

NICKEL 1994

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 minerai tout-venant), en Chine, Afrique Australe, Finlande.

- Début 1995, découverte au Canada du gisement de Voisey's Bay (Labrador) par la société Diamond Fields Resources Inc lors de la recherche de diamants. Le gisement est, depuis août 1996, la propriété de Inco. La production devrait débuter fin 1999, la capacité de production annuelle prévue étant de 120 000 t de Ni (soit 13 % de la consommation mondiale actuelle), 90 000 t de Cu, 3 000 de t de Co. Une partie du gisement, exploitable à ciel ouvert, renferme 32 millions de t de minerai à 2,83 % de Ni, 1,68 % de Cu et 0,12 % de Co. Une autre partie de 20 millions de t de minerai contient 3,5 % de Ni, 2,0 % de Cu, 0,14 % de Co.

Oxydés (35 % de la production de Ni). 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 minerais silicatés (sapolites) dans lesquels Ni se substitue au magnésium de la serpentine ($3MgO, 2SiO_2, 2H_2O$). On obtient la garniérite est le minerai de Nouvelle-Calédonie (le plus important gisement mondial de minerais oxydés), sa teneur en Ni est de 2,3 à 3 % et le minerai 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...

- 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. Ils sont exploités, depuis 1987, par des "petits mineurs" de

Nouvelle Calédonie, la production étant exportée en Australie pour être traitée par hydrométallurgie. Un projet de Inco est à l'étude pour traiter les latérites calédoniennes à Goro, à l'extrême sud de l'île, avec une production de 30 000 t de Ni en 2003.

Productions : en 1994, en 10^3 t de Ni contenu. Monde: 872, Union européenne (Grèce) : 19.

Russie	212	Chine	37
Canada	150	République Dominicaine	31
Nlle-Calédonie	96	Afrique du Sud	30
Indonésie	81	Cuba	27
Australie	80	Colombie	26

- En 1996, la production du monde occidental (hors Cuba, Russie et Chine) est de 686 000 t.
- La plus grande partie de la production russe provient de Norilsk, en Sibérie du Nord, près de l'estuaire du Ienisseï et de la péninsule de Kola.
- Au début des années 70, le Canada et la Nouvelle Calédonie représentaient 75 % de l'offre de Ni. En 1994, leur part est de 29 %.

Réserves mondiales : 50 millions de t de métal contenu (dont 80 % de minerais oxydés). Répartition : Nouvelle Calédonie : 17 %, Canada : 14 %, ex URSS : 11 %, Australie : 8 %, Indonésie : 6 %, Philippines : 4 %, Cuba : 2 %.

Situation française en 1995, en 103 t Ni contenu : production minière de Nlle-Calédonie.

- L'exploitation et le traitement de Ni représentent 30 % du PIB du Territoire et emploient environ 3 000 personnes.
- Production : 104,2 (soit 7 millions de t de minerai humide).
- Exportations : 51,9, soit 4,5 millions de t de minerai, principalement vers le Japon. Les exportations sont effectuées, en grande partie par des mineurs indépendants de la SLN. Les exportations de la SLN, à destination du Japon, n'ont représenté, en 1996, que 219 983 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 de 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 Kopéto) qui a été réouvert mi-1994 après avoir été en activité de 1969 à 1987. La production, en 1996, a été de 2,4 millions de t de minerai humide. D'autres producteurs exploitent, soit pour la SLN (0,56 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. Le domaine minier de la SLN comprend également les massifs de Tiébaghi (début d'exploitation prévu fin 1997) et de Koniambo. Au total, il y a 13 centres miniers (voir carte). Le groupe Sofinor, contrôlé par la Province Nord, regroupe les sociétés SMSP, Nouméa Nickel et Sominord.

- Projet d'échange entre le gisement de Koniambo (SLN) et celui de Poum (SMSP) afin d'alimenter l'usine métallurgique, en projet, de Falconbridge.

- La société Inco détient 85 % (le BRGM 15 %) des 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 et 0,16 % de Co.

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'anthracite 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 de 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 O₂ 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 SiO₂ jusqu'à obtention d'un produit intermédiaire.

- Un affinage secondaire, dans des convertisseurs de 20 t, donne des mattes de "qualité industrielle" constituées de 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 1996 :

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

- Consommation de minerai brut : 2,7 millions de t/an, consommation électrique : 900 000 MWh/an.

- Capacités de production : 55 000 t/an de Ni contenu dans le ferronickel et les mattes.

- Effectifs (personnel SLN des mines et usine) : 2 138 personnes.

- Productions (en 10³ t de Ni contenu) : 53,4 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 (20 % 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 livre 5 000 t/an de ferronickel depuis 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 Cl₂. Ni²⁺ et les ions des impuretés métalliques (Fe, Co, Cr...) passent en solution (en présence d'ions Cl⁻). Le soufre éliminé lors de cette opération est récupéré.

- Purification de la solution de Ni²⁺, par extractions successives des diverses impuretés à l'aide de solvants organiques ou de résines échangeuses d'ions.

- Extraction des ions Fe³⁺ par du tributyl-phosphate. La solution de FeCl₃ 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 (Cr^{3+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Cu^{2+} ...) par résines et charbon actif.

- Électrolyse de la solution de 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 1996. 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. Effectifs : 200 personnes.

- Sous-produits obtenus (en capacités annuelles de production) : Co : 600 t (sous forme de chlorure de Co), FeCl_3 : 1 000 t, S : 4 000 t.

- Production : 11 171 t de cathodes et sels de Ni, 174 t de Co. 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. En France, en 1994, le recyclage d'acier inoxydable a été de 21 000 t de Ni contenu pour une consommation dans la sidérurgie de 51 000 t de Ni. Aux Etats-Unis, en 1995, recyclage de 66 000 t qui représentent 34 % de la consommation.

PRODUCTIONS : en 1995, en 10^3 t Ni contenu dans Ni raffiné, les sels et les ferronickels. Monde : 915, Union européenne (hors Nouvelle-Calédonie) : 86.

Russie (1996)	213	Nouvelle Calédonie	42
Japon	133	Chine	38
Canada	122	Royaume-Uni	38
Australie	77	République Dominicaine	31
Norvège	53	Afrique du Sud	30

- Aux États-Unis, où la production était arrêtée depuis plusieurs années, le complexe mine-métallurgie situé près de Riddle dans l'Oregon a réouvert en mars 1995. Les ventes du stock stratégique des Etats-Unis ont été, en 1996, de 8 000 t.

- Exportations : Russie : 120 000 t, Canada: 80 400 t, Norvège: 67 100 t.

- Projet d'usine métallurgique, dans la région Nord de la Nouvelle-Calédonie, par la Société Minière du Sud-Pacifique (SMSP) associée à Falconbridge, 27 000 t/an de Ni.

Producteurs : principaux (58 % de la production mondiale) groupes mondiaux, en 10^3 t de production.

Norilsk (Russie)	213 (en 1996)	Western Mining (Australie)	83 (en 1995)
INCO (Canada)	187 (en 1996)	Eramet-SLN (France)	53 (en 1996)
Falconbridge (Canada)	87 (en 1991)		

- Western Mining est contrôlé par le groupe RTZ-CRA.
- 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 1996.

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 : 3 105 millions de \$ américain réalisé dans : Ni 1ère fusion : 60 %, alliages : 21 %, cuivre affiné : 11 %, autres métaux de 1ère fusion : 9 %.
- Effectifs : 16 308 personnes.
- Production : 187 000 t de Ni dont 143 000 t au Canada et 43 500 t en Indonésie, 27 % de la production mondiale de 1ère fusion.
- 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 59 % : P T Inco. Détient le gisement de Voisey's Bay.
- Réserves (en millions de t) : Canada, Ni : 22,7, Cu : 14,9; Nouvelle Calédonie, Ni : 2,8; Indonésie, Ni : 2,4; Brésil, Ni : 1,5; Guatemala, Ni : 1,3.
- Produit également 13 autres métaux principalement dérivés de ses minerais canadiens : du Cu (118 080 t), du Co (1,8 t), des métaux précieux (Ag : 49 t, Au : 1,8 t), des platinoïdes (Pt : 4,2 t, Pd : 4,6 t, Rh : 0,3 t)....
- 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 1995.

- Chiffre d'affaires : 4 037 millions de F.
- Effectifs : 4 334 personnes, dans 13 entreprises.

- Production métallurgique (en Ni contenu) :

- Ferronickel et mattes : 52 300 t à Doniambo, en Nouvelle-Calédonie.
- Nickel électrolytique et sels de Ni : 10 000 t à Sandouville.

Groupe Eramet, constitué des sociétés Le Nickel-SLN et Erasteel, en 1996.

- Capital : Eramet est contrôlé par ERAP à 55,5 %. Eramet détient 90 % de la Société le Nickel-SLN (en 1991, prise de participation du groupe japonais Nisshin Steel, qui atteint 10 %), 100 % de Erasteel et 51 % d'Eurotungstène Poudre. En 1997, contrôle 61 % du capital de Comilog, 3ème producteur mondial de manganèse, à Moanda au Gabon et producteur de ferro-manganèse (voir le chapitre manganèse).

- Chiffre d'affaires des ventes : 7 065 millions de F réalisé à 45 % dans le manganèse, 38 % dans Ni, 17,5 % dans les aciers rapides.

- Effectifs (y compris Comilog) : 6 685 personnes dont 2 138 en Nouvelle-Calédonie, 1 479 en France métropolitaine, 1 405 au Gabon.

- Productions : Ni : 53 413 t, aciers rapides : 25 228 t (36 % du marché du monde occidental), minerai de manganèse : 2 millions de t, ferro-manganèse, 337 000 t.

- La filiale Erasteel concentre les activités dans les aciers rapides destinés aux outils de coupe et dans les produits de métallurgie des poudres. 1 073 personnes (51 % en Suède, 40 % en France). Usines à Commentry (03, France) et Söderfors (Suède).

- Comilog, extrait du minerai de manganèse à Moanda, au Gabon, et produit du ferro-manganèse, en France, à Boulogne-sur-Mer, en Chine et dans divers autres pays (voir le chapitre manganèse).

- Eurotungstène Poudre (voir le chapitre tungstène).

UTILISATIONS :

Consommations mondiales : en 1994, en 10³ t de Ni. Monde (1996) : 930, Union européenne : 265. La consommation russe était, en 1988, de 180 000 t.

Japon	178	Chine	42
États-Unis	130	Corée du Sud	41
Allemagne	89	Royaume-Uni	37
Italie	45	Russie	35
France	44	Finlande	29

En 1996, la consommation du monde occidental a été de 838 000 t dont 309 000 t en Europe, 185 000 t au Japon, 171 000 t en Amérique du Nord.

Répartition de la consommation : en 1994 dans le monde occidental.

Aciers inoxydables	62 %	fontes alliées	11 %
Alliages, superalliages	12 %	Traitements de surface	10 %

- L'utilisation dans les aciers inoxydables représente, en 1995, 65 % de la consommation totale de nickel. Cette part était de 35 % en 1960 et de 46 % en 1974.
- Le nickel est consommé à 52 % sous forme de métal, 27 % de ferronickel, 16 % d'oxyde, 5 % de sels.

Utilisations diverses :

Aciers inoxydables : voir ce chapitre.

Nickelage : les pièces appelées chromées sont en fait essentiellement nickelées. Elles sont en acier recouvert par une couche de 20 à 30 µm de Ni sur laquelle est déposée une mince pellicule de Cr (0,2 à 0,3 µm) destinée uniquement à faciliter l'entretien. Les pièces "chromées" sont concurrencées par les plastiques (dans les 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 Ni²⁺.
- Nickelage par réduction chimique : les pièces à revêtir sont immergées dans une solution d'ions Ni²⁺ contenant un réducteur (hypophosphite de 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 µm/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 m² 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 μm , 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 ce chapitre.
- 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 (0,4 à 1 kg par téléviseur), pour les cuves de méthaniers (360 t/méthanier, 39 méthaniers dans le monde utilisent 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 Ni^{2+} soit limitée à 0,5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semaine}$ 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 est 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 pièces de 10 F et 20 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).