivage, mais il existe un plan de séparation.

L'olivine commune est grenue, les grains étant généralement arrondis. La cassure des grains est conchoïdale, avec un éclat huileux. La couleur est jaune verdâtre à verte. Les forstérites pures peuvent être incolores et transparentes tandis que les fayalites sont de couleur brune à noire.

2.2. ALTERATIONS

Étant formées à haute température et en l'absence d'eau, les olivines sont des minéraux très sensibles aux agents d'altération. L'altération classique en serpentine se propageant le long des fractures est la plus commune, la serpentine pouvant se présenter sous deux faciès : un faciès aciculaire ou fibreux qui est celui du chrysotile, et un faciès phylliteux qui est celui de l'antigorite. Les périclotes – roches ultrabasiques constituées en grande partie d'olivine – sont donc souvent transformées, totalement ou partiellement, en serpentine. L'altération en chlorite est également fréquente, tandis que l'altération en amphibole (pélite) l'est moins.

Plusieurs mécanismes géologiques peuvent conduire à la serpentinisation. Celle-ci peut être rapportée à l'altération superficielle, mais il s'agit là d'un processus d'une importance subsidiaire, les cristaux d'olivine des basaltes résistant fort bien à l'altération due aux agents météoriques. L'hypothèse d'une auto-hydrolyse qui se serait produite vers la fin de la cristallisation du magma a également été évoquée. Le fait le plus certain est que la serpentinisation est toujours activée par un léger dynamo-métamorphisme ; c'est le cas, par exemple, pour les périclotes des ophiolites alpines qui sont généralement serpentinisées.

Postérieurement à la serpentinisation et sous une influence hydrothermale conditionnée par la présence de CO_2 , il peut y avoir formation de talc ou de magnésite, ceci aboutissant souvent à des gisements industriels (Oural, Autriche). Communément, l'altération atmosphérique de l'olivine aboutit à une coloration rougeâtre due à la libération d'oxydes ferriques associés à de la silice amorphe et à de la magnésite : c'est l'iddingsite. Du point de vue industriel, il faut insister sur la concentration, lors de l'altération atmosphérique, du nickel substitué isomorphiquement au magnésium, ceci sous forme d'antigorite nickélifère (garniérite) et parfois de sépiolite nickélifère (gîtes de type Nouvelle Calédonie).

A noter que l'hortonolite, variété manganésifère de l'olivine (Mg, Mn, Fe SiO_4) comprenant entre 50 et 70 % de $\text{Fe}_2 \text{SiO}_4$, qui est un élément caractéristique des dunites, est réfractaire à la serpentinisation. Elle persiste donc aux affleurements de dunite.

2.3. MODES DE GISEMENT

Minéral typique de haute température et d'origine profonde, se formant dans les roches sans quartz à déficit de SiO_2 , et en l'absence d'eau, l'olivine est un minéral commun des roches magmatiques ultrabasiques (péridotite) et basiques (gabbro, basalte, dolérite, pyroxénite) et un minéral accessoire des roches métamorphiques basiques, plus rarement de certains granites.

2.3.1. Roches magmatiques

Actuellement, les seuls gisements économiques en olivine sont d'origine magmatique et sont essentiellement limités à la dunite, une des variétés de roches du groupe des péridotites parmi l'ensemble des roches magmatiques ultrabasiques.

Les péridotites sont des roches grenues, jaune sombre huileux ou plus souvent vert noirâtre, holomélanocrates, avec 90 à 100 % de minéraux ferromagnésiens, avec olivine dominante accompagnée de pyroxène et de spinelle (picotite, chromite), et parfois d'amphibole brune, de biotite et de grenat. La dunite est une péridotite constituée de 90 % ou plus d'olivine, les autres types étant constitués de 40 à 90 % d'olivine et d'autres minéraux ferromagnésiens, comme l'indique la classification du tableau 2.

Les péridotites sont fréquemment altérées par serpentinisation ; elles contiennent des minéralisations en Cr, Ni, Co, Pt, et parfois des diamants (kimberlites).

Nature pétrographique	Composition minéralogique
Dunite	Olivine ($\geq 90 \%$)
Wehrlite	Olivine, diallage ou diopside
Harzburgite	Olivine, hypersthène
Lherzolite	Olivine, clinopyroxène, hypersthène
Cortlandite	Olivine, pyroxène, amphibole brune
Kimberlite	Olivine, pyroxène, biotite

Tabl. 2 - Classification des roches du groupe des péridotites.

Les péridotites apparaissent dans l'écorce terrestre en gîtes dont les types peuvent être classés en un nombre restreint de catégories :

- dans la base d'intrusions lenticulaires puissantes et étendues (plusieurs milliers de km^2), généralement très différenciées et riches en concentrations métalliques, sous forme de péridotites à cumulats, associées à des pyroxénolites et surmontées de gabbros, d'anorthosites et parfois de granitoïdes. Leur âge peut aller du Précambrien au Tertiaire. Type : Sudbury, Bushveld ;
- à la base des complexes ophiolitiques, sous forme de péridotites foliées et sous forme de péridotites litées à cumulats (surtout dunites et harzburgites). La foliation des péridotites peut être liée aux déformations mécaniques qu'elles ont subies, mais dans bien des cas on admet qu'elle résulte du fluage du magma partiellement cristallisé lors de sa mise en place, avant sa cristallisation complète. Ces chapelets d'intrusions plutoniques accompagnent les zones orogéniques. Elles sont très répandues dans les chaînes alpines (on parle couramment de péridotites "de type alpin") où elles sont incluses dans les terrains sédimentaires ou faiblement métamorphiques. On admet généralement que leur mise en place est contemporaine de la phase géosynclinale par laquelle débute un cycle orogénique. Types : massifs des roches vertes des Alpes, des Balkans, d'Anatolie... ;
- en massifs ou noyaux tectonisés de lherzolite à filons de pyroxénolites, d'étendue beaucoup plus faible que dans les gîtes précédents, et ayant subi un métamorphisme à haute pression et haute température, inclus dans des roches métamorphiques du faciès granulite ou dans des granites. Ce mode de gisement se rencontre dans tous les môles cristallins anciens profondément érodés : Ecosse, Inde...

Les gisements de valeur commerciale correspondent uniquement aux deux premiers types de gîtes : type alpin et dunites zonées. On considère actuellement que le manteau supérieur, sous la croûte terrestre, est essentiellement constitué de péridotite ou de roche

très voisine ("péridotite primaire" ou pyrolite) qui, par fusion partielle, ségrégation et migration dans la croûte terrestre à partir de failles profondes, donne les divers types de péridotites, ainsi que les magmas basaltiques.

L'olivine est également présente dans d'autres types de roches magmatiques, mais à des teneurs ou dans des volumes non économiques :

- c'est un minéral caractéristique des basaltes, notamment dans les océanites : basaltes mélanocrates porphyriques à phénocristaux d'olivine (dominante) et d'augite. Des nodules de péridotites à contours anguleux ou arrondis, dont la taille varie de quelques millimètres à plus de 1 m, dans lesquels l'olivine est souvent associée au spinelle chromifère, au chrome-diopside, à l'enstatite, etc..., sont ramenés de la profondeur par les basaltes (exemple : rift des Causses). Ces nodules sont parfois disséminés au sein des coulées de lave ou présents dans les produits de projection, au cœur des bombes volcaniques ;
- l'olivine est également présente dans certains gabbros (troctolite), dolérites, pyroxénites, et elle est parfois disséminée dans les lamprophyres (kersantite et minette) ;
- bien que la présence de l'olivine ne soit pas compatible avec celle du quartz, les deux minéraux réagissant pour donner un pyroxène, il existe cependant des granites à fayalite, mais ils sont très rares.

2.3.2. Roches métamorphiques

L'olivine magnésienne peut être commune dans les calcaires dolomitiques impurs ayant subi un métamorphisme thermique ; les cristaux sont parfois enveloppés d'une couronne de diopside, comme c'est le cas dans le gîte de Sar-e-Sang, en Afghanistan (*Bariand, Cesbron et Geffroy, 1977*). Des exemples de gîtes de péridotites ou de serpentines provenant du métamorphisme de sédiments carbonatés dolomitiques ont été décrits en Amérique et en Afrique du Nord, mais ils ne présentent pas de valeur commerciale.

2.3.3. Gîtes particuliers

A titre anecdotique, on peut signaler que les météorites renferment également de l'olivine, de même que les scories d'affinage du fer qui contiennent de la fayalite.

2.4. METHODES DE PROSPECTION DES GISEMENTS ET DE CARACTERISATION DES MINERAIS

2.4.1. Méthodes de prospection des gisements

La prospection des gisements d'olivine/dunite est facilitée par le fait que la roche affleure généralement sous forme de crête ou de dôme. Les formations de sol qui dérivent de l'altération superficielle des dunites supportent une végétation souvent très limitée, beaucoup de gisements présentant une surface presque nue.

Dans un premier temps, la prospection d'un gisement d'olivine doit faire l'objet d'une reconnaissance technique superficielle très minutieuse, suivie d'une cartographie topographique et géologique détaillée. Les différents faciès de dunites apparaissant dans le gisement doivent être échantillonnés en vue d'analyses pétrographiques et chimiques. En particulier, la taille du grain de la roche, la présence de produits d'altération et la distribution des impuretés doivent être notées, à la fois à l'échelle des échantillons et sur l'ensemble du gisement. Dans les zones de recouvrement, le creusement de tranchées permettra de déterminer si le bed-rock est constitué ou non de dunite.

Dans un deuxième temps, une fois que l'extension superficielle du gisement est bien établie, son homogénéité en profondeur doit être vérifiée par des sondages. Les carottages sont souvent difficiles à réaliser, en raison de la densité de fracturation des gisements et de la présence de zones altérées beaucoup plus tendres que la dunite. On préfère donc effectuer des sondages par percussion, notamment par la méthode dite "marteau fond de trou", avec récupération continue des cuttings.

2.4.2. Caractérisation des minerais et évaluation des gisements

D'une manière générale, on considère qu'une olivine de qualité commerciale doit renfermer plus de 40 % MgO avant traitement.

Dans le cas des gisements d'olivine relativement purs, l'évaluation de la qualité du minerai peut se faire par concassage à sec, suivi d'une analyse granulométrique, et d'analyses chimiques et pétrographiques des différentes fractions granulométriques. Les caractéristiques réfractaires doivent également être déterminées sur ces différentes fractions.

Les échantillons qui renferment davantage d'impuretés peuvent être évalués par concassage à une granulométrie permettant la libération de ces dernières et l'évaluation de la seule olivine pure. La méthode de laboratoire la plus adaptée pour la séparation des impuretés de l'olivine est l'utilisation des liqueurs denses. La plupart des impuretés associées à l'olivine dans le minerai flottent à la surface d'une liqueur d'une densité

d'environ 3,0, tandis que l'olivine et la chromite éventuellement accessoire coulent au fond du récipient. Dans la mesure où une libération complète des impuretés est obtenue par broyage, avant séparation par liqueur dense, l'olivine récupérée doit ensuite être caractérisée suivant les mêmes méthodes que celles indiquées ci-dessus pour les minerais plus purs. Dans le cas de ces gisements dont les minerais nécessitent un traitement préalable pour la production d'un concentré d'olivine, ils doivent renfermer au moins 65 % de produit récupérable pour être considérés de qualité commerciale.

La plupart des minéraux accessoires associés à l'olivine diminuent ses propriétés réfractaires. Par exemple, la serpentine, la chlorite et la vermiculite contiennent 12 à 17 % d'eau de cristallisation. A moins de les éliminer du minerai d'olivine, ils entraîneront une augmentation de la perte au feu du produit. En outre, les minéraux micacés tels que la chlorite et la vermiculite donnent lieu à des explosions sous l'effet d'un choc thermique. Leur présence est donc rédhibitoire. De même, les sables d'olivine destinés au revêtement doivent renfermer une quantité minimale de minéraux plats (micas) en raison de leur rapport superficie/poids (*Teague, 1983*).

2.5. METHODES D'EXPLOITATION ET DE TRAITEMENT

Dans la grande majorité des cas, l'olivine/dunite est exploitée en carrière à ciel ouvert, à l'exception de l'exploitation en mine souterraine, par chambres et piliers, à Briggja, en Norvège.

Dans les exploitations à ciel ouvert, la hauteur des gradins peut varier de 3 à 9 m, en fonction de la dureté de l'olivine et de l'extension des fractures et des diaclases dans le gisement. Dans la plupart des carrières, le recours à l'explosif est nécessaire. Cependant, en fonction de la dureté et du degré d'altération de la roche, quelques gisements peuvent être exploités par simple ripage.

Dans le cas de l'abattage à l'explosif, les trous sont couramment forés suivant une maille de 1 à 2 m, entraînant généralement une bonne fragmentation de la roche. Parfois, un pétardage secondaire de certains blocs est nécessaire. Les charges d'explosif utilisées sont souvent relativement faibles, pour une production de minerai de moins de 10 000 t. Néanmoins, la consommation d'explosif par tonne d'olivine est relativement importante, une grande partie de la force brisante étant dissipée dans les fractures et les diaclases du gisement.

Le minerai abattu, en fragments de dimensions inférieures à 0,5 m, est ensuite chargé sur camions à l'aide de chargeurs ou de pelles hydrauliques, puis transporté jusqu'au concasseur primaire à mâchoires ou à cône, situé soit sur le site d'exploitation, soit à l'usine de traitement. Ce concassage primaire réduit le minerai à – 40 mm. A ce stade, en fonction du degré d'altération de la roche et de la qualité du produit souhaitée, les fines de moins de 6 mm peuvent être éliminées par criblage. Le matériau altéré étant plus friable que les grains d'olivine, on le retrouve en abondance dans les fines produites par ce concassage primaire.

La fraction de - 40 mm peut subir un traitement ultérieur en usine ou être tamisée pour donner un produit commercial de - 40 + 10 mm.

Lorsqu'un traitement secondaire en usine est nécessaire pour obtenir des granulométries plus fines, le matériau est d'abord réduit à l'aide de concasseurs à cône ou à impact, puis de broyeurs à cylindres ou à boulets. Il est ensuite tamisé.

Partout où c'est possible, ce traitement est réalisé par voie sèche ; c'est le cas notamment dans les usines d'Aimcor dans les états de Washington et de l'Indiana aux Etats-Unis, et dans les installations de A/S Olivin et de North Cape Minerals A/S en Norvège.

Dans quelques cas, le traitement par voie humide est nécessaire pour obtenir un produit de qualité désirée, en raison de la teneur en impuretés de la roche. C'est le cas, par exemple, en Caroline du Nord où Aimcor utilise la voie humide et la séparation par gravité.

En Autriche, Magnolithe GmbH calcine la dunite dans des fours rotatifs à 1 650°C pour obtenir des olivines de haute qualité destinées à des utilisations dans les réfractaires et en fonderie.

En Inde, Dalmia Magnesite Corporation récupère la dunite comme sous-produit de la production de magnésite. La dunite constitue la roche mère de la magnésite dans un gisement dont le rapport est de 10 pour 1 dunite/magnésite (*Henning, 1994*).

3. Utilisation et spécifications industrielles

3.1. DONNEES GENERALES

A travers le monde, l'olivine/dunite trouve différentes applications dans l'industrie, en premier lieu dans la sidérurgie pour la fabrication de fonte et d'acier, dans la construction pour la fabrication de granulats et de ballast, la fabrication de réfractaires, en tant que sable de fonderie, comme charge pour les produits bitumineux, comme abrasif, amendement, pour la fabrication de carreaux de couverture, pour la filtration de l'eau, la construction de fours à lit fluidifiant...

On estime que près de 80 % de l'olivine/dunite consommée dans le monde est utilisée directement ou indirectement pour la production et la transformation des métaux.

Une estimation de la consommation mondiale d'olivine/dunite en 1990, par type d'utilisation, est donnée dans le tableau 3 (*d'après Henning, 1994*) :

Utilisation	Milliers de tonnes
Fondant de haut fourneau	4 165
Granulats pour la construction/ballast	1 015
Produits réfractaires	262
Sable de fonderie	221
Charge pour asphalte	143
Pelletisation du minerai de fer	125
Abrasif	114
Amendement	31
Carreaux de couverture	23
Divers	20
TOTAL	6 119

Tabl. 3 – Estimation de la répartition de la consommation d'olivine/dunite dans le monde en 1990.

En 1994, cette consommation mondiale d'olivine/dunite aurait régressé à environ 5,5 Mt (*Harben, 1999, d'après Henning, 1994*). La répartition des principales utilisations correspondantes est donnée dans le tableau 4 et la figure 1.

Utilisation	Milliers de tonnes
Conditionneur de laitier	3 800
Construction/ballast	800
Sable de fonderie	200
Réfractaires	250
Charge pour asphalte	150
Pellets de minerai de fer	120
Abrasifs	120
Autres*	60
TOTAL	5 500

*correspondent à fertilisants et tuiles.

Source : Harben, 1999, d'après Henning, 1994.

Tabl. 4 – Estimation de la répartition de la consommation d'olivine/dunité dans le monde en 1994.

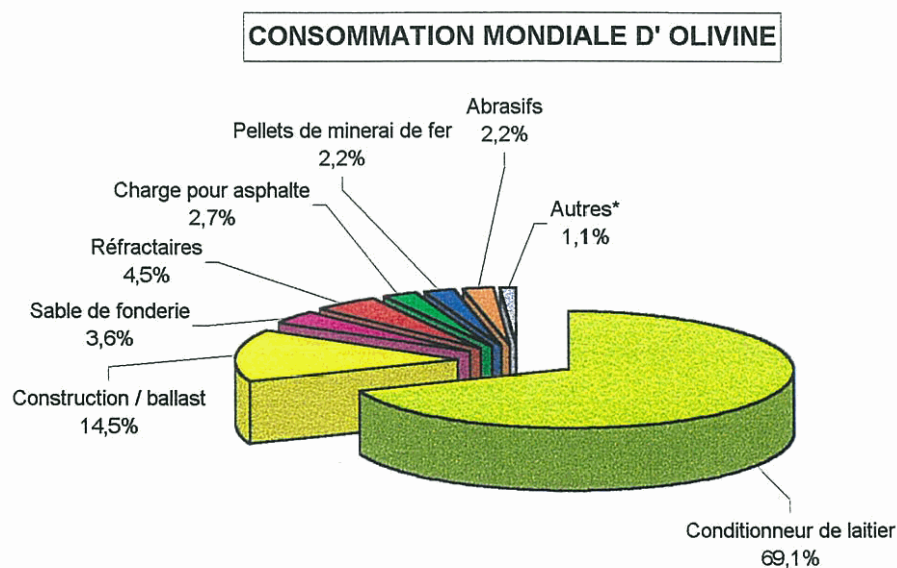


Fig. 1 – Répartition de la consommation mondiale d'olivine en 1994.

En France, l'essentiel de l'olivine est utilisé dans la sidérurgie (hauts fourneaux), puis par ordre d'importance décroissant : comme sable de fonderie, pour la fabrication de réfractaires, pour la découpe au jet d'eau sous pression et comme abrasif de sablage.

3.2. UTILISATION DE L'OLIVINE DANS LA SIDERURGIE

3.2.1. Fabrication de la fonte

L'olivine est principalement utilisée comme fondant (conditionneur de laitier) en sidérurgie pour l'élaboration de la fonte dans les hauts fourneaux. Elle est également utilisée comme fondant dans les fours à arc électrique, dans lesquels elle est ajoutée au laitier pour contrôler la basicité du mélange en fusion et prévenir l'attaque du revêtement réfractaire par le laitier.

L'ensemble de la sidérurgie mondiale consomme environ 4 Mt/an d'olivine, soit environ 75 % de la production mondiale.

L'olivine pure fond à 1 910°C, mais avec l'ensemble des substances minérales introduites dans le haut fourneau, elle permet la fusion globale à 1 450°C en donnant un laitier fluide, moins visqueux et moins abondant qu'avec le calcaire ou la dolomie (les anglo-saxons qualifient cette propriété par le terme de "slag conditioner").

En France, les hauts fourneaux sont alimentés par du minerai de fer se présentant sous diverses formes :

- agglomérés : 1 100 kg,
- pellets : 200 kg,
- fragments de minerai > 20 mm : 200 kg.

L'olivine est elle-même additionnée au minerai de fer sous ces trois formes : dans les agglomérés, dans les pellets, et sous forme de fragments introduits directement dans le four.

L'olivine est surtout utilisée dans la fabrication des agglomérés sur grille, dont la composition est la suivante :

- minerai de fer ($\varnothing$ 0,5 – 3 mm),
- fines de coke (poussières),
- dolomie ou calcaire, et chaux fine (< 3 mm),
- olivine (0,5 – 1 mm ou 3 – 6 mm, suivant les sources d'information).

Des boulettes auto fondantes (pellets) contenant 3 % d'olivine sont également utilisées. Par rapport aux boulettes siliceuses, celles à l'olivine permettent une économie de combustible (464 kg à la tonne de métal contre 521 kg) et limitent la production de scories (145 kg à la tonne de métal au lieu de 276 kg), d'après la société LKAB (Suède), 1987.

Dans certains pays, la sidérurgie utilise également de la péridotite en fragments de 10 – 40 mm, dont 60 % > 20 mm, introduite directement dans le haut fourneau. Dans ce cas, la péridotite remplace en partie le calcaire et la dolomie utilisés comme charge pour la réduction du minerai de fer.

La haute teneur en magnésie de l'olivine (45 – 49 % MgO), ainsi que certaines de ses autres propriétés par rapport à la dolomie (20 – 22 % MgO) présentent les avantages suivants :

- elle réduit la circulation d'alkalis dans le four en formant des silicates alcalins et magnésiens, qui sont stables aux températures du haut fourneau ;
- en raison de sa température de réaction plus élevée, l'olivine réduit les éclatements à basse température et, de ce fait, maintient une bonne perméabilité des substances enfournées, tout en réduisant la consommation de coke ;
- sa haute teneur en magnésie permet de l'utiliser en moindre quantité qu'avec la dolomie, pour atteindre une teneur spécifique en magnésie ; en outre, le ratio MgO/SiO_2 de l'olivine permet d'augmenter cette teneur en magnésie sans changer la basicité du laitier ;
- en raison de sa faible perte au feu (0,6 – 2,5 %), elle permet une économie d'énergie, celle-ci n'étant pas consommée pour partie pour l'élimination du dioxyde de carbone, dans le cas de l'utilisation de la dolomie, ou de l'eau, dans le cas de la serpentine ; dans ce cadre, l'utilisation de l'olivine contribue à diminuer les rejets de CO_2 dans l'atmosphère ;
- elle augmente la capacité d'agglomération des constituants d'environ 10 à 15 %, car elle abaisse la température de frittage d'environ 100°C, et produit un aggloméré plus résistant à l'écrasement et lors de sa chute dans le haut fourneau, ce qui génère moins de fines à recycler ;
- les pellets de minerai de fer avec de l'olivine gonflent moins, se réduisent plus rapidement et présentent une plage de fusion plus étroite, l'ensemble contribuant à l'abaissement des coûts de fusion. Néanmoins, l'ajout d'olivine lors de la fabrication des pellets est limité aux minerais de fer à faible teneur en silice. L'olivine contenant elle-même de la silice (environ 40 – 44 %), l'utilisation de minerais de fer à forte teneur en silice entraînerait une formation excessive de laitier. Actuellement, deux sociétés seulement fabriquent des pellets de minerai de fer : LKAB en Suède et Hoogovens B aux Pays-Bas, cette dernière uniquement pour sa propre consommation.

Pour information on trouvera, dans le tableau 5, les caractéristiques des deux variétés de pellets à magnétite et olivine fabriquées par le groupe suédois LKAB, en grande partie destinées au marché européen.

Product specifications

Iron ore analyses

Kiruna B Fines – KBF

Malmberget A Fines – MAF

LKAB Olivine Pellets – KPBO

LKAB Olivine Pellets – MPBO

LKAB DR Oxide Pellets – MPRD

The chemical and physical data are expected average figures at the port of loading for shipments during 1998. They are given in good faith but without guarantee. All chemical analyses are in the dry state. Oxides are not indications of the phases present, but only conventional representations of elements.

LKAB

web.market@lkab.com

		KBF	MAF	KPBO	MPBO	MPRD
Fe ₃ O ₄	%	94,7	96,1			
Fe ₂ O ₃	%	1,8	1,7	94,7	94,5	96,3
FeO	%			0,5	0,8	0,3
MnO	%	0,09	0,05	0,08	0,06	0,08
CaO	%	0,50	0,18	0,40	0,25	1,05
MgO	%	0,47	0,40	1,55	1,45	0,75
Al ₂ O ₃	%	0,18	0,25	0,22	0,40	0,19
SiO ₂	%	1,2	0,60	2,05	1,95	0,85
TiO ₂	%	0,50	0,40	0,24	0,35	0,14
V ₂ O ₅	%	0,21	0,24	0,20	0,24	0,21
P ₂ O ₅	%	0,10	0,07	0,06	0,02	0,06
Na ₂ O	%	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
K ₂ O	%	0,08	0,02	0,04	0,02	0,03
LOI	%	0,22	0,07			
Total	%	100	100	100	100	100
Fe	%	69,8	70,7	66,6	66,7	67,6
Mn	%	0,07	0,04	0,06	0,05	0,06
Cu	%	<0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cr	%	<0,001	<0,001	<0,01	<0,01	<0,002
Ni	%	<0,02	<0,02	<0,03	<0,02	<0,03
Zn	%	<0,004	<0,002	<0,004	<0,002	<0,004
P	%	0,045	0,030	0,025	0,009	0,025
S	%	0,02	0,01	0,001	0,001	0,002
F	%	0,03	0,01	<0,003	<0,002	<0,006
Cl	%	0,02	0,007	<0,002	<0,001	<0,002
Moisture	%	3,8	3,0	1,3	1,5	1,5
Fe natural state	%	67,1	68,6	65,7	65,7	66,6
Density	t/m ³	5,1	5,1			
Apparent density	t/m ³			3,7	3,7	3,7
Bulk density	t/m ³	3,4	3,2	2,5	2,5	2,3
Stowage factor	m ³ /t	0,29	0,31	0,40	0,40	0,43
Angle of repose	grader	44	48	29	30	32
Compression strength (ISO 4700)	daN			230	210	270
Tumbler test (ISO 3271)	%>6,3 mm			95	94	94
	%<0,5 mm			4	5	4
Screen analysis						
% in the range mm						
+16				1	2	3
12,5-16				11	20	50
9-12,5				85	75	44
5-9				2	2	2
0-5				1	1	1
% passing opening mm						
4,0		99				
2,0		75	98			
1,0		55	85			
0,5		44	49			
0,25		34	23			
0,125		25	10			
0,063		13	4			

Tabl. 5 – Caractéristiques chimiques et physiques des pellets à magnétite et olivine fabriquées par le groupe suédois LKAB.

3.2.2. Spécifications industrielles

- Caractéristiques chimiques

Les principales caractéristiques chimiques que doivent présenter les olivines/dunites sont les suivantes :

- teneur en MgO la plus élevée possible et dans tous les cas supérieure à 36 %. Suivant les origines, elle est couramment de 45 – 49 % ;
- perte au feu la plus faible possible, car elle engendre une consommation d'énergie. Par conséquent, l'olivine ne doit pas être serpentinisée. Cette perte au feu ne nuit pas à la qualité physique des agglomérés, puisque l'eau est éliminée lors de la fabrication sur grille vers 1 300°C. Par contre, lorsque l'olivine est enfournée en roche, une perte au feu trop importante provoquerait des éclatements prématurés entraînant une diminution de la porosité du lit et un mauvais fonctionnement du haut fourneau. La perte au feu doit être inférieure à 10 % pour les agglomérés et à 4 % pour l'olivine en roche ;
- teneur en Na₂O, K₂O et ZnO inférieure à 0,2 %. Les éléments volatils tels que Na, K, Zn sont pénalisants, car ils reprécipitent dans les zones moins chaudes du haut fourneau, provoquant des garnissages plus ou moins corrosifs du briquetage ainsi qu'une diminution de la porosité du lit, cette dernière gênant le passage des gaz réducteurs; Par ailleurs, les éléments tels que P - As - S sont totalement réducteurs ;
- teneur en SiO₂ supérieure à 36 % ; elle est couramment de 39 – 42 % dans les olivines commercialisées ;
- le fer et accessoirement l'aluminium et le manganèse ne sont pas gênants. En particulier, l'aluminium permet d'obtenir un laitier très apprécié pour la fabrication des granulats et la confection de certains ciments. Suivant les origines, la teneur en Fe₂O₃ des olivines utilisées varie de 6 à 12 %, celle en Al₂O₃ entre 0,4 et 2,4 %.

- Caractéristiques physiques

Les points de ramollissement et de fusion sont des caractéristiques primordiales. Une dunite qui éclate lors de l'enfournement colmate plus ou moins le lit et, de ce fait, nuit au rendement et à la qualité de la fonte ; une température de fusion trop basse ou trop haute entraîne des conséquences analogues : minéral de fer et olivine doivent fondre en même temps.

- Granulométrie

Pour l'enfournement direct, la dunite doit avoir une granulométrie comprise entre 10 et 40 mm.

Pour l'agglomération sur grille, l'olivine doit posséder une granulométrie comprise entre 0,5 et 1 mm ou 0 - 3 mm, voire 0 - 6 mm suivant les procédés.

Pour le bouletage, la granulométrie de l'olivine doit être inférieure à 40 µm.

3.3. UTILISATION DE L'OLIVINE DAN LA FONDERIE

3.3.1. Fabrication des moules de fonderie

L'olivine est utilisée comme sable de fonderie pour la fabrication des moules dans les fonderies de laiton, de bronze, d'aluminium, de magnésium et d'acier au manganèse, au même titre que le sable siliceux, la sillimanite, la chromite et le zircon.

Par rapport au sable siliceux, 4 à 5 fois moins coûteux, le sable d'olivine présente plusieurs avantages en fonderie :

- son coefficient d'expansion thermique est plus faible et uniforme (1 % à 820°C au lieu de 1,7 à 620°C), permettant un refroidissement plus rapide des moules. Le zircon et la chromite sont encore meilleurs à ce point de vue, mais ils sont plus coûteux ;
- son point de fusion est élevé (approximativement 1 800°C) et l'olivine présente une grande résistance au choc thermique ;
- il présente une grande résistance en cru (produit vert) ;
- il est disponible dans une grande variété de granularités ;
- il ne renferme pratiquement pas de silice libre et, de ce fait, son utilisation ne risque pas d'entraîner la silicose.

Lorsque l'olivine est utilisée, liée à la bentonite, pour la fabrication des moules, la basicité de l'olivine réduit la quantité de bentonite nécessaire en augmentant ses propriétés de liaison. Par ailleurs, grâce à son coefficient d'expansion faible et uniforme, elle ne nécessite pas l'ajout – ou d'une faible quantité seulement – d'agent de garnissage des moules. Cela n'entraîne pas seulement des économies sur le coût de ces additifs, mais permet de réutiliser le sable d'olivine de nombreuses fois.

On considère que la fabrication des moules avec du sable d'olivine nécessite 40 à 70 % moins de sable qu'avec du sable siliceux. Cela se traduit non seulement par des économies sur le coût du sable nécessaire, mais également sur les coûts d'évacuation des sables usagés.

L'utilisation de sable d'olivine pour la fabrication des moules est particulièrement efficace dans le cas où des réactions entre le métal et le moule peuvent se créer, comme c'est le cas pour les aciers à forte teneur en manganèse.

Des sables d'olivine très fins, c'est-à-dire de finesse AFS¹ = 100, 140 ou 180 sont utilisés dans les fonderies de cuivre, de laiton, de bronze et d'aluminium. En raison de ses propriétés hydrophobes et de la forme angulaire des grains, le sable d'olivine est utilisé lorsque les pièces moulées doivent avoir une finition de surface extrêmement douce, par exemple dans les fonderies de fer gris et d'alliages en acier (Henning, 1994). L'angularité des grains d'olivine procure une bonne perméabilité permettant l'utilisation de ces granularités très fines.

Néanmoins, la basicité de l'olivine ne permet pas son utilisation avec certains liants. En outre, l'angularité des grains nécessite l'emploi d'environ 50 % de résine supplémentaire qu'avec un sable siliceux à grains arrondis.

De la farine d'olivine broyée à 75 – 56 µm (200 à 300 mesh) est également utilisée pour "peindre" la surface des moules en contact avec le métal.

D'une manière générale en fonderie, l'olivine entre en compétition avec la chromite et le zircon, en fonction de l'efficacité relative par rapport aux coûts.

Mais en dehors des utilisations particulières examinées ci-dessus, le sable siliceux reste en France le plus utilisé en fonderie, en raison de son coût peu élevé, malgré certains inconvénients techniques et les risques encourus pour la santé (silicose).

3.3.2. Spécifications industrielles

- Composition chimique

MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	PF
48 à 53 %	41 à 43 %	-	7 % maxi	0,2 % maxi	0,6 % maxi

¹ AFS: American Foundrymen Society (séries de tamis ASTM American Society for Testing and Materials).

La finesse AFS est fonction du refus sur chaque tamis (n° 12 à 270, c'est-à-dire 1,68 mm à 53 µm) affecté d'un coefficient multiplicateur C (5 à 300) ⇒ finesse AFS

$$\text{finesse AFS} = \frac{\sum (\% \text{ refus sur tamis } N \times C_n)}{100}$$

- Caractéristiques physiques

- masse volumique vraie : 3,2 à 3,7 g/cm³,
- expansion thermique à 900°C : 1,1 %,
- masse volumique : en vrac ~ 1 700 kg/m³ ; tassé elle atteint 2 000 kg/m³,
- alcalinité : demande acide à pH 3 : 28 ml ; pH 4 : 26 ml ; pH 5 : 25 ml,
- l'olivine de Norvège fritte à 1 450°C, fond à 1 800°C et a une dureté Mohs de 6,5-7,0.

- Granulométrie

- sable : 0,1 à 0,8 mm, avec moins de 0,3 % inférieur à 50 µm. Finesse AFS : 20 à 120 µm,
- farine : 56 à 75 µm pour "peindre" la surface interne des moules.

3.4. UTILISATION DE L'OLIVINE DANS LES REFRACTAIRES

3.4.1. Fabrication des réfractaires

En raison de sa température de fusion élevée – environ 1 800°C – le sable d'olivine a longtemps été utilisé pour la fabrication de briques réfractaires, notamment dans la construction des fours industriels à foyers ouverts. Cependant, des changements dans la technologie de la fabrication de l'acier ont entraîné l'abandon des foyers ouverts, réduisant d'autant l'utilisation de l'olivine comme réfractaire. Elle a largement été remplacée par des réfractaires à base de magnésie, qui sont mécaniquement très stables et résistants aux attaques des scories.

Toutefois, en raison du relativement faible coût de l'olivine – environ moitié de celui de la magnésie – les briques à base de forstérite continuent d'être utilisées en tant que réfractaires, par exemple au fond des creusets utilisés en moulage continu.

Un autre marché en développement pour l'olivine est celui de la fabrication des réfractaires pré moulés, destinés aux incinérateurs, dans lesquels ses bonnes propriétés d'accumulation de la chaleur entraînent une combustion plus complète (*Smith, 1992*). Le faible coefficient d'expansion de l'olivine permet également des cycles de chauffage – refroidissement sans dégradation du revêtement réfractaire.

Malgré son coût plus élevé, l'olivine est préférée à la farine de silice pour le nettoyage des goulottes et des moules de fonderie, en particulier parce qu'elle ne présente pas de danger pour la santé (pas de risque de silicose).

En dehors de la métallurgie, l'excellente propriété de rétention de la chaleur de l'olivine est utilisée dans la fabrication des radiateurs à accumulation de chaleur, dans lesquels les briques sont chauffées pendant les heures où le coût de l'électricité est le moins élevé, la chaleur étant restituée en fonction des besoins. Cependant, dans ce secteur, elle est fortement concurrencée par la magnétite ("FeOlite") qui présente de meilleures

propriétés d'accumulation de la chaleur et nécessite donc une source de chaleur initiale plus faible.

3.4.2. Spécifications industrielles

- Composition chimique

A titre indicatif, on trouvera ci-après la composition chimique de l'olivine qualité réfractaire produite par la Société A/S Olivin en Norvège :

MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	PF
49 - 51 %	41,5 - 42,5 %	6,5 - 7,0 %	0,4 - 0,5 %	0,05 - 0,1 %	0,2 - 0,5 %

A noter que l'olivine ne doit pas contenir de fondants : mica, chlorite...

- Granulométrie

Les granulométries les plus utilisées sont comprises entre 1 et 7 mm.

3.5. UTILISATION DE L'OLIVINE COMME ABRASIF DE SABLAGE ET DE DECOUPE AU JET D'EAU

3.5.1. Propriétés et applications industrielles

Bien que l'olivine ne soit pas utilisée pour la fabrication des produits abrasifs mettant en œuvre un agent de liaison des grains (type meule) ou comme revêtement de surface d'un support (type toile émeri), ses propriétés physiques la rendent tout à fait appropriée pour une utilisation comme abrasif de sablage.

La dureté de l'olivine – de 6,5 à 7 sur l'échelle de Mohs, soit une dureté Knoop de 560 à 820 – se traduit par une très faible fragmentation des grains au moment de l'impact. Son poids spécifique élevé (3,2 à 3,4) lui confère une grande force d'impact, sachant qu'au plus le poids spécifique est élevé, au plus la force d'impact est grande pour des grains de même dimension. Sa cassure conchoïdale lui donne des arêtes vives qui découpent facilement la peinture, la rouille et le tartre.

Sa poussière de couleur claire est un avantage par rapport aux cendres de fonderies ou de centrales thermiques, parfois utilisées, qui laissent une surface poussiéreuse noirâtre.

En outre, l'olivine présente un grand avantage sur le sable siliceux longtemps utilisé, puisqu'elle ne renferme pratiquement pas de silice libre (généralement moins de 0,1 %), et de ce fait, son utilisation ne présente pas de risque de silicose.

Toutes ces propriétés sont mises à profit dans le décapage des surfaces métalliques avant mise en peinture : réparation et maintenance des bateaux, wagons de chemin de fer, camions, automobiles et avions, la maintenance des constructions métalliques telles que ponts, cuves, oléoducs, chaudières, ou le décapage de certaines pièces avant zingage.

L'olivine est également utilisée comme sable abrasif dans les techniques de découpe au jet d'eau sous pression, dans lesquelles un coulis est projeté au travers d'une buse sophistiquée, à des pressions pouvant atteindre 40 000 kg/m². Le diamètre de la buse peut être compris entre 0,23 et 2,8 mm, en fonction du matériau à découper et des conditions de découpe, la taille des grains d'olivine devant être inférieure à 50 % du diamètre de l'ouverture de la buse.

La découpe au jet d'eau sous pression est une technique de précision qui ne génère pas d'étincelle et pratiquement pas de poussière. Cette technique est utilisée notamment pour la découpe de précision de l'acier, de l'aluminium, du bois, du plastique, des matériaux composites, du verre, de la pierre, du béton, des céramiques...

Ce champ d'application est actuellement en plein développement. La consommation mondiale d'olivine dans ce marché est actuellement estimée entre 6 et 8 000 t/an (Henning, 1994 ; Harben, 1999).

3.5.2. Spécifications industrielles

L'olivine utilisée en sablage ne doit pas comporter d'impuretés tendres (mica, chlorite, sulfure, épidote) qui nuiraient à la qualité du décapage.

La granulométrie du sable d'olivine, comme celle de tous les abrasifs doit être très serrée.

A titre indicatif, on trouvera tableau 6, les fourchettes granulométriques de quelques qualités commerciales d'olivines pour sablage.

Qualité	Fourchette granulométrique (mm)	Etat de surface sur acier doux
AFS 20	2,36 - 0,355	moyennement lisse
AFS 30	1,0 - 0,18	lisse
Spécial	1,0 - 0,15	lisse
AFS 50	0,5 - 0,125	très lisse
AFS 80	0,25 - 0,09	très lisse

Source : Scangrit, UK (2000)

Tabl. 6 – Fourchettes granulométriques de quelques qualités commerciales d'olivines utilisées pour sablage.

La composition chimique de ces olivines de sablage figure dans le tableau 7 ci-après :

Elément	Teneur (%)
SiO ₂	41- 43
MgO	47,5 – 50
Fe ₂ O ₃	6 – 8
Al ₂ O ₃	0,4 – 0,5
NiO	0,3 – 0,35
Cr ₂ O ₃	0,2 – 0,3
MnO	0,05 – 0,1
CaO	0,05 – 0,1
Silice libre	< 1

Source : Scangrit, UK (2000)

Tabl. 7 – Composition chimique des olivines de sablage fabriquées par Scangrit (UK) à partir d'olivines norvégiennes.

3.6. AUTRES UTILISATIONS

- En tant que ressource locale en roche massive résistante, la dunite concassée est parfois utilisée pour l'élaboration de granulats destinés à la fabrication du béton et des chaussées, et en tant que ballast pour voies ferrées. En particulier, des quantités importantes de granulats de dunite sont mises en œuvre pour augmenter la masse des bétons utilisés dans la construction des plates-formes d'exploitation pétrolière en mer.
- En raison de sa couleur claire lorsqu'elle est réduite en poudre, l'olivine est également utilisée en tant que charge minérale dans certaines peintures spéciales, les mastics, l'asphalte... L'olivine pour charge a communément une granulométrie de 0 – 0,8 mm ou 0 – 0,02 mm.
- En agriculture et en horticulture, l'olivine peut également être utilisée comme fertiliseur de sol. Au Japon, par exemple, de l'olivine réduite à 74 µm est pelletisée avec d'autres fertilisateurs conventionnels pour être utilisée en agriculture. L'ajout d'olivine procure au sol à la fois le magnésium et le fer. Des tests réalisés aux Etats-Unis pour la culture de plantes ornementales en pots ont montré que l'olivine non traitée, simplement calibrée à moins de 0,1 µm, se dissolvait dans les sols acides en libérant à la fois le magnésium et le fer sous des formes directement absorbables par les plantes.
- De l'olivine en grain peut également être utilisée pour la filtration de l'eau, et dans les fours à lit fluidifié.

4. Panorama mondial de la production d'olivine/dunite

4.1. DONNEES GENERALES

La capacité de production mondiale d'olivine était estimée à environ 6,5 Mt en 1997. Les réserves mondiales sont probablement de plusieurs centaines de Gt. La même année, la production mondiale était estimée globalement à 5,07 Mt (*Harben, 1999*). Par comparaison, elle n'était que de 3,5 Mt en 1978 (*Lefond, 1983*).

Les principaux pays producteurs d'olivine sont, par ordre d'importance décroissant : la Norvège, qui produit à elle seule plus de 67 % de la production mondiale, le Japon (18 %), l'Espagne (9 %), les USA (4 %), les pays de la CIS, l'Italie, l'Autriche, le Mexique, le Pakistan et la Suède. La répartition de cette production est donnée dans le tableau 8 et la figure 2.

Pays	Production(t)
Norvège	3 400 000
Japon	900 000
Espagne	450 000
USA	200 000
CIS	n.c.
Italie	50 000
Autriche	20 000
Autres (1)	50 000
TOTAL	5 070 000

(1) y compris le Mexique, le Pakistan et la Suède.

Source : *Harben, (1999)*

Tabl. 8 – Estimation de la production mondiale d'olivine en 1997.

PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS D'OLIVINE

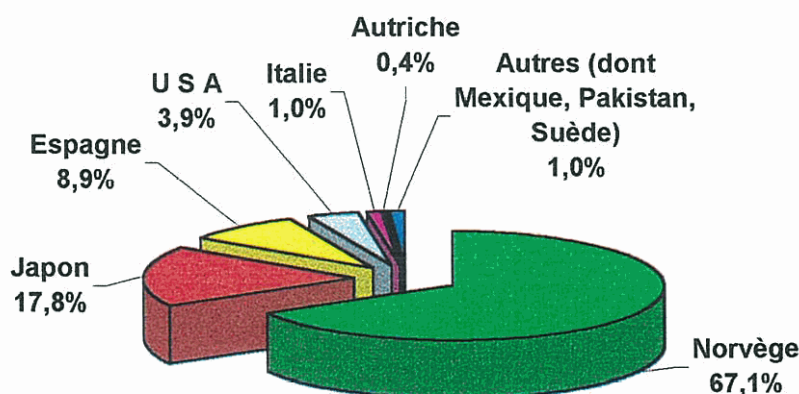


Fig. 2 – Principaux pays producteurs d'olivine.

Ces estimations ne prennent pas en compte les pays de la CIS et la Chine.

Les principaux pays exportateurs d'olivine sont, par ordre décroissant : la Norvège, les USA, la Suède, l'Espagne, le Japon et l'Italie. Les principaux pays importateurs sont : l'Allemagne, la France, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Belgique, la Finlande, le Canada et Taiwan (*Harben, 1999*).

4.2. PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS

4.2.1. Norvège

Le plus grand gisement mondial d'olivine est situé dans la région de Aaheim, à environ 100 km au sud de Aalesund, avec des réserves estimées à environ 2 000 Mt. Plusieurs autres gisements renferment jusqu'à 5 Mt chacun. La plupart des grands gisements norvégiens de dunite de haute qualité sont situés à proximité de la mer, près des fjords de la région de Sunnmore – Nordfjord, sur la côte ouest du pays.

En 1994, la production totale d'olivine en Norvège a été d'environ 3,4 Mt, soit plus de 67 % de la production mondiale, si l'on excepte la production des pays de la CIS et de la Chine pour lesquels on ne dispose pas de données.

Jusqu'en 1994, cette production était assurée par trois sociétés principales : A/S Olivin, Franzefoss Bruk A/S, et A/S Industrimineraler. Courant 1994, A/S Olivin a racheté A/S Industrimineraler, tandis qu'en janvier 1995 une nouvelle société est apparue sous le

nom de North Cape Minerals A/S, à la suite du rachat par cette dernière de Franzefoss Bruk A/S, North Cape Minerals A/S étant elle-même détenue par le groupe américain Unimin Corp. De nos jours, il ne subsiste donc que deux grands producteurs norvégiens.

- La société A/S Olivin exploite à présent deux gisements :

- le gisement de Aaheim, dans le Sunnmore, est le plus grand et produit environ 2 Mt/an. Il s'agit d'une mine souterraine exploitée en chambres et piliers, le minerai étant transporté par un convoyeur à bande souterrain jusqu'à l'usine de traitement située à 4 km.

Environ 75 % du minerai est commercialisé sous forme de produits concassés utilisés comme conditionneur de laitier dans les industries du fer et de l'acier. Une autre partie de ces produits concassés trouve des débouchés dans d'autres applications qui ont pris de l'ampleur au cours de ces dernières années, telle que l'utilisation en tant que granulats dans la fabrication de bétons lourds dans certaines constructions spéciales en mer.

Environ 12 % de la production de l'usine est vendue sous forme de sables et farines destinés à de nombreuses applications, telles que sables pour moules de fonderie, abrasifs de sablage, fabrication de réfractaires et de laine de roche.

Outre l'approvisionnement en matières premières d'autres fabricants de produits réfractaires, A/S Olivin a également sa propre production de produits réfractaires, notamment de briques à accumulation de chaleur et de briques réfractaires pour fours de fonderie, ainsi que de mortiers réfractaires pour lesquels A/S Olivin est actuellement le principal fournisseur de l'Allemagne et de la Belgique. Au total, environ 40 000 à 50 000 t/an de produits finis réfractaires sont exportées aux USA. Par ailleurs, la société a lancé la production d'un nouveau produit "Olifrit" destiné à la réparation des revêtements des fours à arc électrique ;

- le second gisement est celui de la région de Stranda où le minerai est exploité en carrière à Norddal, puis traité dans l'usine de Romsdal, d'une capacité de 1 Mt/an. La majorité de la production est destinée au conditionnement du laitier, bien que de faibles tonnages aient été testés dans la fabrication des réfractaires. Une partie de la production de l'usine est importée aux USA par la société F & S International Inc. qui fournit environ 130 000 t/an aux aciéries des Etats-Unis (Skillen, 1995).

- La société North Cape Minerals A/S exploite le gisement de Lefdal à Bryggja, sur la côte du Nordfjord, à partir d'une mine souterraine. La production de l'usine en 1994 a été d'environ 450 000 à 500 000 t d'olivine, dont 90 % sous forme de produits concassés destinés au conditionnement du laitier, et 10 % sous forme de sables, en tant qu'abrasifs de sablage, sables de fonderie, et pour la fabrication de réfractaires. La société exporte en particulier 30 000 t/an d'olivine brute en fragments aux Etats-Unis, pour les besoins de la société Unimin Corp. (Skillen, 1995).

La composition chimique de trois olivines commerciales de Norvège est reportée dans le tableau 9.

Producteurs Eléments	North Cape (%)	A/S Olivin	
		Aaheim (%)	Stranda (%)
MgO	47 - 49	49,5	46,0
SiO ₂	40 - 41	41,5	41,5
Fe ₂ O ₃	7,5 - 8,5	7,2	7,6
Perte au feu	1 - 1,5	1,1	2,4

Source : Skillen (1995)

Tabl. 9 – Composition chimique de trois olivines commerciales norvégiennes.

4.2.2. Japon

Si la production de roches ultrabasiques est d'environ 6 Mt par an, selon les statistiques officielles japonaises, la majeure partie correspond à de la serpentine. L'olivine et la dunite ne représentent, en effet, qu'environ 900 000 t/an, soit environ 15-17 % de cette production totale affichée par ces statistiques.

En 1987, par exemple, la production de roches ultrabasiques a été d'environ 5,37 Mt, dont environ 350 000 t d'olivine, et la consommation interne du Japon a été de 5,29 Mt, la différence représentant le stock non consommé en fin d'année.

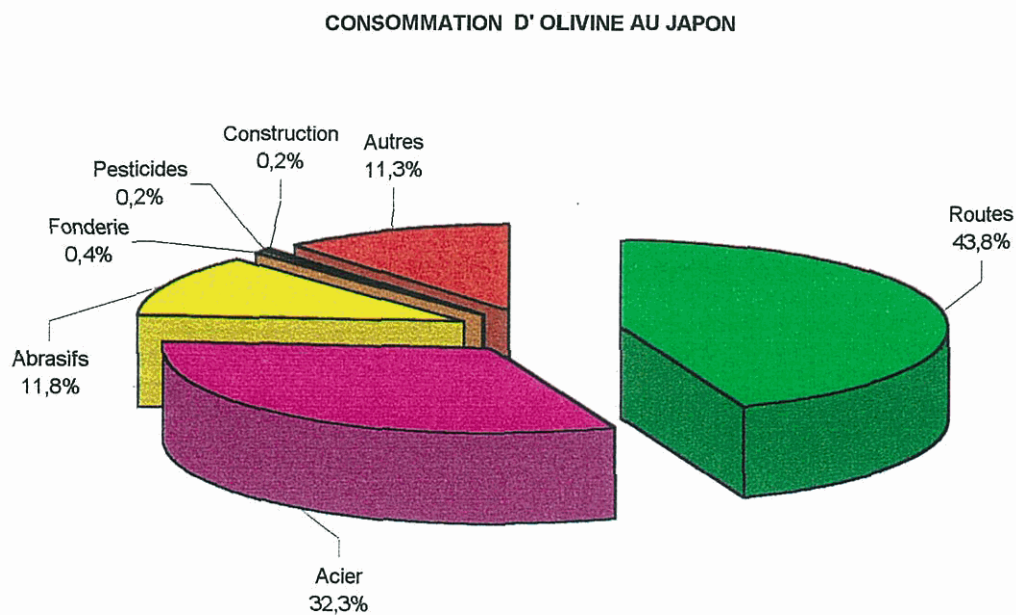
La consommation domestique se répartissait ainsi : environ 66 % dans la construction civile et dans l'ingénierie (routes, granulats pour béton, fertilisants, sable de décapage, roches ornementales...), tandis que 34 % trouvaient des utilisations industrielles (aciéries, fonderies...). A noter que 500 t seulement ont été exportées (Griffiths, 1989).

Une estimation de la répartition de ces utilisations en 1987 est donnée tableau 10 et figure 3.

Utilisations	Tonnes
Routes (granulats)	2 321 150
Acier	1 709 000
Abrasifs de sablage	623 540
Fonderie	23 700
Pesticides	9 930
Construction	8 320
Autres	598 300
TOTAL	5 293 940

Source : MITI Yearbook of Mining Industries Statistics
(données de 1987).

**Tabl. 10 – Estimation de la répartition de la consommation
d'olivine/dunite/serpentine au Japon en 1987.**



**Fig. 3 – Estimation de la consommation d'olivines/
dunite/serpentine au Japon en 1987.**

En 1993, la production de roches basiques a été de 5,29 Mt, pour une consommation interne d'environ 5,45 Mt, aucune exportation n'étant enregistrée depuis cinq ans (*Skillen, 1995*). Depuis ces toutes dernières années, le Japon exporte à nouveau de l'olivine.

Le principal gisement d'olivine est situé à Horoman Hill, à l'extrémité sud de l'île centrale de Hokkaido, où les réserves sont estimées à environ 100 Mt. C'est de ce gisement que le principal producteur d'olivine, la société Toho Olivine Industrial Co. Ltd, extrait le minerai avant de le transporter dans son usine située à Hidaka, dans l'île de Hokkaido, à environ 100 km au sud-est de la capitale régionale : Sapporo.

La capacité de l'usine est d'environ 500 000 t/an, à la fois sous forme de fragments, granules et poudres d'olivine.

La composition chimique des olivines commercialisées est donnée dans le tableau 11, et les différentes qualités industrielles sont regroupées dans le tableau 12.

Eléments	%
MgO	47 max
SiO₂	42 min
Fe₂O₃	2
CaO	0,4
Oxydes	8,5 max
Perte au feu	2,5 max

Source : Harben and Kuzvart (1997).

Tabl. 11 – Composition chimique des olivines commercialisées par le Japon.

Utilisations	Dimensions des particules (mm)
Sables de fonderie et réfractaires	0,1 – 5,0
Fertilisants	< 0,1
Charge pour asphalte, réfractaires façonnables	< 0,1
Haut fourneau (contrôle de la basicité)	> 5,0
Construction de digues portuaires et granulats à béton	> 5,0

Source : Toho Olivine Industrial Co., in Harben and Kuzvart (1997).

Tabl. 12 – Différentes qualités d'olivine produites au Japon.

En plus de l'olivine/dunite, les principales régions productrices de serpentine sont situées : aux environs de Mie préfecture dans la zone centrale de Honshu, de Yamaguchi préfecture dans la zone occidentale de Honshu, Kochi préfecture dans la partie sud de Shikoku, et Fukuoka préfecture dans la zone nord de Kyushu.

4.2.3. Espagne

L'Espagne dispose d'importantes ressources en dunite dans la province de Galicie, dans l'angle nord-ouest du pays, où les réserves sont estimées à plus de 100 Mt. La production totale de dunite commercialisable est d'environ 450 - 500 000 t/an, assurée uniquement par deux sociétés.

La plus importante, la société Pasek Espana, exploite une carrière à Landoy, près de Ortigueira. La capacité de production des installations est d'environ 1 à 1,5 Mt/an. La production de dunite brute est estimée à environ 600 000 t/an, tandis que la production de l'usine en produits commercialisables est approximativement de 450 000 t/an. Trois qualités granulométriques sont produites : 0 – 3 mm, 10 – 40 mm et 8 – 18 mm. D'autres qualités peuvent être produites suivant les besoins du marché. L'essentiel de la production de cette société est vendu à l'intérieur de l'Union Européenne.

Le second producteur est la société Gabriel Perez-Minas qui exploite une carrière et possède une usine de traitement à Moeche, province de La Coruna, également en Galicie. La production de la carrière en dunite brute est d'environ 150 000 t/an, bien que l'on estime la production de produits commercialisables à environ 40 000 t/an. Deux qualités sont produites par l'usine : 0 – 3 mm et 10 – 40 mm, toute la production étant utilisée dans l'industrie de l'acier.

La composition chimique de la dunite espagnole est donnée dans le tableau 13.

Eléments	%
MgO	36,2
SiO₂	41,5
Fe total	6,35
Al₂O₃	2,4
CaO	1,86
MnO	0,14
Na₂O	0,18
K₂O	0,06
Perte au feu	8,4

Tabl. 13 – Composition chimique de la dunite espagnole.

4.2.4. USA

Aux Etats-Unis, il existe de nombreux gisements d'olivine qui s'étendent selon une ceinture allant depuis le nord-est de la Géorgie jusqu'à la région occidentale de la Caroline du Nord, les réserves totales de ces deux états étant estimées entre 125 et 200 Mt.

Toutefois, le plus grand gisement exploité aux Etats-Unis est celui de Twin Sisters Mountain, situé dans les comtés de Whatcom et de Skagit, dans l'état de Washington. Dans ce gisement, dont la superficie est de 93 km², les réserves sont estimées à environ 1 800 Mt d'olivine non altérée (*Teague, 1983 ; Skillen, 1985*), figure 4.

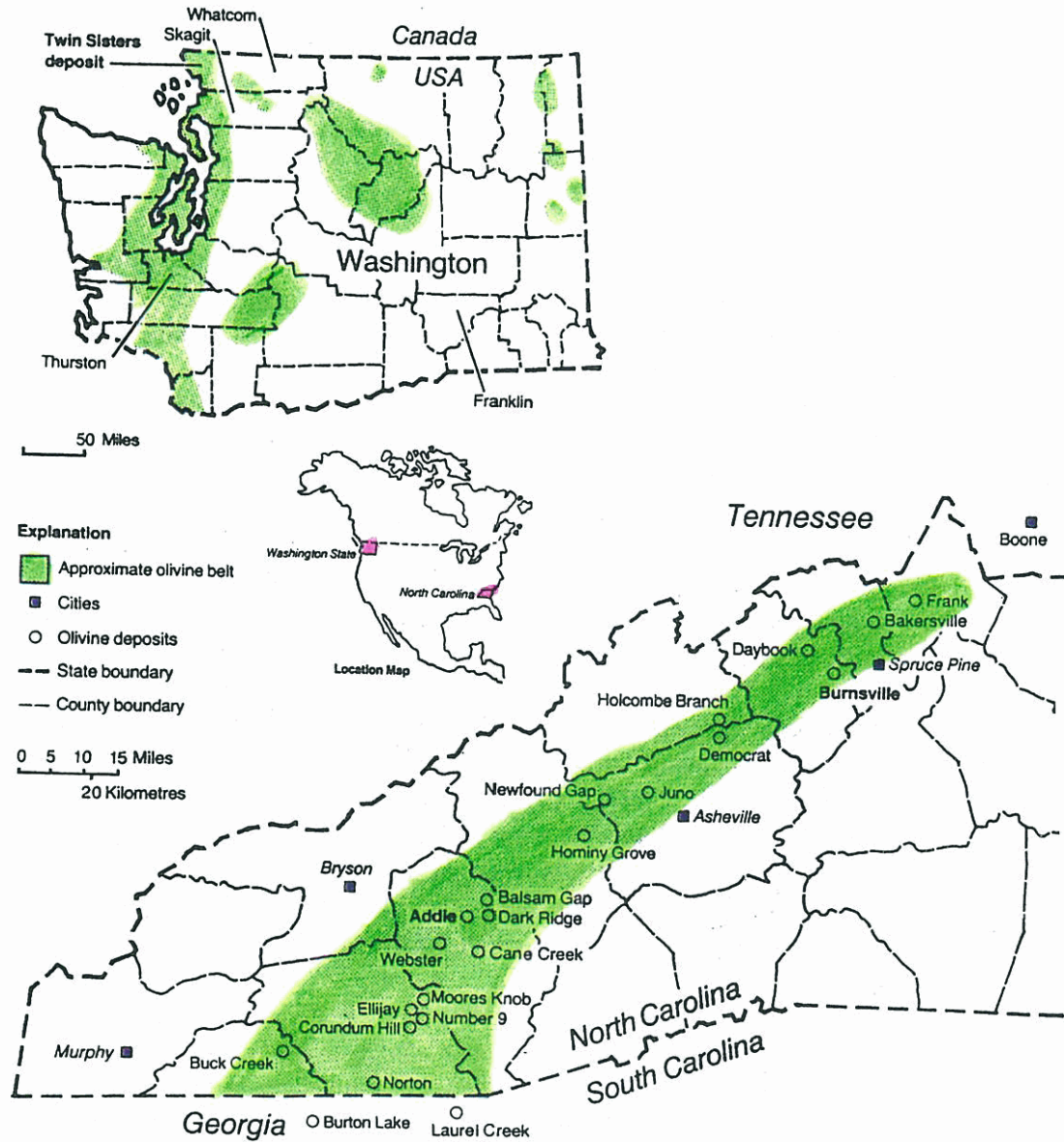


Fig. 4 – Localisation des principaux gisements d'olivine dans les états de Washington et de la Caroline du Nord, aux Etats-Unis
(source : Hunter, 1941, et Livingstone, 1982 ; in Harben et Kuzvart, 1997).

En outre, 50 Mt de réserves ont également été identifiées à Cypress Island dans l'état de Washington, de même que huit complexes dans le sud-est de l'Alaska, dont un contient une masse d'olivine d'environ 1,6 km de diamètre.

La production totale d'olivine aux USA est estimée à environ 200 000 t/an. Elle est assurée par deux grands producteurs : Olivine Corporation et Unimin Corporation, cette dernière ayant racheté en 1994 les deux mines d'olivine et les trois usines de traitement de la société Applied Industrial Materials Corp. (Aimcor).

La capacité de production de la société Olivine Corp. est d'environ 77 000 t/an qu'elle exploite dans sa carrière de Bellingham, dans l'état de Washington. Alors qu'elle produisait essentiellement des sables de fonderie, depuis quelques années la société a concentré sa production sur la qualité réfractaire, et de ce fait elle n'utilise plus aujourd'hui qu'une seule usine. En effet, Olivine Corp. s'est spécialisée dans le développement et la production d'incinérateurs dont la construction de chaque unité nécessite près de 90 t de panneaux réfractaires. Cette activité absorbe environ 9 000 t/an d'olivine produites par la société. Olivine Corp. vend le reste de sa production d'olivine, soit environ 68 000 t/an, à Unimin Corp.

Depuis qu'elle a racheté les installations de Aimcor, Unimin Corp. produit une grande gamme d'olivines de qualité réfractaire, d'abrasifs pour sablage et de qualité fonderie.

Bien qu'elle exploite ses propres gisements, Unimin Corp. continue d'acheter des quantités importantes de minerais à Olivine Corp. (environ 68 000 t/an) et à North Cape Minerals en Norvège (environ 27 000 t/an). Le minerai norvégien est traité dans son usine à Aurora, dans l'état de l'Indiana, où il est utilisé pour la préparation d'une gamme de produits de qualités fonderie, de qualités plus grossières et de granulats, tandis que le minerai acheté à Olivine Corp. est traité dans son usine à Hamilton, dans l'état de Washington, essentiellement pour la production de qualités fonderie.

La société produit également un abrasif de sablage à base d'olivine dénommé "Green Lightning", sous forme d'un grand nombre de granulométries normalisées, de même que quelques qualités de granulométries plus spécifiques. La production de ces abrasifs est d'environ 5 000 à 10 000 t/an, essentiellement à partir d'olivine des USA, avec une faible quantité de matériau norvégien. La majorité de la production est consommée aux Etats-Unis, et un faible tonnage est exporté au Canada.

Les deux principaux gisements exploités par Unimin Corp. sont situés à Smokey Mountains, en Caroline du Nord (200 Mt de réserves) et à Cascade Mountains dans l'état de Washington (1 700 Mt de réserves), les minerais étant traités dans l'usine de Green Mountain, en Caroline du Nord.

En Amérique du Nord (USA + Canada), la répartition des utilisations de l'olivine dans les différents secteurs d'activité s'établissait approximativement comme l'indiquent le tableau 14 et la figure 5.

Utilisations	Tonnes
Fondants en sidérurgie	175 000
Moules de fonderie	71 000
Abrasifs de sablage	13 000
Réfractaires	11 000
TOTAL	270 000

Source : Brodmann & Co., 1991 (données de 1989).

Tabl. 14 – Consommation d'olivine en Amérique du Nord.

Consommation d' olivine en Amérique du Nord

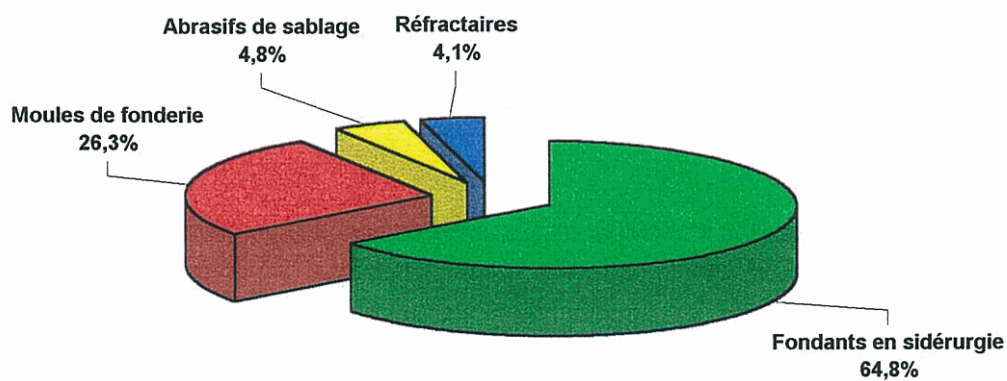


Fig. 5 – Répartition de la consommation d'olivine en Amérique du Nord.

La composition chimique des olivines est donnée dans le tableau 15.

Eléments	%	
	Etat de Washington (Olivine Corp.)	Etat de Caroline du Nord (Unimin)
MgO	49,4	50,5
SiO₂	41,2	40,1
Fe₂O₃	7,1	6,7
CaO	0,2	0,2
Oxydes	1,8	1
Perte au feu	0,7	0,7

Source : Harben, 1999.

Tabl. 15 – Composition chimique des olivines des USA.

4.2.5. Italie

La société Nuova Cives Srl exploite une carrière d'olivine à Vidracco, Crose Piemonte, près de Turin. Bien que la capacité de production de la carrière soit d'environ 150 000 t/an et celle de l'usine voisine d'environ 80 000 t/an, la production réelle d'olivine italienne n'est que de 45 000 à 50 000 t/an. En complément, l'Italie importe de l'olivine de Norvège.

La société produit une grande variété de qualités destinées à de nombreuses utilisations industrielles : 10-30 mm et 10-45 mm pour hauts fourneaux ; 1-4 mm, 3-6 mm et 3-10 mm pour la production d'acier, la fabrication de réfractaires et d'abrasifs, et pour la filtration ; différentes variétés de farines allant de 0,5 µm à 2-3 µm pour la fonderie, la fabrication de produits bitumineux, de mastics, de peintures spéciales, pour la filtration... Nuova Cives Srl fabrique également 7 qualités de produits allant de 0,05-0,3 mm à 2-4,5 mm destinés à couvrir tous les besoins des abrasifs de sablage et de la découpe au jet d'eau sous pression.

Environ 95 % de la production est consommée en Italie, selon la répartition suivante : 30 % dans la production de fer et d'acier, 5 % pour les réfractaires, 10 % pour la fonderie, 35 % pour les abrasifs de sablage, 15 % pour la fabrication de produits bitumineux et d'abrasifs, et 5 % pour la fabrication de peintures spéciales (*Skillen, 1995*).

Une estimation globale de la consommation d'olivine en Italie ces dernières années et la répartition des principales utilisations sont indiquées dans le tableau 16 et la figure 6.

Utilisations	Milliers de tonnes
Abrasifs	30
Produits bitumineux, peintures spéciales, céramiques	10
Granulats routiers	10
Sidérurgie	5
Fonderie	5
Réfractaires et métallurgie	4
TOTAL	64

Source : Nuova Cives Srl, Italie.

Tabl. 16 – Estimation de la consommation d'olivine en Italie.

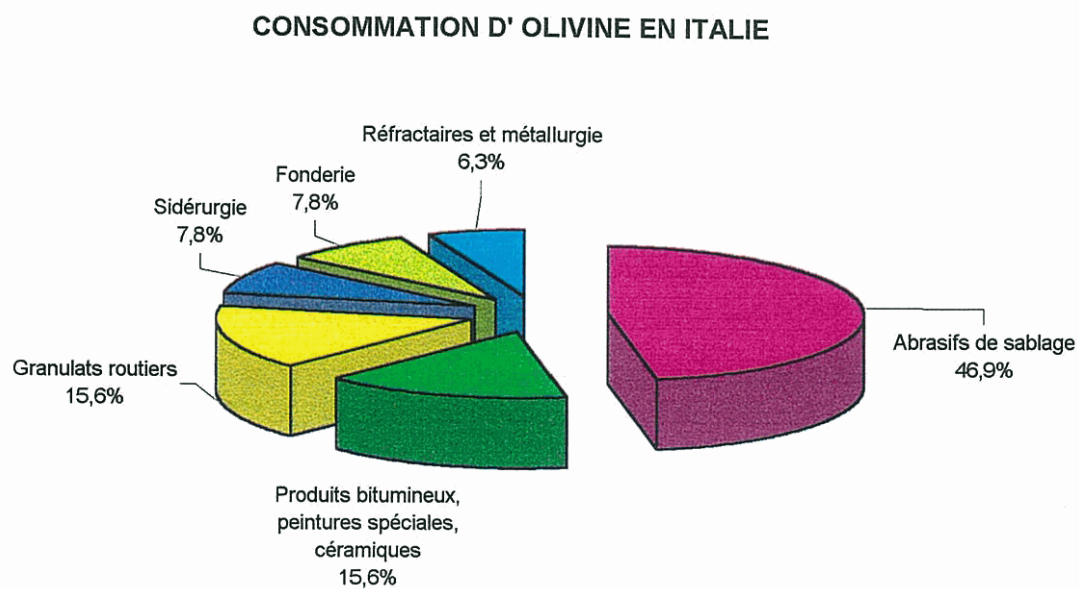


Fig. 6 – Répartition de la consommation d'olivine en Italie.

La composition chimique de l'olivine produite par Nuova Cives est donnée dans le tableau 17.

Eléments	%
MgO	41-43
SiO₂	42-44
Fe₂O₃	1,2-2,7
Al₂O₃	NA
CaO	1,5-2,6
Oxydes	NA
Perte au feu	NA

Source : Nuova Cives Srl, Italie.

Tabl. 17 – Composition chimique de l'olivine italienne.

4.2.6. Autriche

La société Magnolithe GmbH exploite une carrière de dunite à St Stefan, près de Leoben. Le minerai est transporté jusqu'à l'usine de traitement de St Lorenzen, près de Knittelfeld, distante de 15 km. La dunite y est calcinée dans un four rotatif, à une température de 1 600 - 1 650°C ; la capacité de ce dernier est d'environ 38 000 t/an. Le matériau est ensuite broyé et calibré dans les différentes classes granulométriques adaptées aux diverses utilisations industrielles : 0,1 - 0,4 mm pour fonderie, 0 - 0,8 mm et 0 - 0,2 mm pour charges industrielles, 0,5 - 6 mm, 1 - 6 mm, et 2 - 6 mm pour abrasifs de sablage, et diverses granulométries dans la tranche 0 - 6 mm pour la fabrication de réfractaires.

La production totale est d'environ 20 000 t/an, dont environ 50 % sont exportées dans les pays de l'Europe de l'Ouest (*Skillen, 1995 ; Griffiths, 1989*).

La composition chimique de cette olivine est la suivante (tableau 18) :

Eléments	%
MgO	49-51
SiO₂	39-41
Fe₂O₃	8-9
Al₂O₃	NA
CaO	0,4 max
Oxydes	NA
Perte au feu	NA

Source : Griffiths, 1989.

Tabl. 18 – Composition chimique de l'olivine autrichienne.

4.2.7. Mexique

La société Regio Cal SA de CV exploite une carrière de dunite-serpentine située à Mag Minas de Tamaulipas, Ciudad Victoria, Tamaulipas. La production est d'environ 25 000 t/an. Les produits sont utilisés dans les hauts fourneaux et pour la fabrication de peintures réfractaires. En outre, ils sont utilisés en substitution de l'olivine et de la silice sur le fond des fosses de trempage, et sous forme de granulats calcinés.

4.2.8. Pakistan

La société Black Mountain Pvt Ltd exploite une carrière d'olivine à Lashaker, Barkana, dans le district de Swat. La capacité de production de la carrière est d'environ 34 000 – 39 000 t/an, et les réserves du gisement sont estimées à 3,5 Mt. La production est destinée à la fabrication de réfractaires pour le marché local de l'acier.

4.2.9. Suède

Le plus grand gisement est situé à Arutats. Ses dimensions seraient comparables à celles du gisement de Twin Sisters aux Etats-Unis.

Actuellement, le seul producteur d'olivine en Suède est la société Handöls Täljstens AB, filiale de Höganäs AB, qui exploite une carrière et traite le minerai dans son usine à Handöl, dans le nord du pays, à 30 km au sud de la ville de Gallivare. Les réserves de ce gisement sont de 1 à 2 Mt.

La capacité de production de l'usine est d'environ 50 000 t/an, mais au fil des années, la production a été considérablement réduite et se limite aujourd'hui aux seuls besoins de deux utilisateurs suédois, soit environ 10 000 t/an.

Autrefois, la production était surtout destinée à des applications réfractaires, notamment à la fabrication de briques à accumulation de chaleur, dont une partie était commercialisée au Royaume-Uni. La disparition de ce débouché consécutif à la substitution de l'olivine par de la magnétite, à la compétition avec l'olivine norvégienne de plus forte teneur en magnésie, et à la situation géographique défavorable de l'unité de production, à 120 km de la côte, a écarté la société Handöls Taljstens du cercle des grands producteurs d'olivine (*Griffiths, 1989*).

La composition chimique de l'olivine suédoise est la suivante (tableau 19).

Eléments	%
MgO	45-46 max
SiO₂	41
Fe₂O₃	8,2
Al₂O₃	2
CaO	0,8
Oxydes	2
Perte au feu	1,8

Source : Harben, 1999.

Tabl. 19 – Composition chimique de l'olivine suédoise.

4.2.10. Inde

La société Dalmia Magnesite Corp., filiale de Dalmia Cement (Bharat) Ltd, exploite de la dunite à Salem, province de Tamil Nadu, tandis que la société Sri Ponkumar Magnesite Mines traite le minerai pour la société Dhanthanthara Chemicals dans son usine de Chinnagoundanoor, à l'ouest de Salem. Dans ce pays, la dunite serait produite en sous-produit de la magnésite (*Skillen, 1995*). Aucune donnée de production n'est disponible.

4.2.11. Canada

Le principal gisement d'olivine est situé à Sainte Anne des Nions, dans la province du Québec. Les réserves et la production ne sont pas communiquées.

Par ailleurs, une petite quantité d'olivine synthétique est produite par la société "Les Sables Olimag Inc.", à partir de résidus de chrysotile provenant d'une des mines d'amiante de la région de Thetford, dans la province du Québec. Ces résidus sont calcinés à une température de 850°C dans un four rotatif d'une capacité de 4 000 t/an. Le produit obtenu est un mélange de forstérite et de silice.

Cette société a également expérimenté la production de forstérite relativement pure en ajoutant de la magnésite pendant la calcination. Le procédé nécessite la pelletisation de la magnésite et des résidus d'amiante, la calcination à 800°C dans un four rotatif, puis le chauffage à 1 350°C dans un four statique. A cette dernière température, la magnésite se combine à la silice pour former de la forstérite après deux heures de chauffage (Henning, Skillen, 1995).

4.2.12. Chine

Plusieurs gisements d'olivine sont exploités dans différentes provinces, mais les statistiques de production annuelle du pays ne sont pas disponibles.

Parmi les principales sociétés productrices, on peut citer (Wen Lu, 1998) :

- Shaanxi Shangnan Chromium-Magnesium Materials Co Ltd, à Shangnan, province du Shaanxi, dont la capacité de production d'olivine (forstérite) est de 20 000 t/an ;
- Xixia Andalusite Co Ltd, à Xixia, province du Henan, d'une capacité de production d'olivine (forstérite) d'environ 30 000 t/an, et d'une production annuelle de 15 000 t ;
- Yichang Magnesian Olivine Development Co, à Yichang, province du Hubei, d'une capacité de production annuelle de 12 000 t d'olivine.

4.2.13. Pays de la CIS

La production d'olivine dans ces pays est essentiellement localisée dans la région montagneuse du Pamir. Une publication indique que d'importantes recherches pour la fabrication de réfractaires à base d'olivine ont été réalisées (Afansa'ev, 1988), accréditant l'existence d'exploitations d'olivine dans ces pays. Mais aucune donnée concernant les ressources ou la production n'est actuellement disponible.

4.2.14. Yougoslavie

La société Sour Magnohrom – Vatrostaini Materijali exploite de la dunite dans sa carrière de Goles à Magura – Lipljan, où elle est également traitée. Aucune donnée de production n'est disponible (*Griffiths, 1984*).

4.2.15. Autres gisements

D'autres gisements d'olivine sont signalés en Nouvelle Zélande, au Zimbabwe, en Afrique du Sud, en Grèce, et au Brésil. Ils sont actuellement considérés sans valeur commerciale (*Teague, 1983 ; Henning, 1994*). Peu d'informations sont disponibles sur ces gisements. Toutefois, en Nouvelle Zélande, les travaux de prospection indiquent que les trois plus grands massifs de roches ultrabasiques – Dun Mountain, Red Hills et Red Mountain – contiennent une masse centrale de dunite relativement peu serpentinisée. A Dun Mountain, les réserves exploitables sont estimées à plus de 1,3 Mt, l'olivine représentant 97,5 % de la dunite (*Griffiths, 1989*).

4.3. PERIDOTS DE QUALITE GEMME

Contrairement à l'olivine en grain de qualité industrielle, très répandue à travers le monde, le péridot¹ en gros cristaux, de qualité gemme, ne se rencontre qu'en un nombre restreint de gisements.

Les péridots les plus fins proviennent de l'île de Saint Johns (Zebirget), dans la Mer Rouge, au large de l'Egypte. Parmi les autres gisements, on peut citer : la région de Mogok, province du Myanmar, au Burma ; la région de Soppat, province du Kohistan, au Pakistan ; les montagnes de l'Oural, en Russie ; la région de Snarum, en Norvège ; le Mont Vésuve en Italie, et le district de Eifel, en Allemagne.

Aux Etats-Unis, les gîtes de péridot de qualité gemme sont situés près de San Carlos (dans la réserve indienne de San Carlos), et dans les comtés de Gila et de Graham, en Arizona. De gros grains de péridot se rencontrent également près de Fort Defiance (Buell Park et Garnet Ridge), comté d'Apache, dans l'Arizona, dans la région de Kilbourne Hole, comté de Dona Ana, dans le Nouveau Mexique, à Webster, comté de Jackson, en Caroline du Nord, et dans les basaltes de Hawaïi.

¹ "péridot" est synonyme d' "olivine", mais en joaillerie, les termes de péridot et de chrysolite sont les plus usités.

4. Panorama français des ressources potentielles et de la consommation d'olivine/dunité

5.1. RESSOURCES POTENTIELLES EN FRANCE

On ne connaît pas en France de gisement équivalent à ceux des pays producteurs d'olivine. Actuellement, la France ne produit pas d'olivine ; le marché français est donc uniquement satisfait par de l'olivine/dunité importée.

Il existe toutefois de nombreux gîtes de péridotites en France : en Corse, dans les Pyrénées, le Massif central, les Alpes, les Vosges et la Bretagne. Mais dans la plupart, l'olivine constitue un pourcentage insuffisant pour que l'on puisse en envisager l'exploitation industrielle, les péridotites étant généralement serpentinisées sous l'action de l'altération (*fig. 7*). Les péridotites les moins serpentinisées sont surtout localisées en Corse et dans les Pyrénées, et plus rarement en bordure du Massif Central (*Forestier, 1962 ; Ohnenstetter, 1982*).

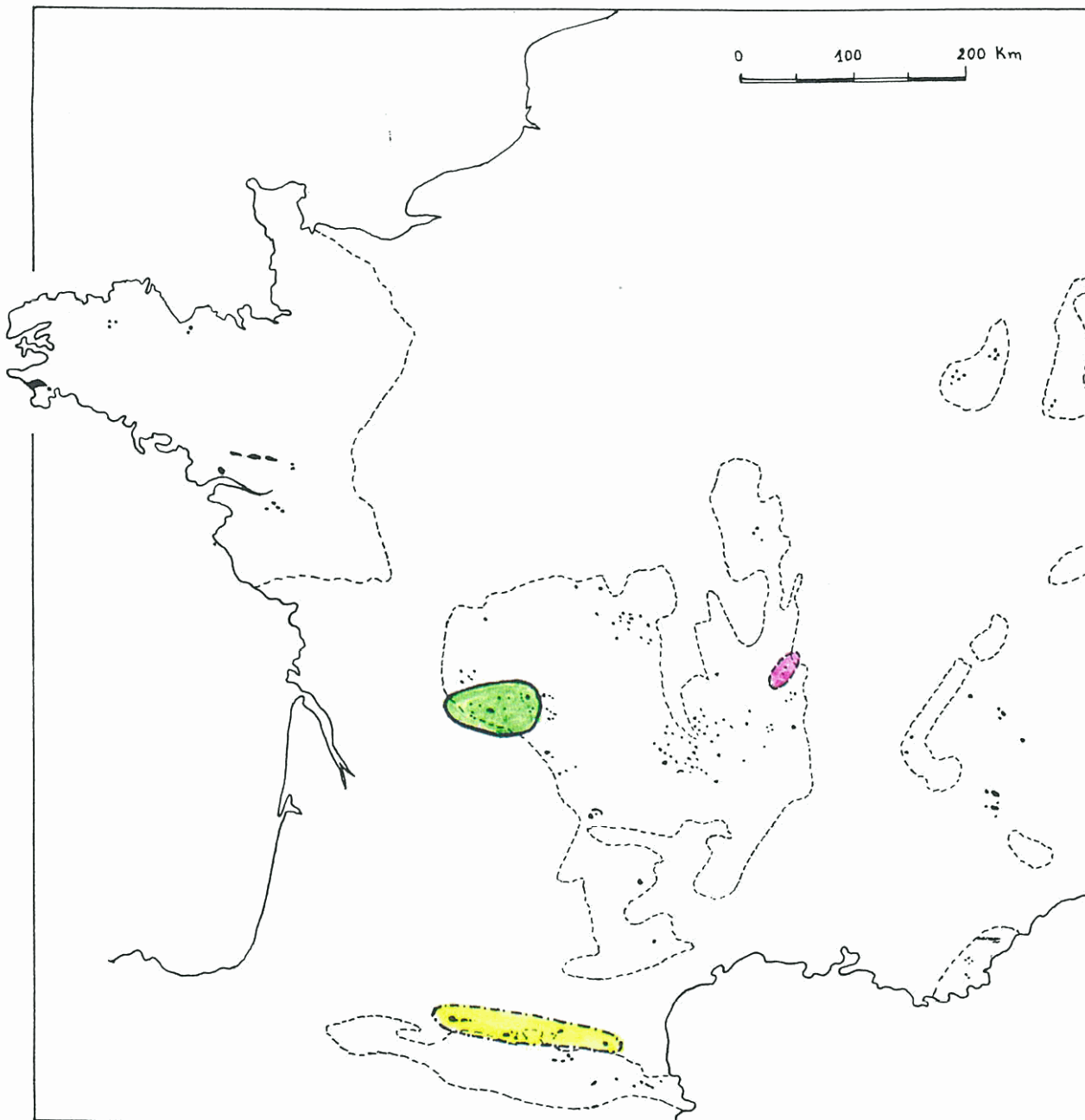
Bien que la plupart de ces gîtes ne semblent pas présenter de valeur commerciale, dans les conditions économiques actuelles, ils sont examinés sommairement ci-après.

5.1.1. Corse

Le massif de péridotite du Monte Maggiore (bordure nord-ouest du Cap Corse) renferme des panneaux peu serpentinisés (*Ohnenstetter, 1982*). La zone la plus favorable pour une éventuelle exploitation présente une superficie de l'ordre de 50 ha (*fig. 8*).

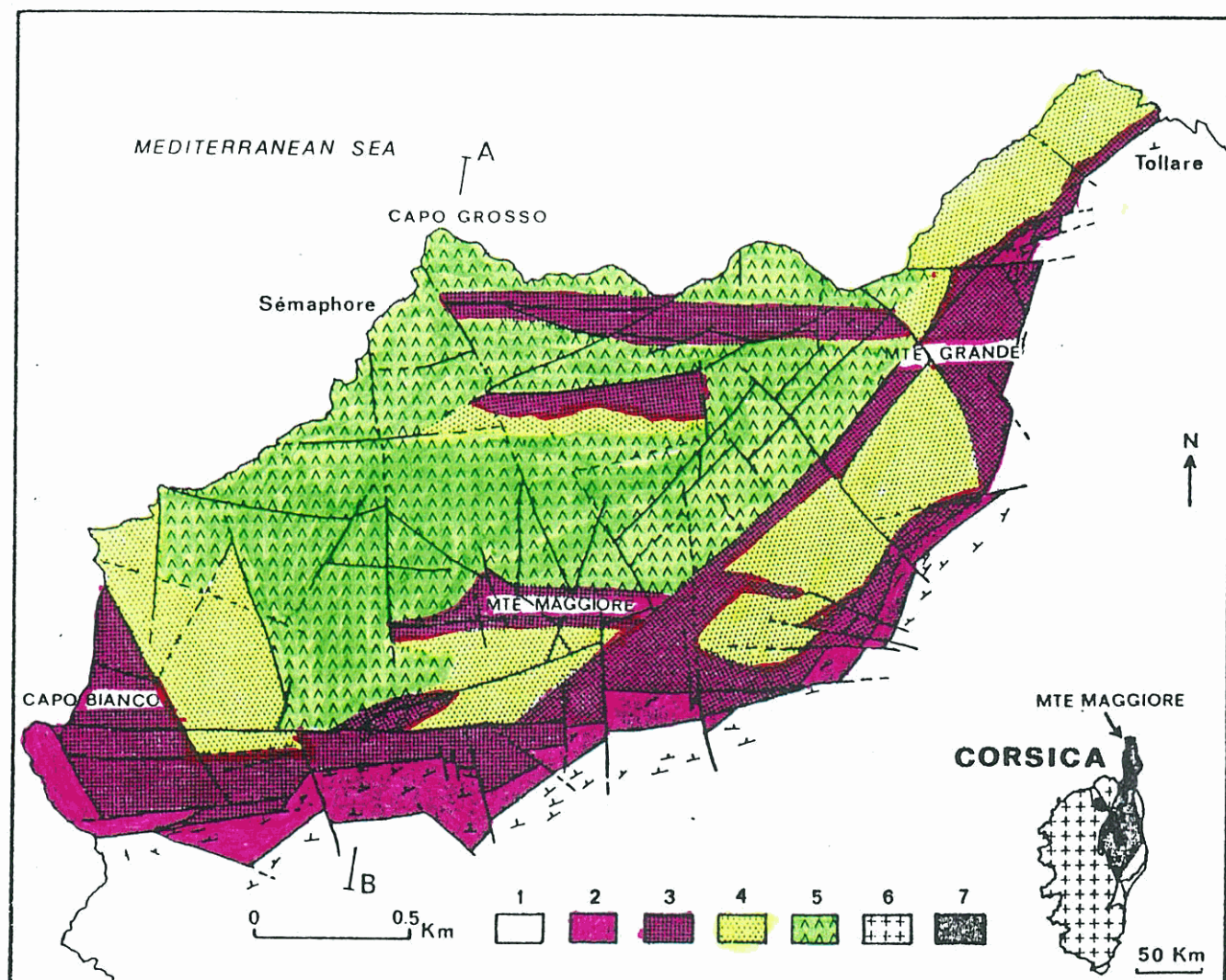
La composition chimique moyenne de ces péridotites, établie à partir d'échantillons de surface, serait compatible avec une utilisation en sidérurgie (*Le Berre et Grès, 1986*) : MgO de 39 %, perte au feu de 5 %, bien que les olivines couramment utilisées en sidérurgie aient généralement une teneur en magnésie de 45 à 49 %.

Mais l'homogénéité du matériau dans le gisement et les réserves exploitables demeurent inconnues. Par ailleurs, le prix de revient du matériau après extraction et traitement, et son coût de transport jusqu'à l'usine sidérurgique la plus proche, celle de Fos, par exemple, restent à établir pour vérifier la possibilité d'une concurrence avec l'olivine actuellement importée. Mais celle-ci est peu probable en raison du faible coût rendu port français du matériau importé, de l'absence d'installations portuaires adaptées à proximité de ce gisement, sans compter le poids des contraintes environnementales dans cette région du Cap Corse.



- Contour des principaux massifs cristallins anciens.
- Massifs ultrabasiques (l'échelle de la carte n'a pas permis de figurer ces massifs en vraie grandeur).
- Province péridotique limousine.
- Péridotites hercyniennes de la Brévenne.
- Lherzolites pyrénéennes.

Fig. 7 – Provinces péridotiques en France
(d'après Forestier, 1962).



1. Zone des gneiss de Centuri.
2. Unités ophiolitiques métamorphosées (gabbros, laves et métasédiments).
3. Serpentinites massives ou cisailées.
4. Péridotites très serpentinisées.
5. Péridotites peu serpentinisées.
- Failles présumées.
- Failles.

Fig. 8 – Massif de péridotite du Monte Maggiore, Corse
(d'après Ohnenstetter, 1982).

5.1.2. Pyrénées

Parmi les gîtes de lherzolite (péridotite à olivine, clinopyroxène, hypersthène) reconnus dans les Pyrénées, des études préliminaires avaient permis de sélectionner 5 sites susceptibles de présenter un intérêt en raison de leur faible serpentinitisation, de la composition chimique favorable du matériau et de l'importance des réserves possibles (Galharague *et al.*, 1983). Les principales caractéristiques de ces gîtes sont résumées dans le tableau 20.

Nom du gîte	Altitude (m)	Superficie des affleurements	Serpentinisation	Chimisme		Accès	Réserves possibles Mt
				MgO %	H ₂ O %		
Etang de Lherz (Ariège)	1250-1555	48 ha	faible	39,45	3,10	facile	60
Tuc Desse (Haute-Garonne)	700-1237	60 ha	faible	39,90	2,00	difficile	30 à 40
Bois de la Pinouse (Ariège)	1680-1720	70 ha	faible	39,25	0,68	assez facile	24
Pic de GERAL (Ariège)	1775	10 ha	faible	42,55	3,10	assez facile	4
Bois du Fajou (Ariège)	1200-1450	18 ha	faible	39,43	0,35	difficile	30

Tabl. 20 – Principales caractéristiques des lherzolites des Pyrénées.

Parmi ces 5 sites, 3 au moins doivent être écartés pour des raisons d'environnement et d'accès. En définitive, seuls les gîtes du Bois de la Pinouse et du Pic de GERAL, situés à une douzaine de kilomètres au nord d'Aix-les-Thermes, dans l'Ariège, qui constituent en fait un seul et même site, semblent offrir des conditions compatibles avec les contraintes d'exploitation d'une carrière. Toutefois, une étude technico-économique a montré que le coût de transport (130 F/t en 1983) de la lherzolite de ce gisement jusqu'à Fos enlevait toute compétitivité à ce matériau (Rozes, 1983).

5.1.3. Massif Central

Les gîtes de péridotites recensés sont de petite taille et souvent très serpentinisés ; aucun ne présente d'intérêt économique. A titre indicatif, on peut néanmoins citer :

- Région de Thiviers, Dordogne (24) :

- le massif de la Robière (2 km x 0,4 km), à 5 km à l'WNW de Thiviers, a la composition d'une harzburgite serpentinisée dont l'analyse moyenne est la suivante (%) :

SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	(+ FeO)	CaO	CO ₂	H ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O
40	33,5	8	3,5	2,5	1	11	3,2	0,3

- le massif de Sarrazac (1 km x 0,5km), à l'ENE de Thiviers, est composé en partie de serpentinites montrant d'assez nombreuses reliques de péridotite ; leur composition moyenne est la suivante :

SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	(+ FeO)	CaO	CO ₂	H ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O
38	35	7	3	2	0,5	8	6	0,5

- Région d'Uzerches, Corrèze (19)

Massifs du Plantadis (amande de 800 m sur 300 m) et du Châtenet Nord (tout petit) près de Le Lonzac, à 15 km au NE d'Uzerches, entièrement constitués d'une olivinite à amphibole et magnétite.

- Région de Châlus

Les péridotites peu ou pas serpentinisées ne sont signalées qu'à Cussac, Champagnac et La Boissonie :

- à Cussac, c'est une harzburgite, l'olivine est à 49 % MgO et 9 % FeO, l'hypersthène à 32 % de MgO et 8 % FeO ;
- à Champagnac et la Boissonie, c'est une lherzolite légèrement feldspathique composée essentiellement d'olivine à 49 % MgO, l'hypersthène est à 31 % MgO et 11 % FeO.

5.2. APPROVISIONNEMENT DE LA FRANCE EN OLIVINE

La France ne produit pas d'olivine. Celle-ci est donc totalement importée, exclusivement de Norvège, soit directement, soit indirectement à partir d'autres pays importateurs européens, pour satisfaire les besoins des différentes industries utilisatrices.

Dans les statistiques douanières françaises, l'olivine ne figure pas nominativement. Aussi est-il très difficile d'avancer des estimations de tonnages importés annuellement, avec l'assurance que ces dernières correspondent réellement et exclusivement à de l'olivine.

Une rubrique douanière générale donne, sous le numéro 25 17, les quantités et valeurs des imports-exports de la France en "cailloux et pierres concassées pour béton et routes, silex, granulés et poudre de pierre". La description de la sous-rubrique 25 17 49 00, "Granulés, éclats et poudres, même traités thermiquement, de travertins, d'écaussines, d'albâtre, de granit, de grès, de porphyre, de syénite, de lave, de basalte, de gneiss, de trachyte et autres pierres des numéros 25 15 et 25 16" [...] permet de supposer que l'olivine pourrait être incluse dans ce groupe de substances ("granulés – éclats et poudres" [...], "autres pierres"), les descriptions des autres sous-rubriques, beaucoup plus précises, excluant la prise en compte possible de l'olivine.

A titre indicatif, on trouvera dans le tableau 20 les quantités importées de Norvège sous cette rubrique douanière 25 17 49 00, au cours de ces dernières années.

Année	Valeur (kF)	Quantité (t)	Prix moyen (F/t)
1993	31 544	266 071	118
1997	31 300	302 387	103
1998	42 194	431 551	98
1999	47 689	281 470	169

Source : Direction des douanes françaises.

Tabl. 21 – Evolution des importations en France des substances minérales regroupées sous la rubrique douanière 25 17 49 00, en provenance de Norvège, dont tout ou partie pourrait correspondre à de l'olivine/dunite.

En outre, on notera que selon les estimations de la Société Générale des Métaux (SOGEMET), principale société de négoce d'olivine en France, la France importerait de Norvège environ 400 000 t/an de sable d'olivine mouillé, pour un coût moyen de 90 – 100 F/t et 25 000 t/an de sable d'olivine séché, pour un coût moyen estimé à 600 – 1 000 F/t, suivant les granulométries et les qualités. On remarquera que le coût moyen

de la tonne de sable mouillé estimé par la SOGEMET correspond assez bien au coût moyen résultant des statistiques douanières françaises sous la rubrique 25 17 49 00 (tabl. 21), sauf pour 1999 pour laquelle le prix moyen calculé est beaucoup plus élevé.

6. Coûts

Le coût d'exploitation de l'olivine/dunite brute peut varier de 7 à 15 USD/t en fonction des conditions du gisement. Le prix à la tonne de l'olivine avant traitement peut augmenter considérablement, en fonction du coût de transport du minerai brut jusqu'à l'usine de traitement et de la quantité de minerai brut nécessaire pour obtenir l'olivine de qualité marchande.

Les coûts de traitement en usine sont également très variables, suivant que le minerai peut être traité à sec ou s'il nécessite un traitement par voie humide ou par calcination.

Les prix indicatifs du marché communiqués par Industrial Minerals en juillet 2000 étaient les suivants, pour les différentes qualités de produits :

- Olivine norvégienne

En vrac, concassée (pour haut fourneau), prix CIF :	108 – 156 F/t
Granulat pour réfractaires, calibré et séché, en vrac, départ usine :	600 – 660 F/t
Sable de fonderie, calibré, séché, en vrac, départ usine :	528 – 672 F/t
Sable de fonderie, calibré, séché, en sacs, départ usine :	624 – 672 F/t
Sable pour revêtement de goulotte, en sacs :	840 – 912 F/t

- Olivine américaine (départ usine)

Granulat, en vrac :	50 – 78 USD/t
Sable de fonderie, qualité AFS 30-180, en vrac:	60 – 110 USD/t
Sable de fonderie, qualité AFS 30-180, en sacs :	77 – 125 USD/t
Farine d'olivine, en sacs :	117 USD/t

D'après la Société Générale des Métaux (SOGEMET), principale société de négoce de l'olivine en France, les coûts des olivines norvégiennes importées en France sont approximativement les suivants :

Sable mouillé en vrac, pour haut fourneau, par bateau complet rendu port français :	90 – 100 F/t
--	--------------

Sable calibré et séché, à différentes granulométries, pour fonderie, sablage, découpe au jet d'eau..., rendu port français ou frontière :	600 – 1 000 F/t
---	-----------------

A titre indicatif, on notera que d'après les statistiques de la Direction des douanes françaises pour 1999, avec toutes les réserves exposées dans le paragraphe 5.2 concernant la nature exacte des substances minérales reprises sous la rubrique douanière 25 17 49 00, on peut admettre que le coût moyen des olivines ou substances voisines importées de Norvège était de 169 F/t, alors qu'il était de 233 F/t en provenance de Belgique et du Luxembourg, de 255 F/t en provenance d'Allemagne et de 781 F/t en provenance d'Italie, les qualités importées de ces derniers pays étant probablement différentes ou plus élaborées.

7. Produits de substitution

En sidérurgie, la dolomie est parfois utilisée comme conditionneur de laitier dans certains pays qui disposent de ressources importantes de cette roche, et qui ne possèdent pas de gisement d'olivine/dunite, voire uniquement des gisements altérés, de mauvaise qualité industrielle.

En fonderie, malgré les désavantages qu'il présente par rapport à l'olivine, et surtout les risques pour la santé, le sable siliceux est encore le plus utilisé dans de nombreux pays, y compris en France, en raison de son faible coût. La fonderie utilise également des sables de chromite, de zircon et de staurotide dont les performances sont meilleures, mais ils sont aussi plus coûteux en France et en Europe qui n'en produisent pas. Ils sont essentiellement importés d'Australie, d'Afrique du Sud et de Finlande.

Dans la filière des abrasifs, selon les produits manufacturés et les utilisations, l'olivine entre en concurrence avec de nombreuses autres substances : la bauxite et l'alumine électro-fondue, l'oxyde de cerium, le corintin et l'émeri, les diamants, la diatomite, les feldspaths, l'hématite, le grenat, la magnétite, la syénite néphélinique, la perlite, la ponce, les scories de charbon et de sidérurgie, la staurotide, le tripoli, le carbure de silicium, l'ilménite, sans compter les sables siliceux.

Dans la fabrication des réfractaires, suivant la famille de réfractaires et la destination des produits, outre l'olivine, on utilisera suivant les cas : l'andalousite, la bauxite, la chromite, le disthène, la dolomie, le graphite, la magnésite, la pyrophyllite, des argiles réfractaires (très riches en kaolinite), de la silice, de la sillimanite, du zircon... Pour la fabrication des radiateurs à accumulation de chaleur, on préfère utiliser aujourd'hui la magnétite plutôt que l'olivine.

Comme source de magnésie, l'olivine (45 – 51 % MgO) peut être remplacée par de la magnésite (47,8 % MgO), voire de la dolomie (20 % MgO).

Pour la fabrication des fertilisants, la dolomie, la magnésite et le sulfate de magnésium peuvent se substituer à l'olivine.

Dans la famille des agents de filtration, suivant les spécifications industrielles exigées et la nature des produits à filtrer, outre l'olivine, on utilisera plutôt l'une des substances suivantes : le charbon actif, l'amiante, la cellulose, la diatomite, le grenat, la magnétite, la perlite, la ponce, le sable siliceux, l'ilménite...

Bibliographie

- AFANSA'EV A.P. (1988) – "Olivinites from overburden of the Kovorsk phlogopite deposits. A new source of Raw materials for refractories production", traduit de Ogneupory, n° 12, Plenum Publ., pp. 23-27.
- AFZALI H. et GRES M. (1988) – L'olivine. Mémento roches et minéraux industriels. Rapport BRGM inédit.
- Anonyme (1975) – Monografias de Rocas Industriales – Dunita y Olivino. Instituto Geologico y Minero de Espana, 1975, 49p.
- ASHBY G. (1982) – The future for mineral sands in the foundry industry. 5^{ème} Congrès Minéraux Industriels Madrid (1980).
- AUBOUIN J., BROUSSE R., LEHMAN J.P. (1975) – Précis de géologie : Pétrologie. Dunod Université. France.
- BARIAND P., CESBRON F., GEFFROY J. (1977) – Les minéraux : leurs gisements, leurs associations. Editions : Minéraux et Fossiles – France.
- BAUMGART W. (1981) – Fifty years of utilisation of olivine. 4th "Industrial Minerals" International Congress. Atlanta. pp. 185-188.
- Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF) (2000) – Communication orale.
- CMPP (1974) – Comptoir de minéraux et matières premières : Publication sur olivine de Norvège. Paris – France.
- Comptoir des Minéraux et Matières Premières (CMMP) (2000) – Communication orale.
- Direction Nationale des Statistiques du Commerce Extérieur (DNSCE) de la Direction des Douanes (1990 à 1999). Statistiques annuelles des importations et exportations de la France.
- Fédération des Chambres Syndicales des Minerais, Minéraux Industriels et Métaux Non Ferreux (2000) – Communication orale.
- FORESTIER F.H. (1962) – Les péridotites serpentinisées en France. Bull. BRGM n° 2, 1962.
- GALHARAGUE J., LE POCHAT G., ROZES B. (1983) – Recherche de substances utilisables comme fondants magnésiens pour l'industrie sidérurgique dans le Grand Sud-Ouest. Rapport BRGM 83 SGN 842 MPY – AQI, décembre 1983.

- GERARD J. (1970) – Principaux gisements de roches ultrabasiques en France et dans les pays méditerranéens. Note préliminaire. Note BRGM-SGR Provence – Corse, inédite, mai 1970.
- GRES M. (1978) – Sources possibles de dunité et d'olivine en France. Rapport interne BRGM (RMI).
- GRIFFITHS J. (1984) – Olivine – Exchanging new uses for old. Industrial Minerals, septembre 1984, pp. 65-79.
- GRIFFITHS J. (1989) – Olivine – Volume the key to success. Industrial Minerals, Janvier 1989, pp. 25-35.
- HARBEN P.W. (1999) – "Olivine", The Industrial Minerals Handybook, 3rd ed., Industrial Minerals Information Ltd, Worcester Park, Surrey, UK, pp. 147-149.
- HARBEN P.W. and KUZVART M. (1997) – "Olivine", in Industrial Minerals – A. Global Geology. Industrial Minerals Information Ltd, London, pp. 276-279.
- HARBEN P.W., BATES R.L. (1984) – Geology of the non-metallics: Olivine. Published by Metal Bulletin Inc. New York – USA.
- HENNING R.J. (1994) – "Olivine and dunité", Industrial Minerals and Rocks, 6th ed., D.D. Carr, ed, Soc. for Mining, Metall., and Explor., Inc. Littleton, Colorado, pp. 731-734.
- HERNANDEZ J. (1973) – Le volcanisme tertiaire des monts Forez (Massif central français). Bull. Soc. Min. Crist.. 96, pp. 303-312, France.
- LE BERRE P. et GRES M. (1986) – Etude préliminaire du gisement de péridotite du Monte Maggiore (Cap Corse). Possibilités d'utilisation comme fondant en sidérurgie. Rapport BRGM 86 GEO SED 058, juillet 1986, 8 p.
- LKAB (2000) – Site internet : <http://www.lkab.com/prod>.
- OHNESTETTER M. (1982) – Magmatic and tectonic events in an oceanic diapir: evidence from the Monte Maggiore massif, Corsica. Thèse, Nancy, 1982, pp. 529-579.
- ROZES B. (1983) – Projet de carrière de lherzolite dans les Pyrénées. Rapport BRGM 83 SGN 333 GMX, mai 1983, 21 p.
- SKILLEN A. (1995) – Olivine – Long live the evolution. Industrial Minerals, février 1995, pp. 23-31.
- SMITH C.S., Jr (1992) – Olivine, the industrial mineral. SME pre-print n° 92-102, SME Annual Meeting, Phoenix, AZ.

SOGEMET (2000) – Communication orale.

SOLLAC Atlantique (2000) – Communication orale.

SUTTIL K. (1987) – Norwegian olivine. Engineering Mining Journal, Sept. 1987, pp. 34-39.

Syndicat des Fabricants de Produits Réfractaires (2000) – Communication orale.

TEAGUE K.H., (1983) – "Olivine", Industrial Minerals and Rocks, 5th ed., Vol. 2, S.J. Lefond, ed, AIME, New York, pp. 989-996.

Usinor Achats (2000) – Communication orale.

WATSON I. (1980) – Olivine and dunite. Slag uses foster right market. Industrial Minerals, décembre 1980, pp. 57-63.

WEN LU (1998) – Chinese Minerals Directory, 2nd ed., Industrial Minerals Information Ltd, Worcester Park, Surrey, UK.

BRGM
SERVICE RESSOURCES MINERALES
Unité Economie et Matériaux
BP 6009 – 45090 Orléans cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34