

## NICKEL 1992

**MATIÈRES PREMIÈRES** : teneur moyenne de l'écorce terrestre : 80 ppm.

Dans les minerais, Ni est souvent associé à Fe, Cu, Cr et Co.

**Minerais** : deux principaux types :

Sulfurés (65 % de la production), sous forme de pentlandite,  $(Ni,Fe)_9S_8$ , associée, en général, à de la pyrrhotite ( $Fe_7S_8$ ), de la pyrite ( $FeS_2$ ) et de la chalcopyrite ( $CuFeS_2$ ).

Les exploitations minières sont, en général, souterraines.

- Les minerais ont des teneurs de 0,7 à 3 % de nickel et contiennent du cuivre (environ 1 %), des platinoïdes, du cobalt, de l'argent et de l'or, qui sont récupérés (voir plus loin les productions d'Inco). Ils sont concentrés par flottation à des teneurs de 10 à 15 % de Ni.

- Ces minerais sont exploités en Australie de l'Ouest, dans l'ex URSS, au Canada (Manitoba et Ontario : mine de Sudbury, le plus important gisement mondial de minerais sulfurés, réserves de 400 millions de t de minerais tout-venant), en Chine, Afrique Australe, Finlande.

Oxydés (35 % de la production de Ni, en Indonésie, République Dominicaine, Nouvelle Calédonie). Ces minerais sont exploités à ciel ouvert et ne peuvent pas être concentrés par voie physique. Ils ne contiennent pas de cuivre ni de métaux précieux, mais renferment du cobalt. On distingue :

- Les latérites nickelifères (limonites) dans lesquelles Ni se substitue au fer dans la goethite ( $FeOOH$ ). Ce sont des minerais pauvres qui contiennent de 1 à 1,5 % de Ni et outre Fe (40 à 50 %), Co (0,1 à 0,2 %), Cr (2 à 5 %). Ils sont exploités à Cuba, en Australie (Queensland), en Grèce et sont présents en couverture de tous les gisements de minerais silicatés.

- Les minerais silicatés (sapolites) dans lesquels Ni se substitue au magnésium de la serpentine ( $3MgO, 2SiO_2, 2H_2O$ ). On obtient la garniérite est le minerais de Nouvelle-Calédonie (le plus important gisement mondial de minerais oxydés), sa teneur en Ni est de 2,3 à 3 % et le minerais contient, outre  $MgO$  et  $SiO_2$ , 10 à 30 % de Fe et du Co. Ces minerais sont également exploités en Colombie et à des teneurs plus faibles en Indonésie, République Dominicaine, Philippines, Brésil...

**Productions** : en 1992, en milliers de t de Ni contenu. Monde : 947, Union européenne (Grèce) : 16

ex URSS	266	Australie	58
Canada	192	Chine	33
Nlle-Calédonie	101	Cuba	32

Indonésie	78	République Dominicaine	29
-----------	----	------------------------	----

- La plus grande partie de la production de l'ex URSS provient de Norilsk, en Sibérie du Nord, près de l'estuaire du Ienisseï et de la péninsule de Kola.
- Pour Cuba, le nickel est la deuxième source de devises, après le sucre.
- Au début des années 70, le Canada et la Nouvelle Calédonie représentaient 75 % de l'offre de Ni. Actuellement leur part est de 48 %.

**Réserves mondiales** : 50 millions de t de métal contenu (dont 80 % de minerais oxydés). Répartition :

Nlle Calédonie	17 %	Philippines	4 %
Canada	14 %	Australie	8 %
ex URSS	11 %	Cuba	2 %
Indonésie	6 %		

**Situation française** en 1992, en milliers de t de Ni contenu : production minière de Nlle-Calédonie.

- L'exploitation de Ni a représenté 90 % des exportations de l'île en 1990.
- Production : 100,5 (soit de l'ordre de 5,6 millions de t de minerai humide).
- Exportations : 52, soit 2 millions de t de minerai, principalement vers le Japon (1,4 million de t de minerai). Les exportations sont effectuées, en grande partie par des mineurs indépendants de la SLN. Les exportation de la SLN, à destination du Japon, n'ont représenté, en 1993, que 177 476 t de minerai. Le minerai en provenance de Nouvelle Calédonie représente la moitié de l'approvisionnement des producteurs japonais de ferronickel.
- Depuis le début de l'exploitation des gisements de Nouvelle-Calédonie, 155 millions de t de minerai ont été extraites (3,3 millions t de Ni). L'extraction a culminé en 1971 : 7,7 millions de t de minerai.
- Jusqu'en 1950, la teneur exploitée dépassait 5 %. Actuellement la teneur est comprise entre 2,3 et 2,8 %.
- La société Le Nickel (SLN) extrait environ la moitié du minerai calédonien dans 2 centres miniers situés sur la côte Est : Thio et Kouaoua (mine de Méa) et 1 sur la côte ouest : Népoui (site de Kopeto) qui a été réouvert mi-1994 après avoir été en activité de 1969 à 1987. La production, en 1993 a été de 1,73 million de t de minerai humide. D'autres producteurs exploitent, soit pour la SLN (0,69 million de t de minerai humide), soit en propre, des gisements à : Ouaco, Kouaoua, Nakéty, Monéo, Kaala-Gomen. Le gisement de la SLN de Kaala-Gomen est exploité par des sous-traitants.
- La société Inco a acheté, en 1992, au BRGM, les droits d'exploitation de la zone de

Goro (sud de l'île) dont les réserves seraient de 165 millions de t de minerai à 1,57 % de Ni.

**MÉTALLURGIE** : dans le cas du minerai oxydé de Nouvelle-Calédonie.

**Réduction** : le minerai, riche en eau (25 %), est séché, puis, après ajout de 50 kg d'antracite par t de minerai sec, calciné à 1000°C dans des fours rotatifs (95 m de long, 4 m de diamètre). Une première réduction des oxydes métalliques a ainsi lieu, à l'état solide.

Le minerai est ensuite réduit en phase liquide dans des fours électriques de type Demag. Le métal (ferronickel de 1ère fusion) sur lequel surnagent des scories est coulé dans des poches de 18 t. Les scories sont granulées à l'aide d'eau de mer et utilisées pour des remblaiements.

- Four Demag : cuve : 33 m de long, 13 m de large, 5,5 m de haut. Puissance nominale : 33 000 kW, utilise 6 électrodes de 1,4 m de diamètre. Le rendement est de 97 % et la consommation électrique : 19 000 kWh/t de Ni.

Une tonne de minerai donne 110 kg de ferronickel (contenant 24 à 29 kg de Ni).

**Affinage du ferronickel de 1ère fusion** : consiste à enlever des proportions variables de C, S et Si selon la qualité désirée de ferronickel, et le fer pour l'obtention des mattes.

- Production de ferronickel (contient de 24 à 26 % de Ni) :

- Désulfuration et soufflage de O<sub>2</sub> pour maintenir le métal en fusion : une partie du Si est oxydée. Donne les grenailles (75 % de la production, destinées à alimenter les convertisseurs sidérurgiques) et les qualités courantes de ferronickel livrées en lingots de 15 à 25 kg.

- La production occidentale de ferronickel est d'environ 0,5 million de t (170 000 t de Ni contenu) soit 3 à 4 % de la production occidentale de ferro-alliages. La société SLN est le 1er producteur mondial de ferronickel.

- Production de mattes (destinées à l'élaboration de Ni) :

- Sulfuration et déferrage par injection de S liquide. Donne une "matte synthétique" (10 à 15 % de S) dans des convertisseurs Pierce-Smith de 60 t, puis soufflage d'air et ajout de SiO<sub>2</sub> jusqu'à obtention d'un produit intermédiaire.

- Un affinage secondaire, dans des convertisseurs de 20 t, donne des mattes "de qualité industrielle" (sulfure de nickel : 75 % Ni-25 % S). Les mattes contiennent outre un peu de fer, du cobalt qui est récupéré lors de l'élaboration du nickel.

Exemple : usine de Doniambo (Le Nickel-SLN, Nouméa, Nouvelle-Calédonie), en 1993 :

Traite le minerai calédonien à l'aide de 3 fours électriques de type Demag.

- Consommation de minerai brut : 2,3 millions de t/an, consommation électrique : 900

000 MWh/an.

- Capacités de production : 50 000 t/an de Ni contenu dans le ferronickel et les mattes.
- Effectifs (personnel SLN des mines et usine) : 1 959 personnes.
- Productions (en milliers de t de Ni contenu) : 47,7 dont :
  - Ferronickel : 80 % du nickel contenu.
  - Mattes : 20 % du nickel contenu.
- Le maximum de production a été atteint en 1975 : 71 000 t de Ni contenu (3/4 ferronickel-1/4 mattes).
- La totalité du ferronickel est exportée (25 % vers la métropole, d'où une partie est réexportée en Europe, le reste vers l'Australie). En 1991, signature d'un accord entre SLN et Nisshin Steel, premier producteur japonais d'aciers inoxydables laminés à froid : la SLN doit livrer 5 000 t/an de ferronickel à compter de 1994.
- La totalité des mattes est exportée vers la métropole pour être transformée à Sandouville.

### **Affinage des mattes par hydrométallurgie :**

- Lessivage : après broyage, les mattes sont dissoutes par une solution de chlorure ferrique, en présence de  $\text{Cl}_2$ .  $\text{Ni}^{2+}$  et les ions des impuretés métalliques (Fe, Co, Cr...) passent en solution (en présence d'ions  $\text{Cl}^-$ ). Le soufre éliminé lors de cette opération est récupéré.
- Purification de la solution de  $\text{Ni}^{2+}$ , par extractions successives des diverses impuretés à l'aide de solvants organiques ou de résines échangeuses d'ions.
- Extraction des ions  $\text{Fe}^{3+}$  par du tributyl-phosphate. La solution de  $\text{FeCl}_3$  est recyclée, l'excès commercialisé et utilisé dans le traitement de l'eau potable.
- Extraction du Co par du tri-iso-octylamine. Co est récupéré sous forme de chlorure de Co.
- Extraction des autres impuretés : Pb à l'aide d'une électrolyse sélective, les autres impuretés ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  ...) par résines et charbon actif.
- Électrolyse de la solution de  $\text{Ni}^{2+}$  : les anodes sont insolubles. Ni se dépose sur des cathodes constituées de feuilles minces de Ni. Ni obtenu est à plus de 99,97 %. Les cathodes sont débitées en "carrés" et livrées en fûts de 200 ou 250 kg.

Exemple : usine de Sandouville (SLN, 76), en 1993. L'usine date de 1978. Elle traite les mattes calédoniennes. Capacités annuelles de production : 16 000 t de Ni dont 13 000 t de cathodes et 3 000 t de Ni pour la production de chlorure de nickel.

- Sous-produits obtenus (en capacités annuelles de production) : Co : 600 t (sous forme de chlorure de Co),  $\text{FeCl}_3$  : 1 000 t, S : 4 000 t.
- Effectifs : 200 personnes.

- Production : 10 375 t de cathodes et sels de Ni, 165 t de Co (en 1989). Eramet-SLN est le 1er producteur mondial de chlorure de Ni.

**Recyclage** : fournit 50 % du Ni destiné à la production des aciers inoxydables (Ni contenu dans les aciers inoxydables est réutilisé lors du recyclage de ces aciers) et 20 % des autres utilisations.

**PRODUCTIONS** : en 1992, en milliers de t de Ni contenu dans Ni raffiné, les sels et les ferronickels. Monde : 857, Union européenne (hors Nouvelle-Calédonie) : 52.

ex URSS	230	Australie	51
Canada	122	Nouvelle Calédonie	32
Japon	107	Chine	32
Norvège	56	Royaume-Uni	28

- En 1993, production de 556 000 t dans le monde occidental.

- Seulement 9 000 t de production aux États-Unis : (41 000 t en 1984).

- Exportations: Canada: 102 800 t, Norvège: 53 900 t.

- En 1993, les exportations russes ont été d'environ 90 000 t stockées pour moitié dans les entrepôts du LME (London Metal Exchange).

**Producteurs** : principaux groupes mondiaux, productions de 1991, en milliers de t. INCO (Canada) : 168 (en 1993 soit 34 % du marché occidental)

Falconbridge (Canada) : 87

Western Mining (Australie) : 54

Eramet-SLN (France) : 46 (en 1993)

- Falconbridge (contrôlé depuis 1989, à égalité par Noranda (Canada) et Trelleborg (Suède)) détient des mines et fonderies au Canada (45 000 t/an) et en République Dominicaine (87 % de Falcondo, 32 000 t/an) et une fonderie en Norvège (60 000 t/an).

**INCO** (International Nickel Company of Canada) : en 1993.

Au début des années 60, détenait 65 % du marché et jusqu'à la fin des années 70 fixait le prix de vente du nickel. Depuis, la notion de prix producteur a disparu. Les prix sont désormais négociés, en général, trimestriellement. Le nickel est actuellement coté au LME (London Metal Exchange, bourse des métaux de Londres), la cote servant d'indicateur pour les négociations acheteurs-vendeurs.

- Chiffre d'affaires : 2 130 millions de \$ réalisé dans : Ni 1ère fusion : 56 %, alliages : 24 %, cuivre affiné : 10 %, autres métaux de 1ère fusion : 8 %.

- Effectif : 16 087 personnes.

- Production : 167 000 t de Ni.

- Réserves (en millions de t) : Canada, Ni : 5,4, Cu : 3,8; Nouvelle Calédonie, Ni : 2,8; Indonésie, Ni : 4,6; Brésil, Ni : 1,5; Guatemala, Ni : 1,3.

- Produit également 13 autres métaux principalement dérivés de ses minerais canadiens : du Cu (117 500 t), du Co (1,3 t), des métaux précieux (Ag : 41 t, Au : 1,3 t), des platinoïdes (Pt : 3,6 t, Pd : 4,8 t, Rh : 0,4 t)...
- Mines : au Canada, dans les régions de Sudbury (Ontario), d'une teneur moyenne de 1,23 % de Ni et 1,21 % de Cu et de Thompson (Manitoba) d'une teneur moyenne de 2,53 % en Ni et en Indonésie, île de Sulawesi par sa filiale à 58 % : P T Inco.
- Participation de 62 % dans la société TVX Gold qui exploite 6 mines d'or et d'argent en Amérique : production de 9,8 t d'or et 252 t d'argent, participation vendue en 1993.
- Métallurgie (en milliers de t de capacités annuelles) par Inco Alloys International (IAI) qui produit en particulier les aciers "Inconel" : au Canada, en Ontario (100) à Copper Cliff et Port Colborne et au Manitoba à Thompson (50), au Royaume-Uni à Clydach (54) et en Indonésie à Soroako (37).

#### **SITUATION FRANÇAISE** : en 1993.

- Chiffre d'affaires : 3 800 millions de F.
- Effectifs : 4 350 personnes, dans 13 entreprises.
- **Production métallurgique** (en Ni contenu) :
  - Ferronickel et mattes : 47 733 t à Doniambo.
  - Nickel électrolytique et sels de Ni : 10 375 t à Sandouville.

#### **Groupe Eramet**, constitué des sociétés Le Nickel-SLN et Erasteel, en 1993.

- Capital : Eramet est contrôlé par ERAP à 70 %, Elf Aquitaine à 15 % et Imétal à 15 %. Eramet détient 92 % de la Société le Nickel-SLN (en 1991, prise de participation du groupe japonais Nisshin Steel, qui atteint 8 %) et 100 % de Erasteel.
- Chiffre d'affaires des ventes : 2 629 millions de F réalisé à 68 % dans Ni, 32 % dans les aciers spéciaux.
- Effectifs : 2 744 personnes dont 1 985 en Nouvelle-Calédonie.
- Ventes : Ni : 46 311 t, aciers : 18 570 t.
- La filiale Erasteel concentre les activités dans les aciers spéciaux et en particuliers les aciers rapides destinés aux outils de coupe et la métallurgie des poudres. 1 175 personnes (56 % en Suède, 37 % en France). Usines à Commentry (03, France) et Söderfors (Suède) : production de 32 350 t d'aciers coulés.
- Participation de 25 % dans Eurotungstène Poudre (voir le chapitre tungstène).

#### **UTILISATIONS** :

**Consommations mondiales** : en 1992, en milliers de t de Ni. Monde : 811, Union européenne : 198.

Japon	145	Chine	54
États-Unis	124	France	35
ex URSS	97	Italie	29

Allemagne	71	Royaume-Uni	29
-----------	----	-------------	----

- En 1993, la consommation du monde occidental s'est élevée à 645 000 t.

**Répartition de la consommation** : en 1991 dans le monde occidental et ( ) en France.

Aciers inoxydables	60 % (55%)	Aciers, Fontes alliées	9 % (13 %)
Alliages, Superalliages	14 % (17 %)	Autres	7 % (11 %)
Traitements de surface	10 % ( 4 %)		

- La part de l'acier inoxydable était de 35 % en 1960.

### Utilisations diverses :

Nickelage : les pièces appelées chromées sont en fait essentiellement nickelées. Elles sont en acier recouvert par une couche de 20 à 30  $\mu\text{m}$  de Ni sur laquelle est déposée une mince pellicule de Cr (0,2 à 0,3  $\mu\text{m}$ ) destinée uniquement à faciliter l'entretien. Les pièces "chromées" sont concurrencées par les plastiques (pare-chocs) et les peintures. Les automobiles produites aux États-Unis contiennent environ 1 kg de Ni. L'industrie automobile représente de 6 à 8 % de la consommation de Ni du monde occidental.

Le nickelage a lieu selon deux méthodes : électrolytique ou chimique.

- Nickelage par électrolyse : méthode la plus courante. La pièce à revêtir constitue la cathode, l'anode est formée de "carrés" de Ni pur placés dans des paniers en Ti. La solution du bain d'électrolyse contient du sulfate et du chlorure de  $\text{Ni}^{2+}$ .

- Nickelage par réduction chimique : les pièces à revêtir sont immergées dans une solution d'ions  $\text{Ni}^{2+}$  contenant un réducteur (hypophosphite de  $\text{Na}^+$  ou borohydrures). Exemple de composition de bain, le nickelage étant effectué à 95-98°C et à pH 4,5-5, sous agitation :

Sulfate de nickel : 25 g/l, hypophosphite de sodium : 20 g/l, acide lactique : 25 g/l, acide propionique : 3 g/l.

La vitesse de dépôt est de 15  $\mu\text{m}/\text{h}$ . L'acide lactique qui agit comme complexant peut être remplacé par l'acide glycolique, citrique ou salicylique. Il permet d'éviter la précipitation de phosphite de nickel, peu soluble. L'acide propionique (ou l'acide acétique ou NaF) augmente la vitesse de dépôt. Fe, Ni, Au, Co, Al, Pd catalysent la réduction. Par contre, dans le cas du cuivre ou de ses alliages, il est nécessaire de réaliser un contact avec un métal catalytique pour amorcer la réaction.

On obtient ainsi des dépôts très durs, d'épaisseur uniforme. Par exemple 95 000  $\text{m}^2$  de pièces en acier destinées au traitement de UF6 dans l'usine Eurodif de Tricastin ont été revêtues selon ce procédé.

- Les fils de Al utilisés comme conducteurs électriques sont recouverts de Ni afin d'éviter les problèmes de contact liés à la présence de la couche d'alumine (isolante). Épaisseur de Ni : 1,5  $\mu\text{m}$ , dépôt électrolytique effectué à la vitesse de 300  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , pour un fil de 2 mm de diamètre.

#### Autres utilisations :

- Aciers : pour les aciers inoxydables, voir plus loin.
- de construction : Ni augmente la résistance mécanique.
- non fragiles à froid : 9 % de Ni.
- Invar : à 36 % de Ni. Possède un coefficient de dilatation nul. Utilisé comme matériau d'étalons secondaires de mesure, de bilames, en horlogerie pour annuler l'influence des écarts de température, pour les "shadow-mask" des écrans de téléviseurs couleur, pour les cuves de méthaniers (360 t/méthanier, 33 méthaniers dans le monde utilisant cet alliage)...
- Autres alliages : cupronickel (10 et 30 % de Ni), maillechorts (18 % Ni). Le maillechort et le monel (64 % de Ni) sont utilisés pour fabriquer des montures de lunette. Pour l'Union européenne, la commission de Bruxelles propose que la libération (par ressuage) des ions  $\text{Ni}^{2+}$  soit limitée à 0,5  $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{semaine}$  pour les objets en contact prolongé avec la peau.
- Alliage Ni-Cr (Ni : 60 %, Cr : 35 %, Si : 2 %, Mo : 1 %, Fe : 1 %) utilisé pour réaliser des couronnes et bridges dentaires.
- Alliage Inconel 600 : alliage à base de Ni contenant 13 % de Cr et 6 % de Fe. Cet alliage utilisé pour certaines pièces (manchons traversant le couvercle...) des réacteurs nucléaires à eau pressurisée des centrales françaises est sensible à la corrosion sous contrainte et les pièces présentent des fissures. Il sera remplacé par l'Inconel 690 à 29 % de Cr.
- Développement de l'utilisation d'un alliage Zn-Ni (à 13 % de Ni) pour la galvanisation de tôles pour automobiles.
- Pur : pièces françaises de 50 c, 1 F, 2 F et coeur des nouvelles pièces de 10 F, soit 3,5 % de la consommation française de nickel.
- Dans les batteries Ni-Cd (voir le chapitre consacré au cadmium).
- Comme catalyseur (Ni-Al) d'hydrogénation pour la fabrication de l'acide adipique.
- Alliages (Ni-Ti) à mémoire de forme (voir le chapitre consacré au titane).