NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Dernière mise à jour : 03/09/2015

RESPONSABLE DU PROGRAMME

J.-M. BRIGNON : jean-marc.brignon@ineris.fr

EXPERTS AYANT PARTICIPÉ A LA REDACTION

A. GOUZY : aurelien.gouzy@ineris.fr

J.-M. BRIGNON

Veuillez citer ce document de la manière suivante :

INERIS, 2014. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Nickel et ses composés, DRC-14-136881-02234A, 94 p. (http://www.ineris.fr/rsde/ ou http://www.ineris.fr/substances/fr/).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

SOMMAIRE

Resumé 4
Abstract 6
1 Généralités 7
1.1 Définition et caractéristiques principales 7
1.2 Réglementations 10
1.3 Valeurs et normes appliquées en France 13
1.4 Autres textes 14
1.5 Classification et étiquetage 17
2 Production et utilisations 22
2.1 Principe de production 22
2.2 Production et vente 22
2.3 Utilisations 31
3 Rejets dans l'environnement 48
3.1 Sources naturelles de nickel 48
3.2 Sources non-intentionnelle de nickel 49
3.3 Emissions anthropiques totales 49
3.4 Emissions atmosphériques 51
3.5 Emissions vers les eaux 56
3.6 Emissions vers les sols 60
3.7 Pollutions historiques 60
4 Devenir et présence dans l'environnement 62
4.1 Comportement dans l'environnement 62
4.2 Présence dans l'environnement 64
5 Possibilites de reduction des rejets 74
5.1 Produits de substitution 74

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

5.2 Réduction des émissions industrielles 75
5.3 Autres possibilités envisageables 78
6 Aspects économiques 80
6.1 Place de la substance dans l'économie française 80
6.2 Impact économique des mesures de réduction ou de substitution 85
6.3 Coût de l'impact sur la santé humaine des émissions 85
7 Conclusions 86
8 Liste des Abbréviations 87
9 Références 88
9.1 Entreprises, organismes et experts interrogés 88
9.2 Sites Internet consultés 88
9.3 Bibliographie 90

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

RESUME

Le nickel est un métal, son numéro CAS est 7440-02-0. Les principaux composés du nickel, étudiés dans cette fiche, sont le nickel tétracarbonyle (CAS 13463-39-3), l'acétate de nickel (CAS 373-02-4), l'oxyde de nickel (CAS 1313-99-1), l'hydroxyde de nickel (CAS 12054-48-7), le carbonate de nickel (CAS 3333-67-3), le chlorure de nickel (CAS 7718-54-9), le nitrate de nickel (CAS 13138-45-9), le sulfure de nickel (CAS 12035-72-2) et le sulfate de nickel (CAS 7786-81-4).

Le nickel est un métal ubiquitaire, très répandu dans la croûte terrestre. Les sources de nickel sont à la fois naturelles et anthropiques. La majorité du nickel naturel provient des minerais.

Le nickel est utilisé dans de nombreux secteurs : les aciers inoxydables (contenant 8 à 12 % Ni), les alliages de nickel (contenant 25 à 100 % Ni), le traitement de surface (nickelage), les aciers alliés (contenant moins de 4 % Ni), les batteries (Cd-Ni, NiMH[1]), la monnaie, la chimie (catalyseur).

En France, la source principale de nickel dans l'environnement est une source anthropique, liée aux activités industrielles.

La production mondiale de nickel était, en 2011, de 1 897.10^3 tonnes de nickel, dont 58.10^3 tonnes dans l'Union européenne.

Les émissions françaises de nickel vers l'environnement sont répertoriées par différents organismes : le CITEPA pour les émissions atmosphériques, l'IREP et l'E-PRTR pour les données des industriels aux émissions atmosphériques, vers les eaux et les sols. Tous milieux confondus, selon E-PRTR, les émissions industrielles étaient d'environ 60 tonnes en 2011.

De nombreux sites industriels sont recensés comme contaminés ou ayant été contaminés au nickel, dans toutes les régions françaises, d'après la base de données BASOL.

Le nickel est présent sous forme d'ions Ni^{2+} dans les systèmes aquatiques. En présence de soufre et en milieu anaérobie, il se forme du sulfate de nickel. Dans les sols, la mobilité du nickel augmente aux pH faibles, en milieu alcalin, le nickel est majoritairement adsorbé. Le nickel, bien que pouvant parcourir de grandes distances via le compartiment atmosphérique, est peu présent dans les particules en suspension.

[1] Ni-Cd : Nickel-Cadmium, NiMH : Nickel Métal Hydrure.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Le nickel est à l'heure actuelle difficilement substituable. Des techniques de réductions des émissions industrielles existent pour les effluents aqueux, notamment dans les domaines de la chimie et des traitements de surface. Il existe aussi des techniques de réductions des émissions lors des opérations minières ou du traitement des minerais.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

ABSTRACT

Nickel is a metal, its CAS number is 7440-02-0. The main compounds of nickel, which are studied in this sheet, are nickel tetracarbonyl (CAS 13462-39-3), nickel acetate (CAS 373-02-4), nickel oxide (CAS 1313-99-1), nickel hydroxide (CAS 771854-9), nickel chloride (CAS 7718-54-9), nickel nitrate (CAS 13138-45-9), nickel sulphide (CAS 12035-72-2) and nickel sulphate (CAS 7786-81-4).

Nickel is a ubiquitous metal, very common in the Earth's crust. Nickel sources are both natural and anthropogenic. Most of natural nickel comes from ores.

Nickel is used in many applications: stainless steels (containing 8 to 12% Ni), nickel alloys (containing 25 to 100% Ni), surface treatment (nickel plating), steel (containing less than 4% Ni), batteries (NiCd, NiMH[2]), mint, chemistry (catalyser).

In France, the main source of nickel in environment is an anthropogenic source, related to industries.

In 2011, the global production of nickel was 1897 thousand tons of nickel and 58 thousand tons for the European Union.

The French emissions of nickel to environment are registered by different organizations: the CITEPA for atmospheric emission, IREP and E-PRTR for emissions to atmosphere, water and soil. According to E-PRTR, industrial emissions were about 60 tons for all medias for 2011.

According to the database BASOL, many industrial sites are registered as polluted by nickel or having been polluted by nickel in all regions.

Nickel is present as ions Ni^{2+} in aquatic systems. With sulfur and in anaerobic conditions nickel sulfate is formed. In soil nickel mobility is greater at low pH. In alkaline environment nickel is mainly adsorbed. Even if nickel can travel on long distance via atmosphere, it is not very present in particles.

At the moment, nickel is hardly substitutable. Techniques exist to reduce industrial emissions in aqueous effluents, mainly in chemistry and surface treatment. There are techniques to reduce emissions during mining operations and ore treatment.

[2] NiCd: Nickel Cadmium, NiMH: Nickel –metal hydride.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

1 GENERALITES

Une bibliographie importante est disponible sur le nickel et ses principaux composés. Afin de ne pas alourdir cette fiche à l'excès, nous n'avons présenté ici que les données et références les plus significatives. Ce document ne se veut donc pas exhaustif mais indicatif des aspects technico-économiques du nickel et de ses principaux composés.

1.1 Définition et caractéristiques principales

Le nickel (Ni) est un métal ubiquitaire que l'on retrouve dans les sols, l'eau et la biosphère (Haut Comité de Santé Publique, 2000).

Le nickel est très répandu dans la croûte terrestre. Celle-ci renferme environ 0,009 % de nickel dans des minerais sulfurés, arséniurés, antimoniurés, oxydés et silicatés (Ontario, 2001). Cet élément peut également être émis par activité volcanique et être présent au sein de météorites et de nodules polymétalliques[3] (ATSDR, 1997).

1.1.1 Présentation de la substance

Les Tableau 1 et Tableau 2 synthétisent l'identification et la caractérisation du nickel et de ses principaux composés.

[3] Les nodules polymétalliques sont des concrétions rocheuses reposant sur le lit océanique, ils comportent du manganèse, du fer, du silicium, de la bauxite, du nickel, du cuivre ou du cobalt.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Tableau 1. Caractéristiques du nickel et de ses principaux composés, selon INERIS (2005) et INRS (2009).

Substance chimique	N° CAS	N° EINECS	Synonymes	Forme physique (*)
nickel Ni	7440-02-0	231-111-4	-	Solide cristallisé *insoluble*
oxyde de nickel NiO**	1313-99-1	215-215-7	monoxyde de nickel ; nickel oxide ; nickel (II) oxide ; nickel protoxide	Poudre *insoluble*
hydroxyde de nickel $Ni(OH)_2$	12054-48-7	235-008-5	nickel hydroxide	Poudre *très peu soluble*
chlorure de nickel $NiCl_2$	7718-54-9	231-743-0	dichlorure de nickel ; nickel chloride ; nickel (II) chloride ; nickel dichloride	Solide cristallisé *très soluble*
nitrate de nickel $Ni(NO_3)_2$	13138-45-9	236-068-5	dinitrate de nickel ; nickel nitrate ; nickel (II) nitrate ; nickel (2+) nitrate ; nitric acid, nickel (II) salt ; nitric acid, nickel (2+) salt	Solide cristallisé *très soluble*
sulfate de nickel $NiSO_4$	7786-81-4	232-104-9	nickel sulfate	Solide cristallisé *facilement soluble*

(*) dans les conditions ambiantes habituelles.

(**) Selon l'INERIS (2005), dans l'oxyde de nickel on note la présence de cobalt, de cuivre, de fer, et de soufre (dans des proportions inférieures à 1 %). Les données ne sont pas disponibles pour les autres composés.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Tableau 2. Caractéristiques des autres composés du nickel, d'après l'ECHA[4].

Substance chimique	N° CAS	N° EINECS	Synonymes	Forme physique (*)
nickel tétracarbonyle C_4NiO_4 / $Ni(CO)_4$	13463-39-3	236-669-2	nickel carbonyle	Liquide *très peu soluble*
acétate de nickel $Ni(CH_3CO_2)_2$	373-02-4	206-761-7	diacétate de nickel ; nickel (2+) acetate ; nickel (II) acetate ; nickelous acetate ; acetic acid, nickel (2+) salt ; nickel diacetate	Solide cristallisé *soluble*
carbonate de nickel $NiCO_3$	3333-67-3	222-068-2	nickel carbonate	Cristaux *très peu soluble*
sulfure de nickel Ni_3S_2	12035-72-2	234-829-6	disulfure de nickel ; nickel sulfide ; trinickel sulfide ; nickel subsulfide	Solide cristallisé *insoluble*
sulfure de nickel NiS	16812-54-7	240-841-2	nickel sulfide	Solide
antimony nickel titanium oxide yellow	8007-18-9	232-353-3		Poudre
[carbonato(2-)] tetrahydroxytrinickel $CH_4Ni_3O_7$	12607-70-4	235-715-9	trinickel monocarbonate tetrahydroxide ; nickel hydroxycarbonate ; nickel carbonate	Solide
tetrakis(tritolyl phosphite)nickel $C_{84}H_{84}NiO_{12}P_4$	35884-66-3	252-777-2	tetrakis(tris(4-methylphenyl)phosphuite)nickel	Liquide
nickel iron chromite black spinel	71631-15-7	375-738-1		Solide
nickel difluoride F_2Ni	10028-18-9	233-071-3		Poudre
dialuminium nickel tetraoxide Al_2NiO_4	12004-35-2	234-454-8		
nickel bis(sulphamidate) H_3NO_3S 1/2Ni	13770-89-3	237-396-1	nickel (2+) disulfamate ; nickel sulfamate	Solide
nickel bis(dihydrogen phosphate) H_3O_4P 1/2Ni	18718-11-1	242-522-3	nickel bis(dihydrogen phosphate)	
lithium nickel cobalt aluminium oxide		700-042-6		Solide
nickel bis(2-ethylhexanoate) $C_8H_{16}O_2$ 1/2Ni	4454-16-4	224-699-9		Solide

[4] European Chemicals Agency : http://echa.europa.eu/fr/ (consulté en mars 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

1.1.2 Toxicité de la substance

De nombreuses sources bibliographiques concernant la toxicité du nickel et de ses principaux composés sont disponibles. Une compilation bibliographique des données, limites toxicologiques et écotoxicologiques est par exemple disponible sur Internet sur le site de l'INERIS (http://www.ineris.fr).

1.2 Réglementations

1.2.1 Textes généraux

L'usage du nickel est interdit dans les (alliages pour) bijoux dans le cadre de REACH (Annexe XVII). Les composés du nickel ne sont pas actuellement dans la liste des SVHC de REACH, mais des analyses préliminaires sont en cours qui pourraient éventuellement conduire à leur inclusion future (notamment des études conduites en France par l'ANSES pour l'oxyde et le sulfate de Nickel).

Le nickel et ses composés ne sont pas cités dans la liste de l'annexe I du règlement (CE) 689/2008 relatif à l'export et à l'import de substances dangereuses. Ils ne sont donc pas soumis aux notifications d'exportations.

Certains composés du nickel étant carcinogènes (NiO), les dispositions générales relatives à ces composés, notamment en matière de protection des travailleurs, s'appliquent, et des limites spécifiques peuvent exister dans des règlementations nationales dans l'UE (voir 1.3.1 ci-dessous pour les valeurs limites en France).

1.2.2 Nomenclature des Installations classées (IC)

En France, le nickel est concerné par les rubriques suivantes de la Nomenclature des Installations Classées (selon le Décret n°53-578 du 20 mai 1953 relatif à la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, mis à jour par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable)[5] :

-1110 : Fabrication industrielle de substances ou préparations très toxiques ;
-1111 : Emploi ou stockage de substances ou préparations très toxiques ;
-1130 : Fabrication industrielle de substances et préparations toxiques ;
-1131 : Emploi ou stockage de substances et préparations toxiques ;

[5]La liste des rubriques mentionnée est indicative et ne se veut pas exhaustive. http://www.ineris.fr/aida/sites/default/files/gesdoc/30296/Nomenclature_octobre.pdf (consulté en décembre 2013).

-1150 : Fabrication industrielle de ou à base de substances et mélanges particuliers ;

-1171 : Fabrication industrielle de substances ou préparations dangereuses pour l'environnement ;

-1172 : Stockage et emploi de substances ou préparations dangereuses pour l'environnement, très toxiques ;

-1173 : Stockage et emploi de substances ou préparations dangereuses pour l'environnement, toxique ;

-2531 : Travail chimique du verre ou du cristal ;

-2546 : Traitement industriel des minerais non ferreux, élaboration des métaux et alliages non ferreux ;

-2550 : Fonderie de produits moulés contenant du plomb ;

-2552 : Fonderie de métaux et alliages non ferreux ;

-2560 : Travail mécanique des métaux et alliages ;

-2561 : Trempé recuit, revenu des métaux et alliages ;

-2565 : Revêtement métallique ou traitement (nettoyage, décapage, conversion, polissage, attaque chimique, etc.) de surface (métaux, matières plastiques, semi-conducteurs, etc.) par voie électrolytiques ou chimique.

1.2.3 Seuils de rejets pour les installations classées

L'arrêté du 26 décembre 2012 modifiant l'arrêté du 31 janvier 2008 concerne le registre et la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets. L'exploitant de l'installation doit déclarer ces rejets dès lors que les seuils d'émissions décrits dans l'annexe II de cet arrêté sont dépassés. Les seuils de rejets de nickel et ses composés (exprimés en tant que Ni) sont :

- de 50 kg/an dans l'air (à l'exception des installations d'incinération de déchets non dangereux et des installations d'incinération de déchets dangereux, pour lesquelles ce seuil est fixé à 0 kg/an) ;
- de 20 kg/an ou 20 g/jour dans l'eau ;
- de 20 kg/an dans le sol.

Le nombre d'établissements rejetant du nickel est donné au paragraphe 3.3.

L'arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation indique que :

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Pollution de l'air

Rejets d'antimoine, chrome, cobalt, cuivre, étain, manganèse, nickel, vanadium et zinc, et de leurs composés : si le flux horaire total d'antimoine, chrome, cobalt, cuivre, étain, manganèse[6], nickel, vanadium, zinc[6] et de leurs composés (gazeux et particulaires) dépasse 25 g/h, la valeur limite de concentration est de 5 mg/m^3 (exprimée en Sb+Cr+Co+Cu+Sn+Mn+Ni+V+Zn).

Pollution des eaux superficielles

Les rejets respectent les valeurs limites de concentrations suivantes : nickel et ses composés (en Ni) 0,5 mg/L si le rejet dépasse 5 g/j.

Dans le cas de la fabrication ou de la transformation de nickel, la valeur limite de concentration est 2 mg/L.

Epandage des boues

L'annexe I de l'arrêté précise les seuils à respecter en éléments-traces pour l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. Ces seuils sont présentés dans le Tableau 3.

Le Tableau 3 précise les teneurs limites en éléments-traces dans les boues, les valeurs limites en éléments-traces dans les sols et le flux maximum en éléments-traces apporté par les déchets ou effluents pour les pâturages ou sols de pH inférieurs à 6.

[6] En cas de fabrication de monoxyde de zinc (ZnO) et de bioxyde de manganèse (MnO_2), la valeur limite de concentration pour respectivement le zinc et le manganèse est de 10 mg/m^3.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Tableau 3. Seuils de nickel applicables aux épandages de boues issues du traitement des eaux usées sur les sols agricoles.

Composés	Valeur limite (mg/kg MS)	Flux maximum cumulé, apporté par les boues en 10 ans (g/m^2)
Teneurs limites en éléments-traces dans les boues		
Nickel	200	0,3
Chrome + cuivre + nickel + zinc	4000	6
Valeurs limites de concentration en éléments-traces dans les sols		
Nickel	50	
Flux cumulé maximum en éléments-traces métalliques apporté par les déchets ou effluents pour les pâturages ou les sols de pH inférieurs à 6		
Nickel		0,3
Chrome + cuivre + nickel + zinc		4

sans objet

1.3 Valeurs et normes appliquées en France

1.3.1 Valeurs utilisées en milieu de travail

En France, les valeurs utilisées pour la qualité de l'air en milieu de travail sont publiées par l'INRS[7] :

VME[8] = 1 mg.m^{-3} (en Ni) pour le nickel (métal et grillage de mattes), l'oxyde de nickel, l'hydroxyde de nickel, le carbonate de nickel et le sulfure de nickel.

VME = 0,12 mg.m^{-3} (en Ni) pour le tétracarbonyle de nickel.

VME = 0,1 mg.m^{-3} (en Ni) pour le sulfate de nickel.

[7] INRS 2012 – Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France (consulté en décembre 2013).

[8] VME : valeurs moyennes d'exposition.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

1.3.2 Valeurs utilisées pour la population générale

Qualité de l'air

Le décret 2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air fixe pour le nickel une valeur cible de 20 ng/m^3 de nickel en moyenne calculée sur une année civile du contenu total de la fraction « PM 10[9] », avec un volume d'échantillonnage mesuré dans les conditions ambiantes[10]. Cette valeur est la même que celle de la règlementation européenne correspondante.

Qualité des eaux de consommation

Le décret 2001/1220 du 20 décembre 2001 impose, de même qua la règlementation européenne correspondante, une limite de qualité aux eaux destinées à la consommation humaine. Les eaux doivent respecter une valeur inférieure ou égale à 20 µg/L de nickel.

Contact avec la peau

L'annexe XVII « Restrictions applicables à la fabrication, à la mise sur le marché et à l'utilisation de certaines substances dangereuses et de certaines mélanges et articles dangereux » du règlement européen REACH impose des restrictions l'usage de nickel ou ses composés pour la fabrication de produits ayant un contact prolongé avec la peau. Ainsi les boucles d'oreilles et les piercings ne doivent pas entraîner des transferts dans l'organisme supérieurs à 0,2 µg.cm^{-2} par semaine. Les bijoux (y compris les montres), les fermetures éclairs, les boutons et rivets métalliques destinés à l'habillement sont interdits s'ils entraînent des transferts supérieurs à 0,5 µg.cm^{-2} par semaine.

L'oxyde de nickel est interdit dans les cosmétiques par la règlementation européenne de ce secteur.

1.4 Autres textes

1.4.1 Actions de recherche RSDE

Le nickel et ses composés sont cités dans l'annexe 1 de la circulaire du 5 janvier 2009 relative à la mise en œuvre de la 2ème phase de l'action RSDE pour les ICPE soumise à autorisation. Cette annexe regroupe les listes par secteurs d'activité industrielle des substances dangereuses. Le nickel et ses composés sont cités pour tous les secteurs d'activité.

Le nickel appartient aussi à la liste des micropolluants à mesurer dans les stations de traitement des eaux usées traitant une charge brute de pollution supérieure ou égale à 600 kg DBO5/jour (Circulaire du 29 septembre 2010 relative à la surveillance de la présence

[9] « PM 10 » : particules en suspension dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 µm.

[10] Conditions ambiantes : température de 25°C et pression de 100 kPa.

de micropolluants dans les eaux rejetées au milieu naturel par les stations de traitement des eaux usées).

1.4.2 Directive-Cadre sur l'Eau

Le nickel et ses composés sont cités dans la directive n°2013/39/UE du 12 août 2013 modifiant les directives 2000/60/CE et 2008/105/CE en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau. Ils sont listés en tant que substances prioritaires mais pas en tant que substances prioritaires dangereuses.

La directive précédemment citée fixe des normes de qualité environnementale (NQE) pour le nickel et ses composés :

-NQE moyenne annuelle : 4 µg/L de nickel pour les eaux de surfaces intérieures ;

-NQE moyenne annuelle : 8,6 µg/L de nickel pour les autres eaux de surfaces ;

-NQE concentration maximale acceptable : 34 µg/L de nickel pour les eaux de surfaces.

1.4.3 Engrais

Pour les engrais organiques, divers seuils en métaux lourds sont fixés par les législations européennes et nationales. Les seuils pour le nickel sont repris dans le Tableau 4[11].

[11] http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/fertilizers/annexes_16jan2012_en.pdf (consulté en février 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Tableau 4. Seuils de nickel pour les engrais organiques.

Seuils en mg/kg de matière sèche	**Ni**
Législation européenne	
Label écologique amendements pour sols et milieux de culture (2007/64/CE et 2006/799/CE)	50
Règlement CE 834/2007 (valeurs pour les déchets ménagers compostés ou fermentés)	25
Propositions européennes	
Valeurs limites ECN[12] pour le compost (QAS)	40
Valeurs limites JRC[13] pour le compost (EoW)	50
Exemples de législations nationales	
Pays-Bas	20
Slovénie	50
France	60
Grèce	200

Pour les engrais minéraux, il n'existe pas de règlementation européenne, néanmoins l'évaluation du règlement CE 2003/2003 relatif aux engrais[14] préconise d'inclure dans le règlement des dispositions concernant les teneurs maximales en métaux lourds.

1.4.4 Nanoparticules

Le décret n° 2012-232 du 17 février 2012 relatif à la déclaration annuelle des substances à l'état nanoparticulaire précise que le seuil de la déclaration est fixé à 100 g/an pour la fabrication, l'importation ou la mise sur le marché de nanomatériaux.

1.4.5 Autres textes

Le nickel appartient à la liste des 823 substances du plan micropolluants 2010-2013[15].

[12] European Compost Network.

[13] Joint Research Center.

[14] http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/fertilizers/final_report_2010_en.pdf (consulté en février 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Le nickel est cité dans la liste des substances et matières nuisibles ou nocives dont le rejet dans la zone du protocole est assujetti à permis spécial. Il s'agit du protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution résultant de l'exploration et de l'exploitation du plateau continental, du fond de la mer et de son sous-sol auquel l'Union européenne a adhéré par la décision n°2013/5/UE du 17 décembre 2012.

Le nickel ne fait pas partie des substances potentiellement préoccupantes définies par OSPAR[16].

1.5 Classification et étiquetage

Le règlement (CE) 790/2009 de la Commission européenne du 10 août 2009 modifiant le règlement dit CLP[17] (CE) 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil indique la réglementation relative à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage du nickel et de ses composés.

1.5.1 Nickel



Classification : H351, H372, H317[18]

Etiquetage : H351, H372, H317

---

[15] http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-micropolluants-dans-les.html (consulté en décembre 2013).

[16] Convention OSPAR : Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est. http://www.ospar.org/content/content.asp?menu=30200304000000_000000_000000 (consulté en janvier 2014).

[17] Le règlement (CE) 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 dit CLP (Classification, Labelling, Packaging, en français : classification, étiquetage, emballage) modifie et abroge les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifie le règlement (CE) 1907/2006. Ce texte européen définit les nouvelles règles en matière de classification, d'étiquetage et d'emballage des produits et des substances chimiques pour les secteurs du travail et de la consommation, dans le cadre de la mise en application du SGH (Système Général Harmonisé).

[18] La signification des codes de danger est donnée en fin de paragraphe.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

1.5.2 Nickel tétracarbonyle



Classification : H225, H351, H360D, H330, H400, H410

Etiquetage : H225, H351, H360D, H330, H410

1.5.3 Acétate de nickel



Classification : H350i, H341, H360D, H372, H332, H302, H334, H317, H400, H410

Etiquetage: H350i, H341, H360D, H372, H332, H302, H334, H317, H410

1.5.4 Oxyde de nickel



Classification : H350i, H372, H317, H413

Etiquetage : H350i, H372, H317, H413

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

1.5.5 Hydroxyde de nickel



Classification : H350i, H360D, H341, H372, H332, H302, H315, H334, H317, H400, H410

Etiquetage : H350i, H360D, H341, H372, H332, H302, H315, H334, H317, H410

1.5.6 Carbonate de nickel

Même classification que l'hydroxyde de nickel paragraphe 1.5.5

1.5.7 Chlorure de nickel



Classification : H350i, H341, H360D, H331, H301, H372, H315, H334, H317, H400, H410

Etiquetage : H350i, H341, H360D, H331, H301, H372, H315, H334, H317, H410

1.5.8 Nitrate de nickel



Classification : H272, H350i, H341, H360D, H372, H332, H302, H318, H315, H317, H400, H410

Etiquetage : H272, H350i, H341, H360D, H372, H332, H302, H318, H315, H317, H410

1.5.9 Sulfure de nickel



Classification : H350i, H341, H372, H317, H400, H410

Etiquetage : H350i, H341, H372, H317, H410

1.5.10 Sulfate de nickel

Même classification que l'hydroxyde de nickel paragraphe 1.5.5.

Le Tableau 5 regroupe la signification des codes de danger du nickel et de ses composés d'après http://esis.jrc.ec.europa.eu/index.php?PGM=cla.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Tableau 5. Signification des codes de danger.

Codes de danger	
H225	Liquide et vapeurs très inflammables
H272	Peut aggraver un incendie; comburant
H301	Toxique en cas d'ingestion
H302	Nocif en cas d'ingestion
H315	Provoque une irritation cutanée
H317	Peut provoquer une allergie cutanée
H318	Provoque des lésions oculaires graves
H330	Mortel par inhalation
H331	Toxique par inhalation
H332	Nocif par inhalation
H334	Peut provoquer des symptômes allergiques ou d'asthme ou des difficultés respiratoires par inhalation
H341	Susceptible d'induire des anomalies génétiques
H350i	Peut provoquer le cancer par inhalation
H351	Susceptible de provoquer le cancer
H360D	Peut nuire au fœtus
H372	Risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée
H400	Très toxique pour les organismes aquatiques
H410	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme
H413	Peut être nocif à long terme pour les organismes aquatiques

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2 PRODUCTION ET UTILISATIONS

2.1 Principe de production

Selon European Commision (2001a) et INERIS (2005), le nickel est obtenu principalement à partir de minerais de nickel sulfurés (pyrrhotite, nickeliferreuse, pentlandite, chalcopyrite) dans lesquels sont également présents le fer et le cuivre. Le minerai est broyé, enrichi par flottation et séparation magnétique suivie d'un grillage et d'une fusion. La matte obtenue est ensuite traitée par un procédé pyrométallurgique (grillage de l'oxyde et réduction en métal) ou hydrométallurgique (formation d'une solution de sel de nickel et réduction en métal).

Le nickel brut obtenu peut ensuite être purifié par une méthode électrolytique ou par un procédé dans lequel le métal brut et l'oxyde de carbone réagissent à 200/300°C pour former du nickel carbonyle qui se décompose sélectivement d'abord en nickel et monoxyde de carbone puis dans des délais plus longs en carbonyles des autres éléments présents. Ce procédé permet d'obtenir du nickel pur à plus de 99,9 %.

Le nickel tétracarbonyle est formé par réaction du monoxyde de carbone avec de la poudre de nickel à 50°C.

L'oxyde de nickel est obtenu en chauffant du nickel à une température supérieure à 400°C en présence d'oxygène.

L'acétate de nickel est produit par réaction de l'oxyde noir de nickel avec l'acide acétique.

Le chlorure de nickel est formé par réaction de l'acide chlorhydrique avec le nickel.

Le nitrate de nickel est obtenu par réaction entre l'acide nitrique fumant et le nitrate de nickel hexahydraté.

Le sulfate de nickel est formé par dissolution d'oxyde ou d'hydroxyde de nickel dans de l'acide sulfurique.

Le sulfure de nickel ou sous sulfure de nickel est obtenu lors de la production de nickel à partir de minerais sulfurés.

2.2 Production et vente

2.2.1 Minerais

Selon le site internet de la Société Chimique de France (SCF), la teneur moyenne de l'écorce terrestre en nickel est de 75 ppm. Dans les minerais, le nickel est souvent associé au fer (Fe), au cuivre (Cu), au chrome (Cr) et au cobalt (Co).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

De plus, d'après cette source et European Commission (2001a), on distingue deux principaux types de minerais :

- Les minerais 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 de ce type de minerais sont, en général, souterraines.

  Ces 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. Le nickel est concentré par flottation à des teneurs de 10 à 15 % de Ni.

  Ces minerais sont principalement exploités en Australie de l'Ouest, en Russie, au Canada (Manitoba, Labrador et Ontario[19]), en Chine, en Afrique Australe, en Finlande.

- Les minerais 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. Parmi eux, on distingue :

  - Les minerais silicatés (saprolites) qui se forment par substitution du magnésium de la serpentine ($3MgO,2SiO_2,2H_2O$) par du nickel : on obtient ainsi de la garniérite. Ce minerai est caractéristique de la Nouvelle-Calédonie où l'on observe le plus important gisement mondial de minerais oxydés, sa teneur en nickel est de 2,3 à 3 % et le minerai contient, outre le magnésium et la silice, 10 à 30 % de fer et de cobalt. Ces minerais sont également exploités à des teneurs plus faibles en Indonésie, en République Dominicaine, aux Philippines, au Brésil, …

  - Les latérites nickelifères (limonites) dans lesquelles le nickel se substitue au fer dans la goethite (FeOOH). Ces minerais se caractérisent par leur pauvreté en nickel (de 1 à 1,5 %) et en cobalt (0,1 à 0,2 %) et une relative richesse en fer (40 à 50 %) et en chrome (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[20], par Eramet et par Vale, la production étant exportée en Australie pour être traitée par hydrométallurgie ou transformée en Calédonie à Goro (ouverte en 2010).

[19] La mine de Sudbury constitue le plus important gisement mondial de minerais sulfurés. Les réserves prouvées sont de 59,8 millions de tonnes de minerai tout-venant.

[20] Le terme « petits mineurs » désigne, les sociétés autres que la SLN qui travaillent dans les mines. Elles exploitent des concessions et vendent par elles-mêmes le minerai à des acheteurs étrangers ou bien elles le revendent à la SLN voire même, elles exploitent une mine pour le compte de la SLN (Société Le Nickel).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2.2.2 Production minière

Selon Eramet via la SCF, la production mondiale de nickel était en 2011 de 1 897 000 tonnes de nickel contenu (dont $58{,}0.10^3$ pour l'Union européenne et $122{,}9.10^3$ pour la Nouvelle-Calédonie). Selon la SCF, la production métallurgique mondiale de nickel toujours en 2011 atteignait 1 589 000 tonnes de nickel contenu dans le nickel raffiné, les sels et les ferronickels (dont 119 000 pour l'Union européenne et 40 000 pour la Nouvelle-Calédonie).

De même, depuis le milieu des années 1990, plus d'un million de tonnes de nickel sont produites annuellement. Ce chiffre de production est dix à douze fois plus faible que pour le cuivre, et 800 fois plus faible que pour l'acier (site internet CNUCED[21]).

Selon le site internet de la Société Chimique de France en 2012, les réserves mondiales sont estimées à 75 millions de tonnes de métal contenu (dont 60 % de minerais latéritiques et 40 % de minerais sulfurés). La répartition de ces réserves en 2012 est la suivante (en millions de tonnes) : Australie : 20, Nouvelle-Calédonie : 12, Brésil : 7,5, Russie : 6,1, Cuba : 5,5, Indonésie : 3,9, Afrique du Sud : 3,7, Canada : 3,3, Chine : 3,0 et Madagascar : 1,6.

La Nouvelle-Calédonie représenterait le quart des réserves mondiales de minerai latéritique, d'après le site internet du CNUCED.

2.2.3 Variations de l'offre et de la production

Le paragraphe suivant est repris du site internet CNUCED :

« L'offre mondiale est parfois difficile à prévoir, notamment pour le nickel en provenance de Fédération de Russie. Ce pays possède en effet des stocks de métal importants et leur écoulement aléatoire influence fortement le marché à court terme. Mais l'offre varie également en fonction des mises en chantier d'usines, de la découverte de nouveaux gisements ou encore en raison de sanctions spécifiques telles que celles pratiquées dans le cadre de la loi américaine Helms-Burton concernant Cuba.

En outre, des facteurs exogènes tels que les prix des déchets d'inox, produits substituables au nickel primaire, les grèves dans un certain nombre d'entreprises ou les changements dans les volumes des stocks (…) contribuent à l'instabilité de l'offre. »

2.2.4 Nouvelle-Calédonie

Selon le site internet de la SCF, en 1995, l'exploitation et le traitement du nickel représentaient 30 % du PIB du Territoire et employaient environ 3 000 personnes.

[21] Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement : http://r0.unctad.org/infocomm/francais/nickel/plan.htm (consulté en décembre 2013).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Toujours selon la SCF, en 2012, la production de la Nouvelle-Calédonie a été de 131 816 tonnes de nickel contenu (soit 9,7 millions de tonnes de minerai humide).

Les exportations de minerais, en croissance, sont estimées à 61 250 tonnes de nickel contenu (soit 4,65 millions de tonnes de minerai). Elles sont dirigées principalement vers la Corée du Sud, l'Australie et le Japon. Les exportations sont effectuées, en grande partie par des mineurs indépendants de la Société le Nickel (SLN(. 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 tonnes de minerai ont été extraites (3,3 millions de tonnes de Ni). L'extraction a culminé en 1971 avec 7,7 millions de tonnes de minerai (jusqu'en 1950, la teneur exploitée dépassait 5 %, actuellement la teneur est comprise entre 2,3 et 2,8 %).

La SLN exploite les mines de Thio, de Kouaoua, de Népoui Kopéto, de Tiébaghi et depuis 2007 de Poum. La production a été en 2012 de 3,8 millions de tonnes de minerai. D'autres producteurs exploitent des gisements à Ouaco, Poya, Nakety, Kouaoua et Goro. Le gisement de la SLN de Kaala-Gomen est exploité par des sous-traitants. Au total, il y a 13 centres miniers (Figure 1). 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 tonnes de minerai à 1,57 % de nickel et 0,16 % de cobalt.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES



Figure 1. Les mines de nickel en Nouvelle-Calédonie, d'après le site internet de la SCF reprenant un document du Sénat : projet de loi de finances pour 2007 : outre-mer.

Selon le site internet CNUCED : « *Les secteurs minier et métallurgique représentent 80 % de la valeur des exportations calédoniennes. Dans ce contexte, il est à noter que seuls 45 % du minerai extrait est traité sur place (…). Afin d'encourager les investissements, notamment d'infrastructures de traitement du nickel sur l'île, le Congrès de Nouvelle-Calédonie a adopté à l'unanimité le 27 juin 2001 une loi mettant en place un régime fiscal propice aux investissements dans la métallurgie du nickel.* »

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2.2.5 Métallurgie

Le BREF sur les métaux non-ferreux (Commission Européenne, 2001a) propose une schématisation du principe général de production du nickel à partir de minéraux oxydés.

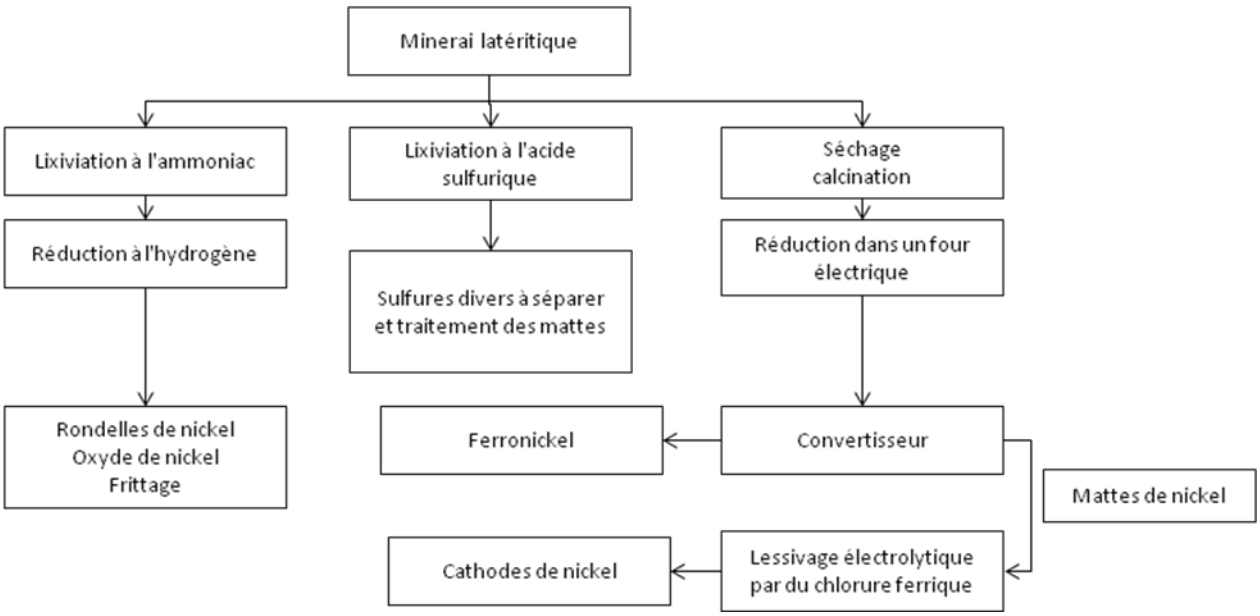


Figure 2. Principe de production du nickel à partir de minerais oxydés, d'après European Commision (2001a).

Un schéma analogue existe également pour les minerais sulfurés. Mais comme ces derniers ne sont pas exploités en France ce document n'est pas repris dans cette fiche. De plus, selon le site internet de la SCF et dans le cas précis du minerai oxydé de Nouvelle-Calédonie, le process est détaillé dans les paragraphes suivants (§2.2.5.1 à 2.2.5.6).

2.2.5.1 Réduction du minerai :

Le minerai, riche en eau (25 %), est séché, puis, après ajout de 50 kg d'anthracite par tonne de minerai sec, calciné à 1000°C dans des fours rotatifs. Une première réduction des oxydes métalliques a ainsi lieu, à l'état solide.

Le minerai est ensuite réduit (désulfuration et soufflage d'oxygène), en phase liquide, dans des fours électriques[22]. Le métal (ferronickel de 1ère fusion) sur lequel surnagent des scories est coulé : les scories sont granulées à l'aide d'eau de mer et utilisées pour des remblaiements.

2.2.5.2 Production de ferronickel

L'affinage du ferronickel de 1ère fusion consiste à enlever des proportions variables de carbone, de soufre et de silice élémentaire selon la qualité désirée de ferronickel, et le fer pour l'obtention des mattes.

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

Selon le site de la SCF, en 2012, les exportations calédoniennes de ferronickel correspondent à 44 858 tonnes de Ni contenu.

2.2.5.3 Production de mattes (destinées à l'élaboration de Ni)

La production de mattes s'effectue à partir du minerai réduit en phase liquide par sulfuration et déferrage par injection de soufre liquide. Cette étape aboutit à une "matte synthétique" (contenant de 10 à 15 % de soufre).

Un affinage secondaire, donne des mattes de "qualité industrielle" constituées de sulfure de nickel (75 % de Ni et 25 % de S). Les mattes contiennent en outre un peu de fer et du cobalt qui est récupéré lors de l'élaboration du nickel.

2.2.5.4 Exemple de production industrielle

En 2012, l'usine de Doniambo (société SLN, de Nouméa en Nouvelle-Calédonie), consommait 3 à 4 millions de $t.an^{-1}$ de minerais bruts et 900 000 $MWh.an^{-1}$ d'électricité.

Cette usine possédait en 2012 une capacité de production de 75 000 $t.an^{-1}$ de Ni contenu (contre 55 000 en 1996) (dont 80 % en ferronickel et 20 % en matte). Cette usine fonctionne avec un personnel de 1 400 personnes.

[22] Le rendement des fours typiquement utilisés est de 97 % et la consommation électrique est de 19 000 $kWh.t^{-1}$ de Ni.

2.2.5.5 Exportations de la production industrielle

La totalité du ferronickel calédonien (44 858 tonnes en 2012) est exportée. La société Eramet est le 2ème producteur mondial de ferronickel.

La totalité des mattes est exportée vers la métropole pour être transformée à l'usine SLN/Eramet de Sandouville (situé à 10 km du Havre). Cette installation, qui date de 1978, a traité, en 2012, 13 417 tonnes de mattes calédoniennes dont 10 800 tonnes de cathodes et 2 080 tonnes de Ni pour la production de chlorure de nickel cristallisé et en solution (effectifs : 200 personnes).

2.2.5.6 Schématisation de la filière calédonienne

L'ensemble du process décrit ci-dessus en repris de façon schématique dans la Figure 3 ci-après.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

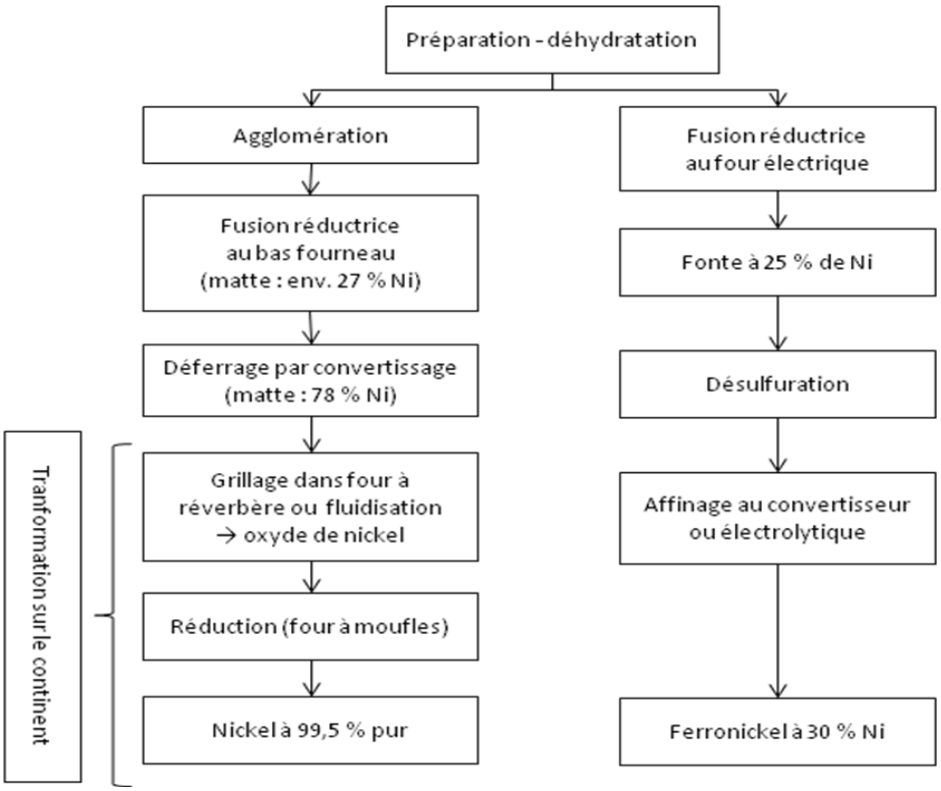


Figure 3. Schématisation de la filière néo-calédonienne de production de nickel, d'après le site internet CNUCED.

2.2.6 Recyclage

Le recyclage du nickel recouvre environ 25 % de la demande totale de nickel (RPA, 2000). De plus, selon le site internet de la SCF, le recyclage fournit 50 % du nickel destiné à la production des aciers inoxydables (le Ni contenu dans les aciers inoxydables est réutilisé lors du recyclage de ces aciers) et 20 % des autres utilisations.

Selon le site internet de la SCF, en 2012, aux Etats-Unis, le recyclage a représenté 95 100 tonnes, soit 43 % de la consommation. Dans l'Union européenne ; le taux de recyclage est de 45 %.

Selon Eramet (2005), le recyclage s'effectue directement chez les utilisateurs (cas de l'industrie sidérurgique pour ce qui concerne les chutes et les meulures d'acier inoxydable) ou par l'intermédiaire des industriels de la récupération (cas des catalyseurs usagés).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2.3 Utilisations

2.3.1 Variété des utilisations

Comme de nombreux autres métaux, les applications du nickel à l'état pur sont beaucoup moins importantes que celles sous forme d'alliage avec d'autres composants (site internet CNUCED). Ainsi, le nickel est utilisé pour la fabrication de plus de 300 000 produits repartis entre les secteurs industriels, militaires, des transports, de la marine, de l'architecture et des produits destinés au public.

D'après le site ESIS de la Commission Européenne[23], le nickel a été rapporté par les industriels de l'Union européenne comme substance HPV (high production volume). Il s'agit de substances produites ou importées à plus de 1 000 tonnes par an.

Selon le site de la SCF, en 2011 et dans le monde, les différents secteurs d'utilisation de nickel sont :

- aciers inoxydables (8 à 12 % Ni) : 65 % ;
- alliages de nickel (25 à 100 % Ni) : 12 % ;
- nickelage : 9 % ;
- aciers alliés et fonderie (<4 % Ni) : 7 % ;
- batteries : 3 % ;
- monnaies : 1 %.

[23] http://esis.jrc.ec.europa.eu/index.php?PGM=hpv (consulté en décembre 2013).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

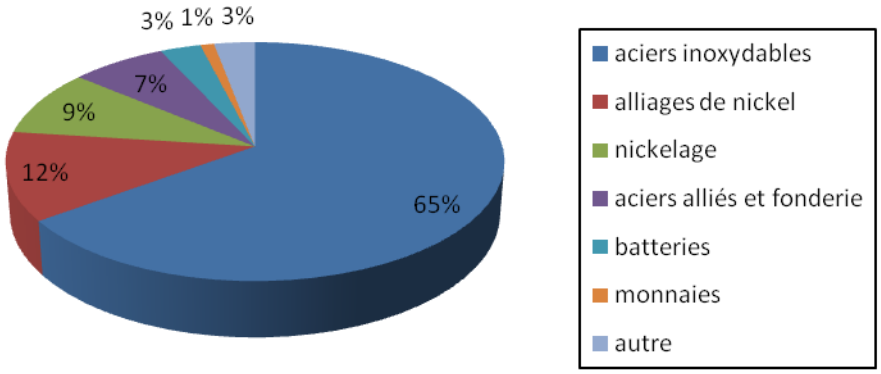


Figure 4. Répartition de la consommation mondiale de nickel primaire par secteur, d'après le site internet de la SCF.

De plus, toujours d'après Eramet (2005), le nickel est consommé à 64 % sous forme de métal (électrolytique, briquettes, billes), 22 % de ferronickel, 12 % d'oxyde métallurgique et produits dérivés et 2 % de produits spéciaux (poudres, sels, produits pour la galvanoplastie).

Le nickel entre dans la composition de nombreux alliages en raison de ses caractéristiques de dureté et de résistance à la corrosion. De plus, selon le site internet d'Environnement Canada, outre l'exploitation minière, la fonte, l'affinage de métaux, la production d'alliages et le recyclage de métaux, le nickel et ses principaux composés sont utilisés dans une vaste gamme d'applications industrielles dans les secteurs de la fabrication d'automobiles et de la construction navale ainsi que dans les industries électrique, pétrolière, alimentaire et chimique.

Selon l'INERIS (2005), le nickel est associé au cuivre, au fer et au manganèse pour fabriquer du monel[24], au fer et au chrome pour donner des aciers inoxydables et du chromel ou inconel[25], à l'aluminium, au chrome et au soufre pour obtenir l'alumel[26].

[24] Le monel est un alliage d'une grande robustesse et d'une excellente résistance à la corrosion dans de nombreuses situations acides et alcalines, il convient en particulier aux conditions de réductions. Il possède également une bonne ductilité et une bonne conductivité thermique. Parmi ses applications on compte : l'ingénierie navale, le traitement chimique et des hydrocarbures, les échangeurs de chaleur,

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Selon l'INRS[27] (2009), le nickel est également employé dans la production d'alliages non ferreux utilisés par exemple dans la fabrication de pièces de monnaie, d'outils, d'ustensiles de cuisine et de ménage… Par exemple, il est associé au cuivre et au zinc pour fabriquer du maillechort[28]. De plus, cet élément est utilisé dans la fabrication de pigments minéraux pour métaux et céramiques ainsi que pour réaliser des revêtements électrolytiques des métaux (nickelage).

Selon le site internet du Nickel Institute[29], le nickel est également employé minoritairement dans les secteurs de la fabrication :

- de réacteurs et turbines d'avions ;
- de structures de véhicules (tels que les trains, avions, métros, …) ;
- de métaux à mémoire de forme ;
- d'équipements pour la cuisine et la salle de bain ;
- d'équipements pour les industries pétrochimiques et pharmaceutiques ;
- d'instruments médicaux ;
- de CD, DVD et disques Blue-ray.

---

les soupapes et les pompes http://www.alloywire.com/french/monel_alloy_400.html (consulté en janvier 2014).

[25] L'inconel est un alliage d'une bonne résistance à l'oxydation et à la corrosion à températures élevées utilisé notamment pour les composants de fours, le traitement chimique et alimentaire et le ingénierie nucléaire : http://www.alloywire.com/french/inconel_alloy_600.html (consulté en janvier 2014).

[26] L'alumel est un alliage d'une bonne résistance à l'oxydation et à températures élevées utilisé notamment pour constituer l'élément négatif du thermocouple de type K. Ce thermocouple peut être utilisé jusqu'à 1250°C dans des atmosphères oxydantes et est probablement le thermocouple le plus commun : http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=noyssmFfhxYcc4gPLY7zXdMHtYFyoi&n=Hl6EK9Xcyg17YI66cDowFdpJuFTinL&ewd_urlNo=GFCat411&Catite=NI100260&CatSearNum=1 (consulté en janvier 2014).

[27] http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/doc/fichetox.html?refINRS=FT%2068 (consulté en janvier 2014).

[28] Bonne usinabilité, excellent pour travail à froid et excellente soudabilité. Son comportement lors d'un formage à chaud est médiocre. Ses applications comprennent rivets, visserie, fermeture éclair, éléments optiques et bijoux fantaisie : http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=orQCg5DJj2qub4t7rz0ggtpvgorWEk&n=jXAlfgv6DwtfneBxEY64315imQ2IQN&ewd_urlNo=GFCat4B11&Catite=CU100400&CatSearNum=2 (consulté en janvier 2014).

[29] http://www.nickelinstitute.org/NickelUseInSociety/AboutNickel/WhereWhyNickelIsUsed.aspx (consulté en janvier 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2.3.2 Vue d'ensemble des composés chimiques du nickel et de leur utilisation

Les composés du nickel ayant été enregistrés dans REACH (selon la base publique de l'ECHA consultée en Février 2014), pour des usages autres que des intermédiaires de synthèse et à des tonnages supérieurs à 100 tonnes sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 6. Composés du nickel enregistré dans REACH.

No CAS	Nom	Tonnages annuels
7718-54-9	chlorure de nickel / nickel dichloride	10,000 - 100,000 tonnes
16812-54-7	nickel sulphide	10,000 - 100,000 tonnes
7786-81-4	nickel sulphate	10,000 - 100,000 tonnes
8007-18-9	antimony nickel titanium oxide yellow	1,000 - 10,000 tonnes
12054-48-7	nickel dihydroxide	1,000 - 10,000 tonnes
12607-70-4	[carbonato(2-)]tetrahydroxytrinickel	1,000 - 10,000 tonnes
13138-45-9	nickel dinitrate	1,000 - 10,000 tonnes
35884-66-3	tetrakis(tritolyl phosphite)nickel	1,000 - 10,000 tonnes
71631-15-7	nickel iron chromite black spinel	1,000 - 10,000 tonnes
10028-18-9	nickel difluoride	100 - 1,000 tonnes
12004-35-2	dialuminium nickel tetraoxide	100 - 1,000 tonnes
12035-72-2	trinickel disulphide	100 - 1,000 tonnes
13770-89-3	nickel bis(sulphamidate)	100 - 1,000 tonnes
18718-11-1	nickel bis(dihydrogen phosphate)	100 - 1,000 tonnes
	lithium nickel cobalt aluminium oxide	100 - 1,000 tonnes
4454-16-4	nickel bis(2-ethylhexanoate)	100 - 1,000 tonnes

Plus en détail, le **nickel tétracarbonyle** est employé dans la fabrication de poudre de nickel de haute pureté. Il est également utilisé comme catalyseur en synthèse organique. Plusieurs autres composés du nickel (par exemple le **nickel bis(2-éthylhexanoate)** sont utilisés comme catalyseurs, notamment catalyseurs de polymérisation (Rieger, 2006).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

L'**acétate de nickel** est utilisé comme mordant[30] pour les textiles, comme intermédiaire dans la fabrication d'autres composés de nickel et comme catalyseur.

L'**oxyde de nickel** est utilisé dans la fabrication de sels de nickel, dans la fabrication de ferrites utilisées dans l'industrie électronique, dans la production de catalyseurs et pour le nickelage. Il est également employé comme colorant pour le verre, utilisé dans les peintures sur porcelaine, dans des composants électroniques et comme catalyseur.

L'**hydroxyde de nickel** est utilisé dans le domaine des batteries.

Le **carbonate de nickel** est employé (à hauteur de 2700 tonnes/an de nickel dans l'UE en 2000) pour la fabrication de catalyseurs (25 %), le nickelage électrolytique (75 %) et d'autres usages (5 %) (Danish EPA, 2008c[31]). Il est utilisé, selon les données SIDS (Screening Information Dataset) de l'OCDE[32], en Europe de l'Ouest, dans le nickelage, la production de catalyseurs, la production de pigments et dans les composants électroniques.

Le **chlorure de nickel** est employé (à hauteur de 1670 t Ni/an dans l'UE en 2001) pour le nickelage électrolytique, pour la production de catalyseurs (72 % des tonnages), en tant qu'intermédiaire pour la production de nickel par électrolyse (26 %), et divers autres usages (Danish EPA, 2008b[33]) (pour fabriquer des encres sympathiques et comme réactif de laboratoire). Il sert également à piéger l'ammoniac dans les masques à gaz. Selon les données SIDS (Screening Information Dataset) de l'OCDE, en Europe de l'Ouest, le chlorure de nickel est utilisé à 71 % pour le nickelage et à 29 % pour la production de catalyseurs.

Le **nitrate de nickel** est employé (à hauteur de 3 300 tonnes/an de nitrate de nickel dans l'UE en 2002) pour la production de catalyseurs (76 % des tonnages), comme intermédiaire dans la production de batteries nickel-cadmium (12 % des tonnages) et dans le prétraitement chimique des métaux (12 % des tonnages) (Danish EPA, 2008d[34]). Selon les données SIDS (Screening Information Dataset) de l'OCDE, en Europe de l'Ouest, la production de catalyseurs et les batteries représentent 92,5 % de la production total de nitrate de nickel de l'Union européenne.

---

[30] Dans l'industrie textile, le mordant est un composé chimique qui joue le rôle de lien entre la fibre textile et le colorant naturel : http://www.scrd.net/scrd_new/francais/textile_colorants_naturels_intro.html (consulté en janvier 2014).

[31] http://www.mst.dk/NR/rdonlyres/2929A8CB-8A5B-43C9-BB67-506D847E960E/0/Ni_carbonate_EU_RAR_HH (consulté en février 2014).

[32] http://webnet.oecd.org/HPV/UI/handler.axd?id=9ce00cf2-296e-459f-a92e-aec0c9771a7b (consulté en janvier 2014).

[33] http://www.mst.dk/NR/rdonlyres/BD706A72-29DD-4021-ABAE-BE3D66FD9BAE/0/Ni (consulté en février 2014).

[34] http://www.mst.dk/NR/rdonlyres/21D4A773-AA98-4160-91CA-BB1444238BC9/0/Ni_nitrate_EU_RAR_HH_March_2008_finaldraft.pdf (consulté en février 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Le **sulfate de nickel** est utilisé dans les bains de nickelage souvent conjointement avec le **chlorure de nickel**. Une alternative à ce mélange est celui constitué de **fluoborate de nickel**, ou le **sulfamate de nickel** (et d'usage important notamment pour la fabrication de robinetterie en « nickel-chrome ») (Danish EPA, 2008e). Le **sulfate de nickel** est aussi employé comme intermédiaire dans la fabrication de carbonate de nickel et de sulfate d'ammonium et de nickel. C'est le principal intermédiaire pour la fabrication de sels de nickel. Il sert à produire des catalyseurs et est employé comme mordant[13] pour les textiles. Il est également employé pour le noircissement du zinc et du bronze. Il est utilisé 3 400 tonnes/an de nickel en 2000 de sulfate de nickel dans l'UE (Danish EPA, 2008e[35]).

Le **sulfure de nickel** est utilisé dans la production de catalyseurs et dans l'hydrogénation des composés de soufre en pétrochimie.

Le **nickel bis(dihydrogen phosphate)** est notamment un composant de produits pour le traitement de surface de métaux (phosphatation).

Le **nickel bis(sulphamidate)** est utilisé en traitement de surface des métaux, pour la production de batteries, ainsi que celle d'autres sels de nickel, d'après le site internet Nickel Consortia.

Certains **pigments (comme le antimony nickel titanium oxide yellow)** contiennent du nickel, et peuvent être employés dans la coloration de matériaux comme des plastiques.

Enfin, les **scories de la production de ferronickel**, produites en grandes quantités, qui étaient considérées principalement comme des déchets, tendent à être progressivement réutilisées dans plusieurs domaines :

- matériau abrasif pour procédés de sablage industriel ;
- additifs améliorant les caractéristiques mécaniques du ciment ou de céramiques ;
- additifs d'asphaltes, employé pour apporter des propriétés antidérapantes.

Les scories de ferronickel ont été enregistrées, à la date de rédaction de ce document, dans le cadre de REACH par deux sociétés européennes pour des bandes de tonnage importantes (100 000 – 1 000 000 tonnes).

35 http://www.mst.dk/NR/rdonlyres/8DBA0CD9-5845-4C3D-832F-70E12B87F27C/0/Ni_sulfate_EU_RAR_HH_March_2008_finaldraft.pdf (consulté en février 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2.3.3 Les nanoparticules

D'après l'ANSES[36] (2013), les composés nanoparticulaires du nickel ayant été enregistrés dans le cadre de la réglementation sur les nanoparticules, ainsi que leurs usages, sont les suivants :

Tableau 7. Composé nanoparticulaires du nickel, d'après l'ANSES (2013).

Nom du composé	Tonnage	Usage
Tétraoxyde de difer et de nickel	1 - 10 kg	Autres.
Monoxyde de nickel	0,1 - 1 kg	Formulation de préparations et/ou reconditionnement ; Recherche scientifique et développement ; Fabrication de substances chimiques fines.
[2,3'-bis[[(2-hydroxyphényl)méthylène]amino]but-2-ène dinitrilato(2-)-N2,N3,O2,O3]nickel	100 kg - 1 t	Autres.
Jaune d'oxyde d'antimoine, de nickel et de titane		Formulation de préparations et/ou reconditionnement ; Bâtiment et travaux en contruction.

2.3.4 Réalisation d'alliages contenant du nickel

Selon le site internet CNUCED, le nickel est actuellement l'additif le plus répandu dans les alliages modernes. La proportion de nickel dans l'alliage est très variable selon les propriétés souhaitées. Le Tableau 8 présente quelques-uns de ces alliages ainsi que la proportion de nickel contenu.

[36] Bilan 2013 de déclarations des substances importées, fabriquées ou distribuées en France en 2012. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_public_format_final_20131125.pdf (consulté en mars 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Tableau 8. Proportions de nickel contenu dans différents types d'alliages, selon le site internet CNUCED.

Proportion de nickel	Type d'alliage concerné
1 – 3 %	Aciers spéciaux
8 – 14 %	Aciers inoxydables
15 – 40 %	Alliages spéciaux
40 – 90 %	Alliages spéciaux pour l'industrie aéronautique et électronique

A ce jour, plus des quatre cinquièmes de la production mondiale de nickel sont utilisés dans la fabrication d'alliages. Plus de 3000 sortes d'alliages sont recensés, leurs qualités tant physiques que mécaniques ou chimiques sont très variables et modulables en fonction du domaine et de l'emploi que l'on souhaite en faire.

2.3.5 Aciers inoxydables

2.3.5.1 Généralités

Selon le site internet de la SCF, les aciers inoxydables sont des aciers alliés présentant une résistance élevée à la corrosion à chaud ou à froid dans de nombreux milieux. Cette résistance chimique est due à la présence de chrome (à des teneurs supérieures à 10,5 %), qui protège, par passivation (formation d'oxyde Cr_2O_3 à l'interface alliage-film passif), la surface de l'alliage. La résistance à la corrosion atmosphérique est multipliée par cent par rapport aux aciers courants.

Il existe deux principaux types d'aciers inoxydables : les aciers au chrome ainsi que les aciers au chrome-nickel.

- Aciers au Chrome-Nickel : la nuance de base contient 18 % de Cr et 10 % de Ni (nuance 18-10). Ils allient une grande résistance à la corrosion avec une bonne aptitude à la déformation facilitant la mise en forme. Ce sont les aciers inoxydables les plus utilisés, dans les industries chimiques, alimentaires, les couverts de table... Ils représentent 76 % de la production d'aciers inoxydables du monde occidental.
- Les aciers austéno-ferritiques contiennent 4 à 7 % de Ni. Ils sont surtout utilisés pour élaborer des aciers moulés.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2.3.5.2 Production et utilisation d'acier inoxydable

- Production 2011 (Source ISSF[37] via le site internet de la SCF) : France 300.10^3 tonnes, Monde 33 991.10^3 tonnes et Union européenne 7 528.10^3 tonnes.
- Utilisation (en % de la consommation mondiale de nickel) : Europe 34 % (Figure 5 d'après le site internet de la société Eramet, chiffres de 2000).

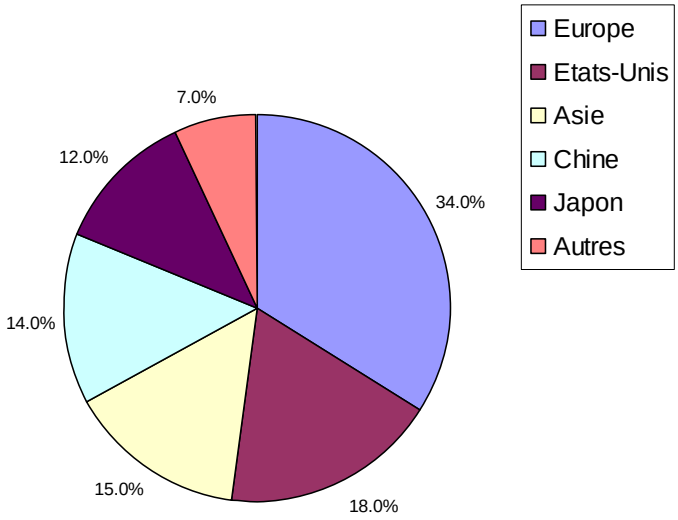


Figure 5. Consommation d'acier inoxydable par zone en 2000, d'après le site internet d'Eramet.

- Secteurs d'utilisation en 2011, dans le monde (site internet de la SCF[38]) :
  - Industries alimentaires et ustensiles domestiques : 38 % ;
  - Equipement industriels : 19 % ;
  - Bâtiment et construction : 17 % ;
  - Transport : 12 % ;
  - Chimie, pétrole, énergie : 11 % ;
  - Divers : 3 %.

[37] International Stainless Steel Forum.

[38] http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/mater/acin/cadacin.htm (consulté en janvier 2014).

Utilisations diverses :

- Chimie : l'utilisation des aciers inoxydables a débuté en 1920, dans l'industrie de l'acide nitrique ;
- Equipements ménagers : tambours de lave-linge, éviers, couverts, plats, casseroles, ...
- Pièces de monnaie : utilisation mondiale d'environ 180 000 $t.an^{-1}$;
- Bâtiment : en France, 3 millions de m^2 de toits sont recouverts d'inox. En France, le bâtiment représente 10 % de la consommation d'aciers inoxydables ;
- Véhicules et transports : trains, métro, pots d'échappements, ...
- Agro-alimentaire : industries du chocolat, des produits laitiers, cuves et fûts des brasseries, cuves viticoles (17 % du vin français est stocké dans de l'acier inoxydable ; 70 % des fûts à bière sont en acier inoxydable). En Europe de l'Ouest, le marché est de 3,7 millions de cuves par an dont 250 000 en France. La consommation mondiale d'acier inoxydable dans ce secteur est de 30 000 $t.an^{-1}$;
- Nucléaire : outre la cuve principale du réacteur Super Phénix l'acier inoxydable est également utilisé dans l'industrie nucléaire pour stocker des déchets à haute et moyenne activité. La consommation d'acier inoxydable dans ce secteur est, en France, de 7 500 $t.an^{-1}$.

2.3.6 Superalliages

Selon le site internet de la SCF, ces alliages résistent mécaniquement et chimiquement à de hautes températures. Ils sont, par exemple, à la base du développement des turboréacteurs utilisés en aéronautique[39].

Ces superalliages sont en général destinés à l'aéronautique, aux réacteurs chimiques, à la cryogénie et aux centrales thermiques (site internet CNUCED). Selon le site internet de la SCF, ils constituent plus de 50 % de la masse des moteurs aéronautiques où ils sont présents dans :

- les disques de compresseurs et de turbines, et certains arbres, dont les températures de fonctionnement atteignent 650°C ;
- les aubes dont la température est portée à 1000°C ;
- les chambres de combustion où la température peut atteindre 1500-1800°C.

[39] L'amélioration du rendement des turbines aéronautiques est liée à l'accroissement de la température d'entrée de la turbine. L'accroissement moyen de cette température depuis 1970 a été d'environ 15°C.an^{-1}, la contribution relative aux matériaux étant d'environ 7°C.an^{-1}.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2.3.7 Nickelage

Selon le site internet CNUCED, le nickel possède comme qualité d'être inoxydable à l'air dans des conditions normales et d'offrir un bel éclat. Il peut donc être employé afin de nickeler des pièces en fer (qui s'oxydent à l'air), en cuivre ou en laiton (qui perdent facilement leur éclat).

Selon le site internet de la SCF, les pièces appelées « chromées » sont en fait essentiellement nickelées. Elles sont constituées d'acier recouvert par une couche de 20 à 30 mm de nickel sur laquelle est déposée une mince pellicule de chrome (de 0,2 à 0,3 mm) ou parfois d'un autre métal destinée uniquement à faciliter l'entretien. Selon le site internet de SFTS[40], les principaux secteurs d'activité dans lesquels le nickelage intervient sont :

- les équipements collectifs ;
- les équipements médicaux (lits, fauteuils, …) ;
- les cycles ;
- les équipements publicitaires (présentoirs, …) ;
- l'outillage ;
- les équipements de loisir ;
- les équipements de manutention ;
- l'automobile et les poids-lourds ;
- la ventilation ;
- l'électronique ;
- la tôlerie ;
- le bâtiment ;
- la tringlerie ;
- les équipements agro-alimentaires ;
- la mécanique ;
- le matériel agricole ;
- …

[40] Société Forézienne de Traitement de Surface.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

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 nickel pur placés dans des paniers en titane. La solution du bain d'électrolyse contient des composés du nickel, notamment du sulfate et du chlorure de Ni^{2+}.
- Nickelage par réduction chimique : les pièces à revêtir sont immergées dans une solution d'ions Ni^{2+} contenant un réducteur. On obtient ainsi des dépôts très durs, d'épaisseur uniforme.

En France comme dans les autres pays de l'UE, l'activité de production d'acier traité zinc-nickel a augmenté de façon continue entre 1992 et 2001 et connu une légère baisse en 2002 (European Commission, 2005a).

2.3.8 Autres aciers

Selon le site internet de la SCF, du nickel peut également être incorporé à d'autres aciers (aciers de construction) afin d'en augmenter la résistance mécanique. Par exemple :

- 9 % de nickel sont introduits dans les aciers afin de les rendre résistants au froid ;
- 36 % de nickel sont introduits afin d'obtenir un acier possédant un coefficient de dilatation nul.

Ainsi, selon le site de la SCF, d'autres utilisations minoritaires du nickel métallique peuvent être rapportées, par exemple :

- Cupro-nickel : Cu et Ni sont miscibles en toutes proportions. Ces alliages possèdent une excellente résistance à la corrosion par l'eau de mer. Leurs propriétés mécaniques et chimiques sont d'autant meilleures que la teneur en Ni est plus élevée. Les cupronickels à 40-45 % de Ni ont leur résistivité qui ne varie pas en fonction de la température (utilisation dans les thermocouples) ;
- Maillechorts : de 9 à 26 % de Ni (et de 17 à 28 % de Zn). Leurs propriétés sont intermédiaires entre celles des laitons et des cupronickels et ils sont utilisés en orfèvrerie ;
- Alliages Ni-Cr : 60 % de Ni (Cr : 35 %, Si : 2 %, Mo : 1 %, Fe : 1 %) utilisés pour réaliser des couronnes et bridges dentaires ;

- Alliages Inconel 600 : alliages à base de Ni (contenant au minimum 72 % de Ni + Co, 14 à 17 % de Cr et 6 à 10 % de Fe selon le site internet Special Metals[41]). Ces alliages qui étaient utilisés pour certaines pièces des réacteurs nucléaires à eau pressurisée des centrales françaises sont sensibles à la corrosion sous contrainte et les pièces présentent des fissures. Ils sont remplacés par l'Inconel 690 (contenant au minimum 58 % de Ni, 27 à 31 % de Cr et 7 à 11 % de Fe selon le site internet Special Metals[42]) ;
- Développement de l'utilisation d'un alliage Zn-Ni (à 13 % de Ni) pour la galvanisation de tôles pour automobiles ;
- Alliages divers : pièces de monnaie de l'Union européenne de 1 et 2 € : la pièce de 1 € est laiton de nickel pour l'anneau extérieur et comporte trois couches (cupro-nickel, nickel, cupro-nickel) pour la partie centrale, la pièce de 2 € est en cupro-nickel pour l'anneau extérieur et comporte trois couches (laiton de nickel, nickel, laiton de nickel) pour la partie centrale (site internet de l'Euro[43]) ;
- Catalyseur (Ni-Al) d'hydrogénation pour la fabrication de l'acide adipique ;
- Alliages (Ni-Ti) à mémoire de forme : l'alliage TiNi (50/50 atomique) a été le premier alliage à mémoire de forme fabriqué industriellement.

2.3.9 Batteries

Dans le cadre de l'arrêté du 26 juin 2001, l'ADEME a été chargée de la mise en place de l'Observatoire des piles et accumulateurs. Chaque année, les acteurs de la filière doivent transmettre une déclaration relative aux flux mis sur le marché, collectés, valorisés ou éliminés. Les données issues des déclarations pour l'année 2012 sont les suivantes. Plus de 141 millions d'accumulateurs de moins de 1 kg (dits portables), soit plus de 8 708 tonnes ont été mis sur le marché. 2 160 tonnes sont des accumulateurs Ni-Cd (Nickel - Cadmium), 952 tonnes des accumulateurs Ni-Cd (Nickel - Cadmium), 865 tonnes des accumulateurs au plomb, 1 740 tonnes des accumulateurs NiMH (Nickel Métal Hydrure) et 5 114 tonnes des accumulateurs Li-ion (Lithium-ion). Ces deux dernières technologies se développent très rapidement.

[41] http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20600%20(Sept%202008).pdf (consulté en janvier 2014).

[42] http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20690.pdf (consulté en janvier 2014).

[43] http://www.ecb.europa.eu/euro/coins/common/html/index.fr.html (consulté en janvier 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

2.3.9.1 Batteries Ni-Cd

Selon le site de la SCF, dans le domaine des accumulateurs (piles rechargeables) Ni-Cd, la matière constituant l'anode est un mélange pulvérulent d'hydroxyde de nickel et de graphite, celle constituant la cathode est un mélange d'hydroxyde de cadmium mélangé à d'autres substances.

Selon Robert et Alzieu (2005), il apparaît que les performances techniques de l'accumulateur nickel-cadmium sont assez largement comparables à celles des accumulateurs au plomb. Néanmoins, ce bilan est influencé défavorablement par deux facteurs. Les prix du nickel et du cadmium, ainsi que ceux des procédés de fabrication, conduisent à un coût de l'énergie stockée largement supérieur à celui associé à l'accumulateur au plomb. Enfin, la manipulation du cadmium n'est pas sans danger pour la santé et la mise au rebut des batteries usagées présente un risque pour l'environnement. Dans ces conditions, pour l'Europe de l'Ouest, le marché de l'accumulateur nickel-cadmium représente aujourd'hui environ 10 % de celui de l'accumulateur au plomb.

Les applications grand public sont en décroissance rapide, alors que les applications industrielles (ferroviaire, aviation, véhicules électriques) se maintiennent. Les accumulateurs Ni-Cd ne représentent cependant que 2 % des accumulateurs industriels, leur immense majorité étant au plomb (Commission européenne, 2003).

La société française SAFT est un acteur majeur de ce marché. Seul fabricant français, elle emploie 4 000 personnes dans le monde. Son chiffre d'affaires global est d'environ 598 millions d'euros pour l'année 2012 (site internet SAFT). La production d'accumulateurs Ni-Cd pour l'industrie représente 50 % à 60 % de son activité (premier rang en Europe).

L'emploi du couple Ni-Cd subsiste pour des piles et batteries rechargeables grand public, mais est désormais marginal pour des batteries de téléphones mobiles et d'ordinateurs portables. En revanche, leur emploi reste important pour les outils portables (Noréus, 2000).

2.3.9.2 Batteries Ni-Fe

Selon Robert et Alzieu (2005), l'accumulateur nickel-fer a des performances spécifiques et une durée de vie comparables à celles du couple nickel-cadmium, mais l'accumulateur nickel-fer est pénalisé par un rendement de charge faible, une autodécharge importante et un comportement médiocre à basse température. Par contre, le fer est un matériau plus pratique d'emploi que le cadmium du fait de son faible prix et de son absence de toxicité.

Dans cette situation contrastée, le développement de l'accumulateur nickel-fer a été lent et limité à quelques pays, dont les États-Unis, tandis que ses applications se sont longtemps identifiées à celles du nickel-cadmium (stationnaire, installations de secours et d'alarme, traction lourde...). Elles se sont étendues, quelques années durant, de façon limitée, au véhicule électrique. Aujourd'hui, ce type d'accumulateur n'a plus les faveurs des acteurs influents du domaine.

2.3.9.3 Batteries Ni-hydrure métallique

Selon Robert et Alzieu (2005), cet accumulateur est habituellement désigné par le symbole Ni-MH. Un gain significatif en énergie volumique favorise le développement du système Ni-MH au détriment du système Ni-Cd. Cela étant, l'accumulateur Ni-MH est le siège d'une autodécharge et est médiocrement adapté aux régimes rapides en charge comme en décharge. Par contre, l'accumulateur Ni-MH fait beaucoup mieux en régime impulsionnel (utile dans le domaine du véhicule hybride[44]).

Dans le domaine des équipements autonomes ou portables et des voitures électriques, les accumulateurs Ni-MH, après avoir dépassé, aussi bien en nombre d'unités qu'en capacité globale, les accumulateurs Ni-Cd, sont aujourd'hui en perte de vitesse devant le Li-ion.

2.3.9.4 Batteries Ni-Zn

Une société a récemment mis en service une unité pilote de production de batteries nickel-zinc. Bien que la composition de ce type de batterie reste confidentielle, l'évolution du marché[45] ainsi que les qualités affichées par le producteur[46] suggèrent de suivre l'évolution de ce type de batteries dans les années à venir.

Selon France ST (2005), ce nouveau type de batterie parvient à éviter la dissolution du zinc pendant la phase de décharge (qui, jusqu'à présent, se reformait de manière anarchique pendant la recharge, ce qui avait pour conséquence d'encrasser la batterie et de provoquer des courts-circuits).

2.3.9.5 Batteries ZEBRA[47]

Les batteries ZEBRA (Zero Emission Batteries Research Activity) sont à base de chlorure de nickel pour l'électrode positive et de sodium pour l'électrode négative. Cette technologie a été mise au point pour les applications véhicules électriques, transport lourd et transport

[44] Le développement du véhicule hybride paraît plus probable aujourd'hui que celui du véhicule électrique, l'adoption de l'accumulateur Ni-MH suppose des gains en puissance spécifique. Cette perspective n'est pas irréaliste, car l'accumulateur Ni-MH, plus récent que les deux autres systèmes, dispose certainement d'une marge de progression. Les véhicules hybrides, aujourd'hui commercialisés, portent d'ailleurs témoignage de ces progrès (Robert et Alzieu, 2005).

[45] le marché des batteries pèse 20 milliards d'euros en 2004 et devrait atteindre 70 milliards d'ici 2014-2019 (Barbotin, 2004).

[46] Performances approchant celle de batteries lithium pour un coût inférieur.

[47] http://www.ineris.fr/centredoc/ve-technologies-batteries-couv-ineris.pdf.

public. Elle semble réservée à des marchés de niche et est considérée par certains promoteurs de cette filière comme une technologie de transition.

2.3.10 Usage du nickel dans le secteur de l'automobile (hors batteries)

Selon le site internet de la SCF, les automobiles produites aux États-Unis contiennent environ 1 kg de nickel ainsi, l'industrie automobile représente de 6 à 8 % de la consommation de Ni du monde (pièces nickelées et alliages).

Ainsi, selon le site euro-inox[48], l'acier inoxydable et les pièces dites chromées sont couramment utilisés dans l'échappement automobile. Des pièces diverses telles que des tuyaux flexibles et des colliers de serrage sont utilisés dans le compartiment moteur où la résistance à la corrosion est d'une importance primordiale. Par ailleurs, il existe un potentiel de développement dans les applications structurales. Grâce à leurs remarquables caractéristiques mécaniques, les composants en acier inoxydable peuvent être plus légers que leurs homologues réalisés en « alliage léger ». Leur aptitude à la consolidation permet également d'améliorer l'absorption d'énergie.

De nos jours les pièces "chromées" sont très fortement concurrencées par les plastiques (en particulier pour les pièces chromées esthétiques : pare-chocs). Néanmoins, pour les années à venir, un certain usage des pièces nickelées en automobile devrait se maintenir via le phénomène « tuning ».

2.3.11 Chimie

Selon le site internet de Nickel Institute et European Commission (2003), le rôle du nickel comme catalyseur dans des processus chimiques est peut-être la moins connue de ses utilisations. Plusieurs composés du nickel sont aussi utilisés comme catalyseurs, dont notamment le chlorure de nickel, le sulfure de nickel, le sulfate de nickel, le nitrate de nickel, le disulfure de nickel, le nickel bis(2-ethylhexanoate), l'oxyde de nickel et le nickel tétracarbonyle. Cependant, les catalyseurs à base de nickel finement divisé sont indispensables à plusieurs réactions importantes, y compris l'hydrogénation d'huiles végétales, la reformulation des hydrocarbures ainsi que la production d'engrais, de pesticides et des fongicides.

Plus en détail, le site internet de la SCF présente l'exemple d'un catalyseur (Ni-Al) destiné à l'hydrogénation pour la fabrication de l'acide adipique. De même, on rapporte également l'hydrogénation de l'acide oléique (acide cis-9-octadecenoïque $C_{17}H_{33}COOH$), liquide, en acide stéarique (acide octadecanoïque $C_{17}H_{35}COOH$), solide, sur du nickel finement divisé. Cette hydrogénation est encore largement utilisée de nos jours dans de nombreux domaines

[48] http://www.euro-inox.org/ (consulté en janvier 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

(alimentation, pharmacie, savonnerie, parfumerie, peinture,...) et le nickel reste le catalyseur phare.

La liste complète des réactions réalisées en présence d'un catalyseur contenant du nickel est impossible à dresser dans le cadre de cette fiche, néanmoins, on peut se reporter au rapport publié en 2003 (European Commission) pour plus de détails. On peut toutefois donner un aperçu des composés organiques qui font intervenir le nickel comme catalyseur :

- Alcools (ethylhexanol, isopropanol, oxo alcools);
- Amines aliphatiques (ethyl et isopropylamines) et amines aromatiques ;
- Nitriles ;
- Toluène Di Isocyanate (TDI) ;
- Cyclohexane.

Dans le cas de l'ethylhexanol, on emploie de l'ordre d'un kg de nickel par tonne de produit, et les pertes de catalyseur, inférieures à 0,4 kg par tonne de produit, sont recyclées pour récupérer le nickel.

Dans le cas du cyclohexane, le procédé en phase aqueuse utilise quelques tonnes de recyclage par an pour une usine typique, qui est recyclé pour récupérer le métal.

Le nickel est employé comme catalyseur dans l'oxydation catalytique des COV (European Commission, 2002).

En dehors de l'emploi comme catalyseur, le nickel est aussi utilisé comme réactifs pour produire des composés organométalliques, comme des dithiocarbamates métalliques. Ce composé (nickel dithiocarbamate), est utilisé comme additif antidégradant pour caoutchoucs, et protège les pièces en caoutchouc pendant leur durée de vie contre les dégradations liées à l'oxygène de l'air ou à l'ozone. Il est produit en France par MLPC International (Groupe Arkema) sur le site de Lesgor en Aquitaine.

Enfin, le nickel est présent, en combinaison avec du graphite, dans certains élastomères conducteurs à base de silicone.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

3 REJETS DANS L'ENVIRONNEMENT

3.1 Sources naturelles de nickel

La teneur moyenne de l'écorce terrestre en nickel est de 75 ppm[49]. Cette teneur peut varier selon la localisation de 0,7 à 259 mg Ni/kg[50].

Le FOREGS[51] construit des cartes montrant les concentrations en nickel dans 26 pays européens et dans différents milieux (sol couche profonde et de surface, humus, sédiments de cours d'eau et de plaines alluviales et l'eau). Ces cartes montrent de grandes différences entre les régions. Ainsi le sud de la Scandinavie, le nord de l'Allemagne, la Pologne et les pays baltes présentent des teneurs en nickel inférieures à 6 mg/kg, tandis que la Grèce, le nord de l'Italie, la Slovénie et la Croatie présentent des teneurs supérieures à 40 mg/kg (supérieure à 80 mg/kg dans le cas de la Grèce). La France présente des teneurs variant entre 10 et 40 mg/kg selon les régions et le type de sol.

Bennett (1981) a estimé (tous milieux confondus) les rejets naturels de nickel à l'échelle mondiale :

- poussières éoliennes: 4 800 $t.an^{-1}$;
- volcans: 2.500 $t.an^{-1}$;
- végétation: 800 $t.an^{-1}$;
- incendies de forêts: 200 $t.an^{-1}$;
- poussières de météorites: 200 $t.an^{-1}$;
- projections d'eau de mer: 9 $t.an^{-1}$;

Le total de ces rejets atteint $8,5.10^{3}$ $t.an^{-1}$.

[49] Site internet de la société chimique de France : http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm (consulté en décembre 2013).

[50] http://www.nickelinstitute.org/Sustainability/EnvironmentalQuality/Soil.aspx (consulté en décembre 2013).

[51] Forum of the European Geological Surveys : Atlas Géochimique de l'Europe : http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/ (consulté en décembre 2013).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

3.2 Sources non-intentionnelle de nickel

Sans objet

3.3 Emissions anthropiques totales

Dans le cadre de l'étude « Source screening of priority substances under the WFD » (Directive Européenne « Water Framework Directive »ou Directive Cadre sur l'Eau établie en 2000) une évaluation datée de 2003 a été menée pour le nickel (cf. Tableau 9).

Selon le site internet de l'IREP[52] (registre français des émissions polluantes), en France, pour l'année 2012, 248 établissements industriels étaient répertoriés en tant qu'émetteurs de nickel dans l'environnement (air, eau, sol). Parmi ces établissements, 64 rejetaient du nickel dans l'air, 126 dans l'eau directement, 20 dans l'eau indirectement et 72 dans les sols. Tous milieux confondus, les rejets industriels de nickel sont donc extrêmement diffus et disséminés à l'échelle du territoire national.

[52] Registre Français des Emissions Polluantes http://www.pollutionsindustrielles.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php (consulté en janvier 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Tableau 9. Source et importance des voies de contamination en nickel des eaux de surface, d'après WFD, 2003.

Source	Importance de la source en termes de rejets totaux		
	Majeure	Mineure	Négligeable
Voies diffuses vers les eaux de surface :			
Dépôts atmosphériques à la surface des eaux	X		
Depuis les eaux profondes		X	
Liées aux activités agricoles		X	
Liées aux modes de transport		X	
Rejets accidentels			X
Rejets depuis les matériaux et les constructions en zone non-urbaine			X
Sources ponctuelles vers les eaux de surface :			
Ruissellement depuis les immeubles en zone urbaine		X	
Par usage de produits domestiques		X	
Liées aux activités industrielles des PME/PMI			X
Liées aux activités industrielles (extraction et raffinage de nickel ; raffinage de pétrole ; production d'énergie ; électrodéposition ; production d'inox, d'alliage métalliques, de pigments, de batteries, …)	X		
Traitement des déchets solides		X	
Pertes depuis les sédiments contaminés			
Pollutions historiques		X	
Emissions vers l'atmosphère			
Liées à l'agriculture			X
Liées au trafic routier			X
Liées aux constructions			X
Par usage domestique et autres de produits			X
Depuis les industries soumises à la directive IPPC[53] (extraction et raffinage de nickel ; raffinage de pétrole ; production d'énergie ; électrodéposition ; production d'inox, d'alliage métalliques, de pigments, de batteries, …)	X		
Depuis les PME et PMI			X
Depuis les zones de stockage des déchets (décharges et autres)			X
Depuis les zones contaminées (pollutions historiques)			X

[53] L'Union européenne a une série de règles communes sur l'octroi d'autorisations aux installations industrielles. Ces règles sont exposées dans la directive IPPC de 1996.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Les rejets de nickel par les industries productrices ou utilisatrices de nickel sont estimés dans le Tableau 10.

Tableau 10. Estimation des rejets de nickel, d'après Danish EPA, 2008a.

Emissions totales en UE	Air (en kg Ni/an)	Eau de surface (en kg Ni/an)
Fonte/raffinage	8 200	70 914
Production d'aciers inox		16 660
Fabrication de produits en acier	454	1 004
Production d'alliages de nickel	187	240
Prodcution d'aciers	1 290	35
Produits chimiques	705	2 331
Catalyseurs	2 194	290
Nickelage		1 370*
Fabrication de produits en métal		13
Batteries	64,5	463
Recyclage	0,85	5,8**

* vers les eaux de surface et les égouts

** vers les égouts

3.4 Emissions atmosphériques

3.4.1 Emissions françaises

En France, selon l'INS[54], les émissions de nickel en 2007 étaient réparties sur le territoire comme le montre la figure ci-après.

[54] Inventaire National Spatialisé : http://90.83.82.201/ins-webapp/ (consulté en mars 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

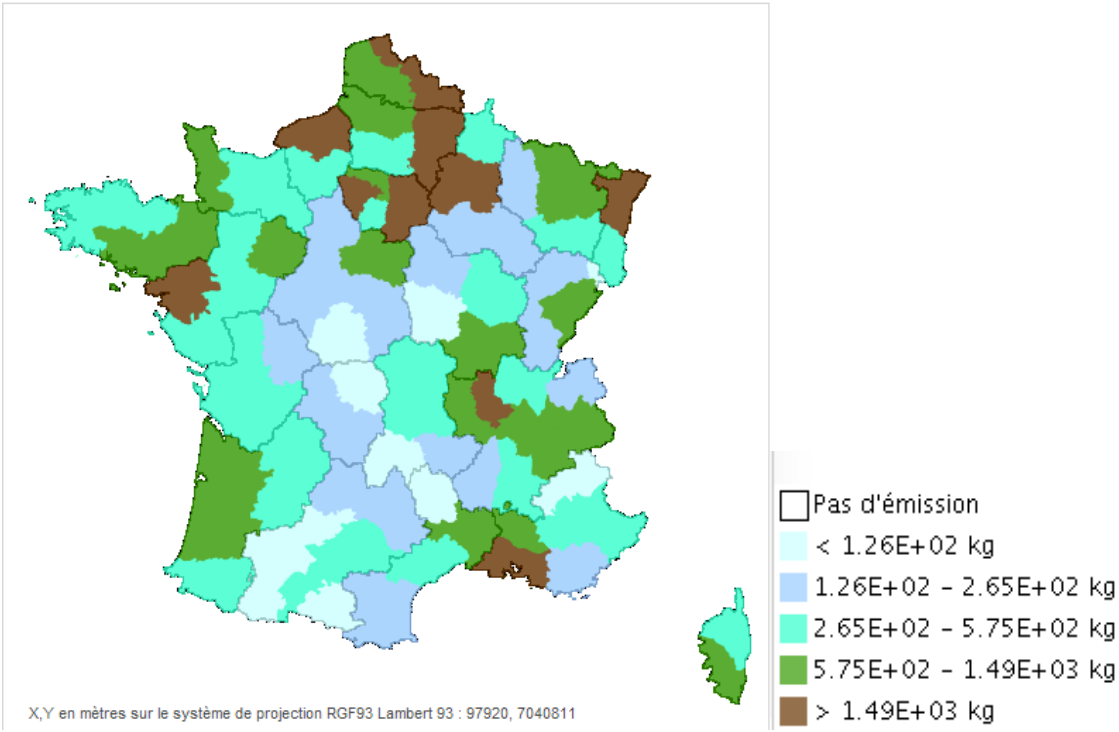


Figure 6. Répartition des émissions de nickel en France en 2007, d'après l'INS.

Les départements ayant émis le plus de nickel en 2007 étaient le Nord, l'Aisne, la Seine-Maritime, les Yvelines, la Seine-et-Marne, la Marne, le Bas-Rhin, la Loire-Atlantique, le Rhône et les Bouches-du-Rhône.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

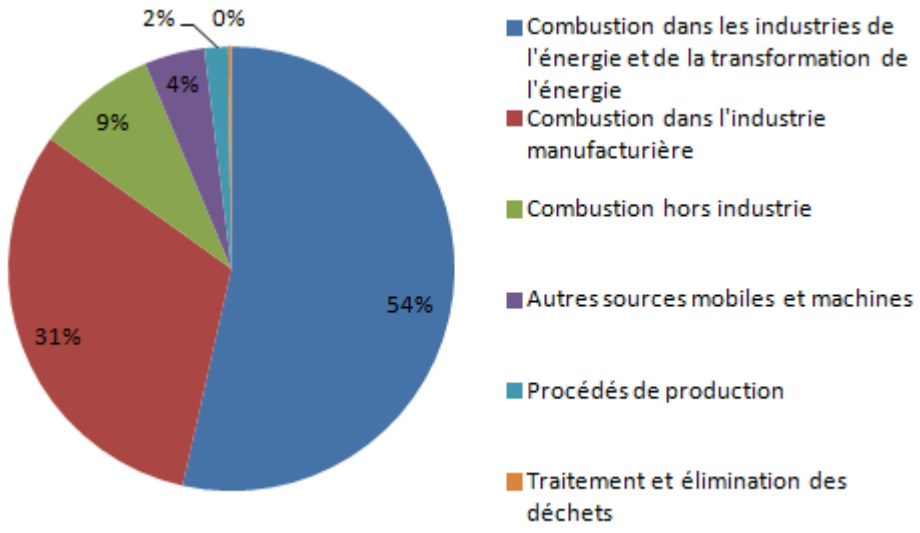


Figure 7. Secteurs émettant du nickel en France en 2007, d'après l'INS.

Les deux secteurs émettant le plus de nickel en France en 2007 étaient la combustion dans les industries de l'énergie et de la transformation d'énergie (53 %) et la combustion dans l'industrie manufacturière (32 %).

Selon le site internet du CITEPA[55], le nickel et ses composés sont principalement rejetés dans l'air par les sous-secteurs industriels suivants (sous-secteurs prépondérants en 2011 pour la France métropolitaine) :

1 – Chimie : 33 % ;
2 – Raffinage de pétrole : 28 % ;
3 – Métallurgie des métaux ferreux : 6,7 % ;
4 – Tertiaire : 5,9 % ;
5 – Production d'électricité : 5,4 %.

Ces mêmes données peuvent être présentées sous forme graphique dans la Figure 8.

[55] Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique : http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/polluants/metaux-lourds/nickel (consulté en janvier 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

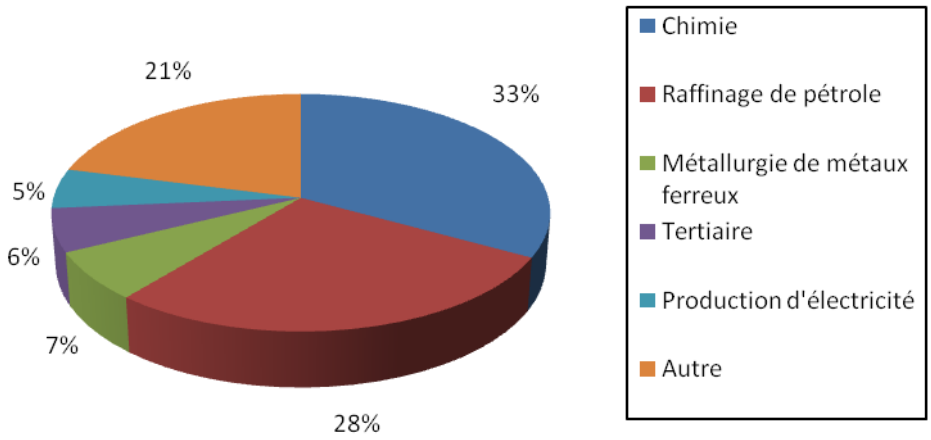


Figure 8. Secteurs industriels responsables des rejets atmosphériques de nickel et de ses composés, d'après les données du CITEPA, 2011.

Les rejets atmosphériques ont représenté 76 tonnes en 2011. Ce chiffre correspond au minimum des rejets jamais rapportés (rejets suivis depuis 1990). La diminution observée de 1990 à 2011 équivaut à – 75 % (Figure 9).

Selon les chiffres publiés par le CITEPA (2013), deux secteurs prédominent majoritairement dans les émissions de nickel : l'industrie manufacturière (consommation de fioul lourd et installations sidérurgiques) et la transformation d'énergie (en grande majorité le raffinage du pétrole) avec respectivement 50 % et 38 % des émissions totales en France métropolitaine en 2011. Les émissions de nickel sont essentiellement expliquées par de la présence de ce métal à l'état de traces dans le fioul lourd. La baisse des émissions de nickel est due à une diminution de la consommation de fioul lourd.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

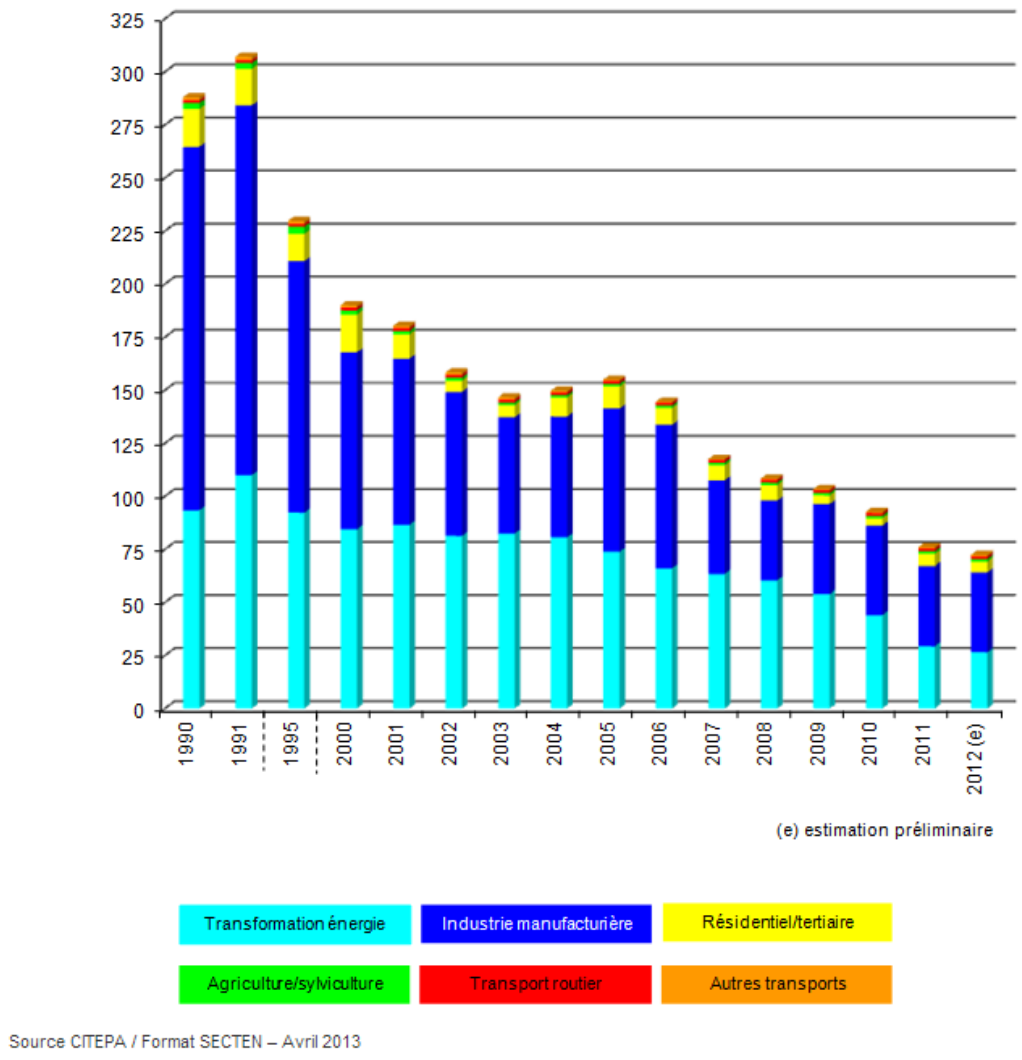


Figure 9. Émissions de nickel dans l'air en France métropolitaine, en tonnes, d'après CITEPA, 2013.

Selon INERIS (2006), le nickel émis dans l'atmosphère par des sources anthropiques l'est principalement sous forme d'aérosols, ce qui couvre une très large gamme de taille de

particules[56]. Les émissions des centrales électriques sont associées à des particules de plus petite taille que celles émises par des fonderies. Les particules contenant du nickel peuvent atteindre des demi-vies de l'ordre d'une semaine à un mois (Hertel *et al.*, 1991 ; ATSDR, 1997).

La nature du nickel présent dans des particules d'origine anthropique varie selon l'origine de ces particules (Hertel *et al.*, 1991 ; ATSDR, 1997). Ainsi, les émissions de nickel issues de la combustion d'huiles se présentent principalement sous forme de sulfates. Les cendres volantes provenant de la combustion du charbon contiennent majoritairement du nickel sous forme d'oxydes complexes de fer. L'extraction minière et la fonte du minerai de latérite émettent dans l'atmosphère des silicates de nickel et des oxydes fer-nickel. Le raffinage des mattes conduit à des émissions de nickel métallique et de sulfure de nickel.

Le site européen E-PRTR regroupe les émissions des 27 Etats membres de l'Union européenne ainsi que l'Islande, le Liechtenstein, la Norvège, la Serbie et la Suisse. Selon le site internet E-PRTR[57], les émissions de nickel atmosphériques françaises représentent 17 % des émissions européennes totales en 2011.

Le site internet E-PRTR, pour la France, pour 205 établissements répertoriés, rapporte 58 établissements émettant du nickel vers l'atmosphère pour l'année 2011 et des émissions de nickel de 41,2 tonnes (soit environ 54 % des émissions rapportées par le CITEPA).

3.5 Emissions vers les eaux

3.5.1 Rejets industriels dans les eaux européennes

Le nickel et ses composés peuvent atteindre les eaux de surface s'ils sont présents dans les eaux usées rejetées par des sites industriels.

Au niveau européen, le site internet E-PRTR présente les émissions directes (Figure 10) de nickel et de ses composés vers l'eau (année 2011) pour 1 125 installations industrielles.

[56] Selon l'ATSDR (1997) le diamètre moyen des particules d'origine anthropique contenant du nickel est de 5,4 µm.

[57] Registre européen des rejets et des transferts de polluants : http://prtr.ec.europa.eu/PollutantReleases.aspx (consulté en janvier 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

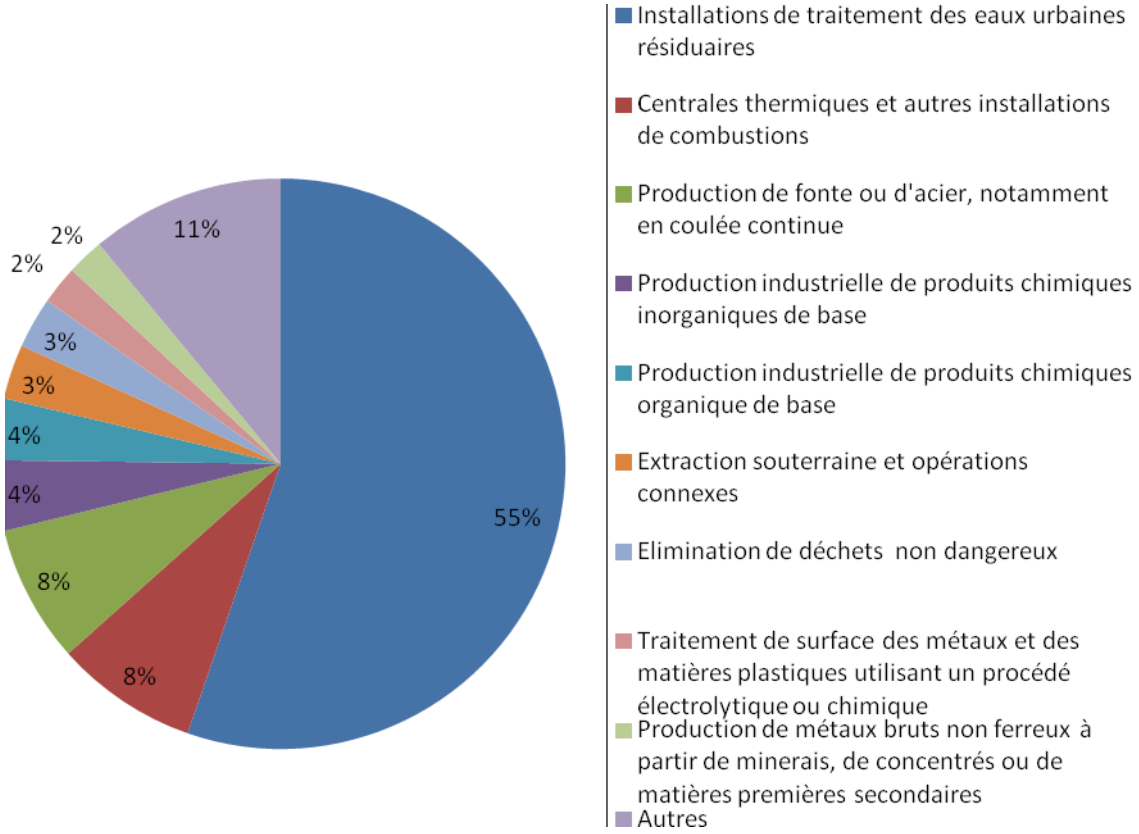


Figure 10. Emissions de nickel vers l'eau en Europe en 2011, d'après le site internet E-PRTR.

Selon le site internet E-PRTR, les émissions françaises de nickel vers les eaux de surface représentent 6 % des émissions européennes totales. Il convient de préciser que ces données d'émission n'incluent pas la Nouvelle-Calédonie[58].

Le BREF sur les installations de traitement des déchets dangereux indique que la concentration moyenne dans leurs effluents en Europe varie de <0,01 à 0,1 mg/L (en 2002, pour 9 installations répertoriées) (European Commission, 2005c).

[58] De par son statut territorial particulier (Pays d'Outre Mer ou POM), la Nouvelle-Calédonie n'est pas soumise aux obligations liées à la Directive Cadre sur l'Eau.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

D'après (European Commission, 2005), les valeurs typiques d'émissions de nickel par les aciéries (sites non équipés de système de traitement des effluents gazeux) sont 0,015 mg.Nm^{-3} (mg.m^{-3} à 0°C et sous une pression de 1.013 bar). D'autre part, lorsque des telles installations sont équipées de systèmes de "lavage" des effluents gazeux, les teneurs en nickel observées dans les rejets liquides atteignent 0,04 à 0,23 mg.L^{-1}.

3.5.2 Rejets industriels français

Parmi les 248 établissements industriels émetteurs de nickel répertoriés sur le site internet IREP (France métropolitaine, Guyane, Guadeloupe, Martinique et Réunion uniquement), seuls 146 établissements émettent ce métal vers l'eau (émissions directes et/ou indirectes). Ainsi, ces émissions sont estimées pour l'année 2012 à respectivement 16,1 tonnes et 2,4 tonnes pour les émissions directes et indirectes.

Les activités principales de ces établissements industriels sont reprises ci après en fonction de l'importance des rejets observés (Figure 11).

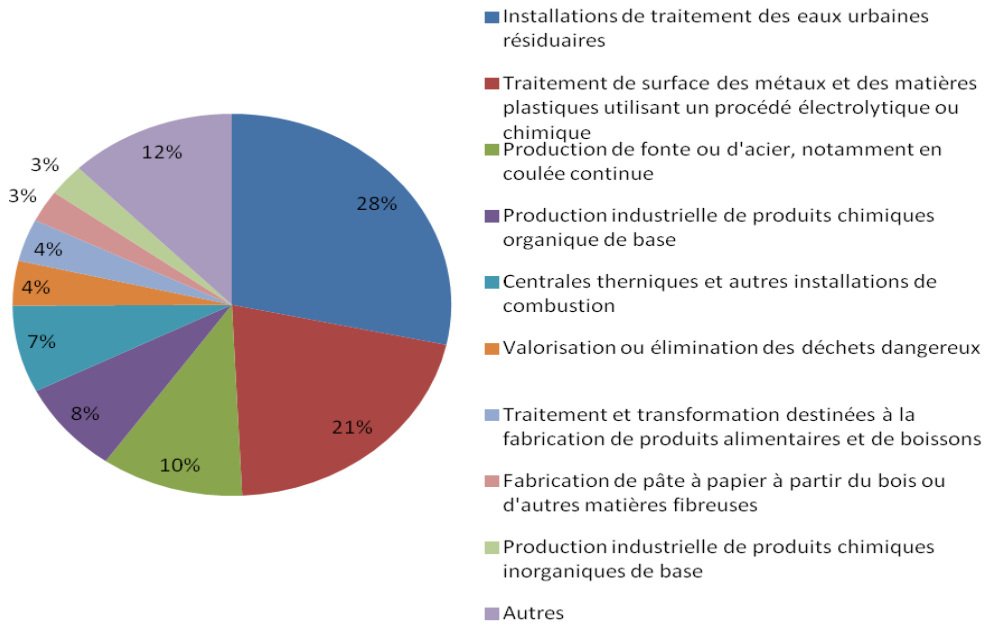


Figure 11. Activités rejetant du nickel vers les eaux en 2011, d'après le site internet E-PRTR.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

3.5.3 Rejets dans les eaux du bassin Seine-Normandie

L'Agence de l'eau Seine-Normandie (2004) précise l'origine et l'importance des différents flux de nickel vers les eaux superficielles du bassin Seine-Normandie (le flux total moyen de nickel sur ce bassin est estimé à 75 $t.an^{-1}$). Ces flux sont représentés de façon graphique dans la Figure 12.

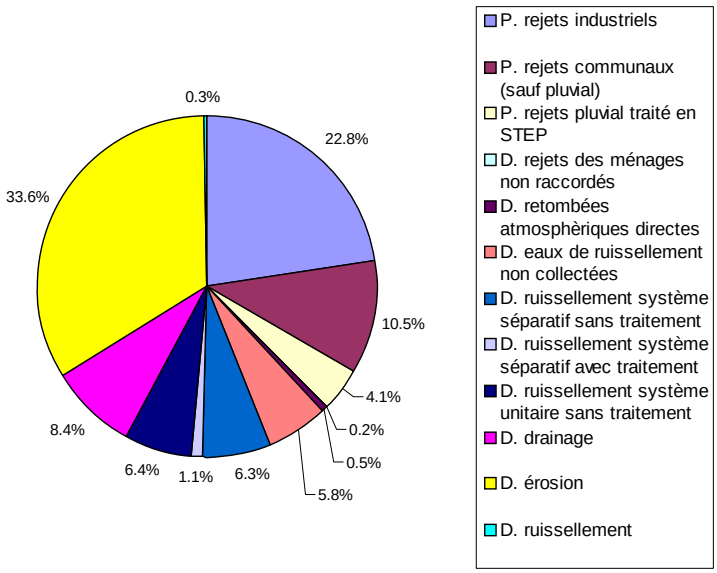


Figure 12. Sources d'émission vers les eaux superficielles du bassin Seine-Normandie ; P : rejets ponctuels, D : rejets diffus, d'après les données de l'AESN, 2004.

Ce graphique souligne l'importance des rejets diffus (l'érosion et le drainage entraînent à eux-seuls plus de 40 % des rejets). De ce fait, même la suppression de tous les rejets ponctuels serait largement insuffisante pour respecter un objectif de « zéro rejets et pertes ».

Parmi les sources à l'origine des rejets diffus de nickel on peut citer :

- Certains procédés de production industriels de métaux utilisent des matières premières contenant des quantités importantes de nickel (en particulier pour l'extraction du fer et du cuivre). Bien qu'aucune information ne soit disponible sur le sujet, cette voie de production accidentelle ne peut-être totalement écartée (en particulier via des pollutions accidentelles historiques).

- Rejets de nickel liés à l'usage d'aciers inoxydables en tant que matériau de construction (toitures à Paris par exemple). A la suite d'expériences de vieillissement d'aciers inoxydables

en laboratoire Wallinder *et al.* (2006), ont démontré que les quantités de nickel relarguées par ce phénomène entraînent la présence de nickel dans l'environnement.

- Rejets diffus agricoles, du fait de la présence naturelle de nickel dans les sols, et aussi de la présence artificielle en provenance d'engrais phosphatés (la majorité du nickel présent dans les roches phosphorées se retrouve dans l'acide phosphorique, cf. Commission Européenne, 2004).

3.6 Emissions vers les sols

3.6.1 Rejets industriels français

Pour les 248 établissements industriels émetteurs de nickel répertoriés sur le site internet IREP, seuls 72 sont répertoriés comme émetteurs de nickel vers les sols et les émissions sont estimées pour l'année 2012 à 23,4 tonnes.

Pour les 205 établissements répertoriés sur le site E-PRTR, seuls 28 émettaient du nickel vers les sols en 2011 et ses émissions étaient estimées à 3,20 tonnes.

Selon le site internet E-PRTR, en 2011, les rejets vers les sols concernent les secteurs suivant :

- Fabrication de pâte à papier à partir du bois ou d'autres matières fibreuses : 51,2 % ;
- Fabrication de papier et de carton et d'autres produits dérivés du bois : 20,6 % ;
- Traitement et transformation destinés à la fabrication de produits alimentaires et de boissons : 13,1 % ;
- Elimination des déchets non dangereux : 10,7 % ;
- Fabrication industrielle de produits pharmaceutiques de base : 2,2 % ;
- Traitement et transformation du lait : 1,5 % ;
- Abattoirs : 0,8 %.

Selon le site internet E-PRTR, 32 établissements rejettent du nickel vers les sols, dont 28 en France. Les émissions françaises de nickel vers les sols représentent 91 % des émissions européennes totales.

3.7 Pollutions historiques

En France, le site internet BASOL[59] du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable recense les sites pollués au nickel :

[59] Base de données BASOL sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

- 20 sites son mis en sécurité et/ou doivent faire l'objet d'un diagnostic ;
- 184 sites sont en cours d'évaluation ;
- 128 sites sont en cours de travaux ;
- 447 sites ont été traités avec surveillance et/ou restriction d'usage ;
- 27 sites ont été traités et sont libres de toute restriction.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

4 DEVENIR ET PRESENCE DANS L'ENVIRONNEMENT

4.1 Comportement dans l'environnement

4.1.1 Forme chimique dans l'environnement

Selon INERIS (2006), le nickel à l'état divalent peut former une large gamme de composés et constitue le seul état d'oxydation important du nickel (d'autres états d'oxydation comme le nickel(+4) peuvent être présents dans quelques complexes ou oxydes). Ainsi, le nickel reste très faiblement absorbé par la plupart des organismes vivants, mais est associé en grande partie à la matière particulaire (Kabata-Pendias et Pendias, 1992 ; ATSDR, 1997).

4.1.2 Comportement dans les eaux de surface

Dans les systèmes aquatiques, le nickel existe généralement (selon le pH) sous forme d'ions Ni^{2+}.

Selon INERIS (2006), les anions présents naturellement (OH^-, SO_4^{2-} ou Cl^-) ne forment des complexes avec le nickel que dans une faible proportion : par exemple, le complexe $Ni(OH)_2$ ne devient l'espèce dominante qu'au delà d'un pH égal à 9,5. En présence de soufre en milieu aqueux anaérobie, du sulfate de nickel se forme, ce qui limite la solubilité du nickel (ATSDR, 1997).

Le nickel est présent dans les eaux de surface en tant que sels solubles adsorbés ou associés avec des particules argileuses, de la matière organique ou d'autres substances. Le nickel forme des complexes solubles, forts avec OH^-, SO_4^{2-} et HCO_3^-, cependant ces espèces sont en minorité par rapport à l'ion Ni^{2+} (Danish EPA, 2008a).

Le nickel est un des métaux les plus mobiles quand il est rejeté dans les eaux, particulièrement dans les eaux polluées, dans lesquelles des éléments organiques vont garder le nickel soluble (Danish EPA, 2008a).

4.1.3 Comportement dans le milieu marin côtier et estuarien

Selon le site internet de l'IFREMER, le transport du nickel vers le milieu marin s'effectue via les fleuves sous formes particulaire et via l'atmosphère, conséquence de l'utilisation des combustibles fossiles et la production de métaux non ferreux. Dans le milieu marin, l'affinité du nickel pour les oxyhydroxydes de fer ou de manganèse constitue la caractéristique essentielle de son comportement géochimique.

Dans les eaux interstitielles des sédiments anoxiques[60] on observe des concentrations très faibles de nickel dissous, qui peuvent être attribuées à sa précipitation sous forme de sulfure : dans ce cas le nickel est piégé dans le sédiment. Par contre, dans les sédiments oxiques[61] les eaux interstitielles sont fortement enrichies en nickel dissous.

4.1.4 Comportement dans les sols

Bien plus que la teneur totale, la spéciation et l'état physico-chimique du nickel sont des paramètres essentiels à considérer afin d'évaluer son comportement dans l'environnement et en particulier sa biodisponibilité. Ainsi, le nickel incorporé dans certains réseaux minéraux peut se révéler inerte. Dans les sols, les principales formes du nickel, et en particulier $NiOH^+$, sont adsorbées à la surface d'oxydes amorphes de fer, d'aluminium ou de manganèse (Kabata-Pendias et Pendias, 1992 ; McGrath, 1995 ; ATSDR, 1997) et dans une moindre mesure à la surface de minéraux argileux.

La mobilité du nickel augmente aux pH faibles, alors que l'adsorption sur certains composés adsorbants du sol peut devenir irréversible en milieu alcalin. Si le pH est le paramètre influençant le plus la mobilisation du nickel dans les sols, il faut également tenir compte de la concentration en sulfates (qui réduisent l'adsorption du nickel par complexation) et de la surface spécifique des oxydes de fer présents dans le sol (Hertel *et al.*, 1991 ; McGrath, 1995 ; ATSDR, 1997). La présence de cations tels que Ca^{2+} ou Mg^{2+} entraîne également une diminution de l'adsorption du nickel sur les composés du sol, résultat de phénomènes de compétition.

Dans les sols alcalins, les composants majeurs sont Ni^{2+} et $Ni(OH)^-$, dans les sols acides, les espèces majoritaires sont Ni^{2+}, $NiSO_4$ et $NiHPO_4$ (Danish EPA, 2008d).

Le nickel rejeté dans les sols va filtrer vers les eaux souterraines ou être lessivé dans les eaux de surface (Danish EPA, 2008d).

4.1.5 Comportement dans l'air

Selon Ontario (2001), le nickel présent dans l'air (dissous ou particules en suspension) peut avoir été rejeté par des activités humaines ou suite à des phénomènes naturels (éruptions volcaniques, incendies de forêts et combustion de météorites dans la haute atmosphère). Le Haut Comité de Santé Publique (2000) estime la participation anthropique aux émissions atmosphériques de nickel à 85 % des émissions totales : les principales sources d'émission

[60] Sédiments au sein desquels l'oxygène est absent et donc indisponible aux réactions physico-bio-chimiques.

[61] Sédiments au sein desquels l'oxygène est présent et donc disponible aux réactions physico-bio-chimiques.

humaines sont la métallurgie du nickel, la combustion de fiouls et charbons, l'incinération des déchets et la sidérurgie. On le trouve dans l'air sous différentes formes chimiques (sulfures, oxydes...).

Des données de terrain confirment que le nickel peut être transporté via le compartiment atmosphérique sur de moyennes à longues distances. Néanmoins, d'après le site internet d'Environnement Canada, dans l'atmosphère, le nickel est généralement présent en faibles concentrations dans les particules en suspension ; son temps de séjour est de 5 à 8 jours. D'autre part, d'après la même source, le seul composé gazeux notable du nickel, le tétracarbonylnickel, se décompose dans l'air avec une demi-vie de moins d'une minute.

4.2 Présence dans l'environnement

Les valeurs ci-dessous sont extraites du site internet du FOREGS[62]. Les pays ayant participé à la campagne de mesure sont : l'Albanie, l'Autriche, la Belgique, la Croatie, la République tchèque, le Danemark, l'Estonie, la Finlande, la France, l'Allemagne, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Italie, la Lettonie, la Lituanie, les Pays-Bas, la Norvège, la Pologne, le Portugal, la Slovaquie, la Slovénie, l'Espagne, la Suède, la Suisse et le Royaume-Uni.

Tableau 11. Teneurs en nickel dans les différents milieux, d'après le FOREGS.

Milieu	Unité	Nombre d'échantillons	Minimum	Médiane[63]	Moyenne	Maximum
Sol couche profonde	mg/kg	843	< 2,0	18	37,3	2690
Sol couche de surface	mg/kg	790	< 2,0	21,8	39,1	2400
Humus	mg/kg	367	< 0,3	3,8	5,93	74,9
Sédiments de cours d'eau	mg/kg	852	1	21	35,2	1406
Sédiments de plaines alluviales	mg/kg	747	2	22	34,5	1080
Eau	µg/L	807	0,03	1,91	2,43	24,6

4.2.1 Dans le milieu aquatique

Dans les cours d'eau, les valeurs de nickel relevées sont comprises entre 0,03 et 24,6 µg/L, avec une médiane de 1,91 µg/L.

[62] http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Ni.pdf (consulté en janvier 2014).

[63] Médiane : valeur correspondant à 50 % des résultats.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

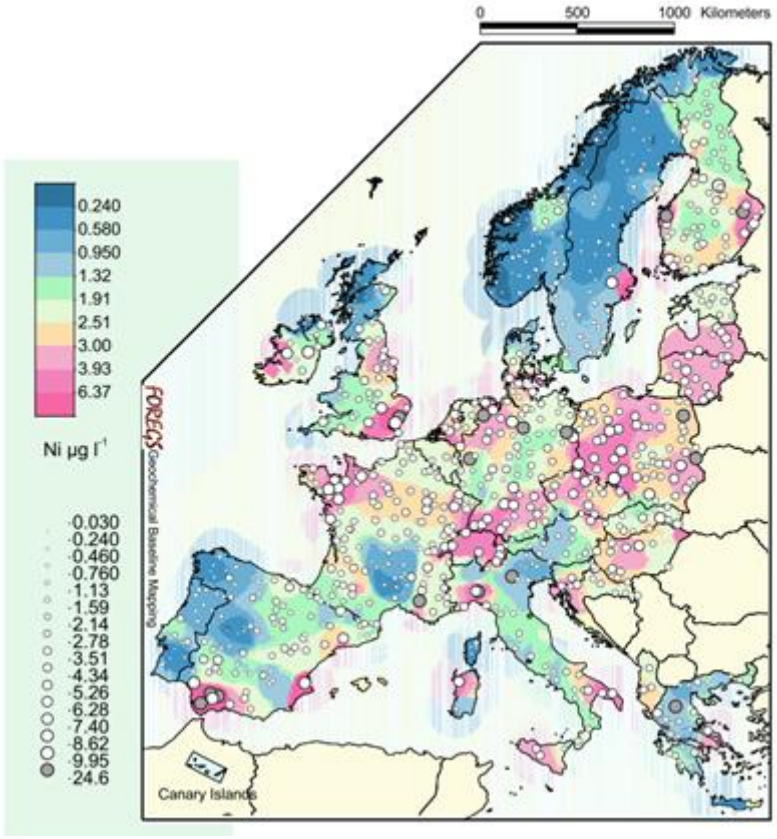


Figure 13. Distribution géographique du nickel dans les milieux aquatiques, d'après le site internet du FOREGS.

4.2.2 Dans le milieu terrestre

Selon le site internet du CNB (Comité National sur l'épandage des Boues d'épuration), les éléments-traces métalliques sont naturellement présents dans les roches à l'origine des différents types de sol (roches-mères). Les principales roches associées au nickel sont les roches magmatiques ultrabasiques.

Selon le site internet du CNB :

« Les teneurs des sols en éléments métalliques dépendent donc directement de la nature des roches-mères sur lesquelles ils se sont formés. La concentration d'un élément, lorsqu'il n'y a pas eu d'apport extérieur (dû à l'activité humaine), constitue le fonds géochimique naturel de cet élément. Il varie d'une zone géographique à une autre en fonction de la roche-mère.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Pour un même lieu, il peut varier selon la nature des travaux agricoles : par exemple, un labour profond qui fait remonter en surface des éléments issus de la roche-mère. »

Ce même site présente des concentrations en nickel dans les sols issues de suivis mis en place dans le cadre des plans d'épandage des boues d'épuration. Pour le nickel ces valeurs atteignent :

- au minimum 0,1 $g.t^{-1}$ de sol sec ;

- à la médiane 20,4 $g.t^{-1}$;

- au 9ième décile[64] 41,8 $g.t^{-1}$.

En considérant une couche arable de 25 à 30 cm de sol (3 500 tonnes de terre par hectare), il est possible d'estimer les stocks en nickel pour un hectare de terre arable :

- au minimum 350 $g.ha^{-1}$;

- à la médiane 71 400 $g.ha^{-1}$;

- au 9ième décile 146 300 $g.ha^{-1}$.

La Nouvelle-Calédonie, la Réunion sont un cas particulier, avec des sols souvent particulièrement riches en nickel

Sédiments de cours d'eau

La valeur médiane en nickel total dans les sédiments est de 23 mg/kg, avec une gamme de 1 à 1 460 mg/kg.

[64] 9e décile : valeur maximale observée pour 90 % des résultats.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

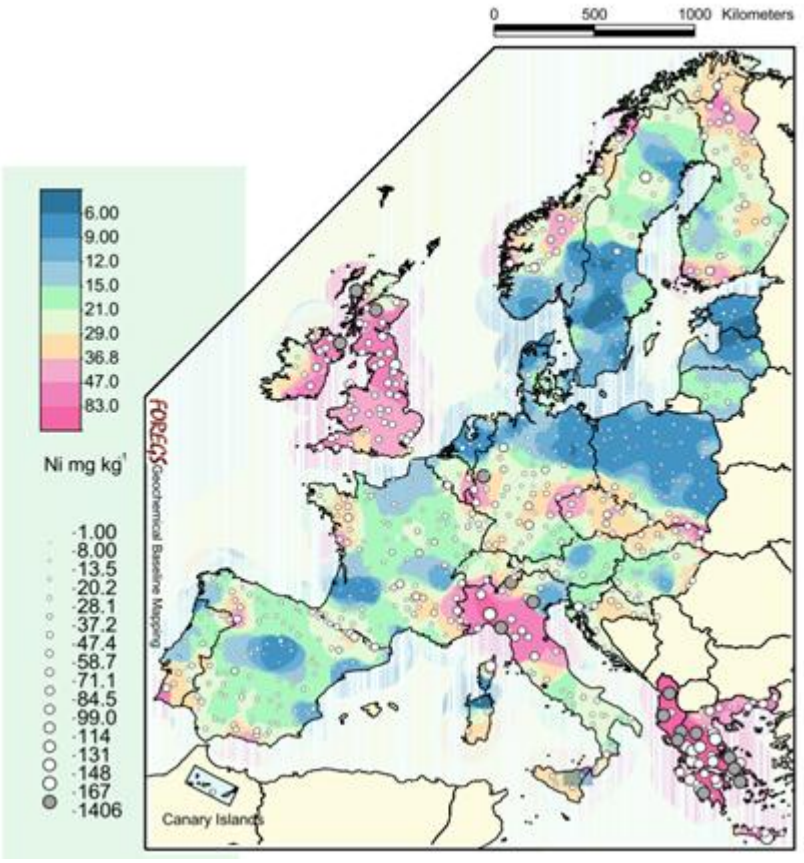


Figure 14. Distribution géographique du nickel dans les sédiments des cours d'eau, d'après le site internet du FOREGS.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Sédiments de plaines alluviales

La valeur médiane en nickel total dans les sédiments varie en 2 et 1 080 mg/kg, avec une valeur médiane de 22 mg/kg.

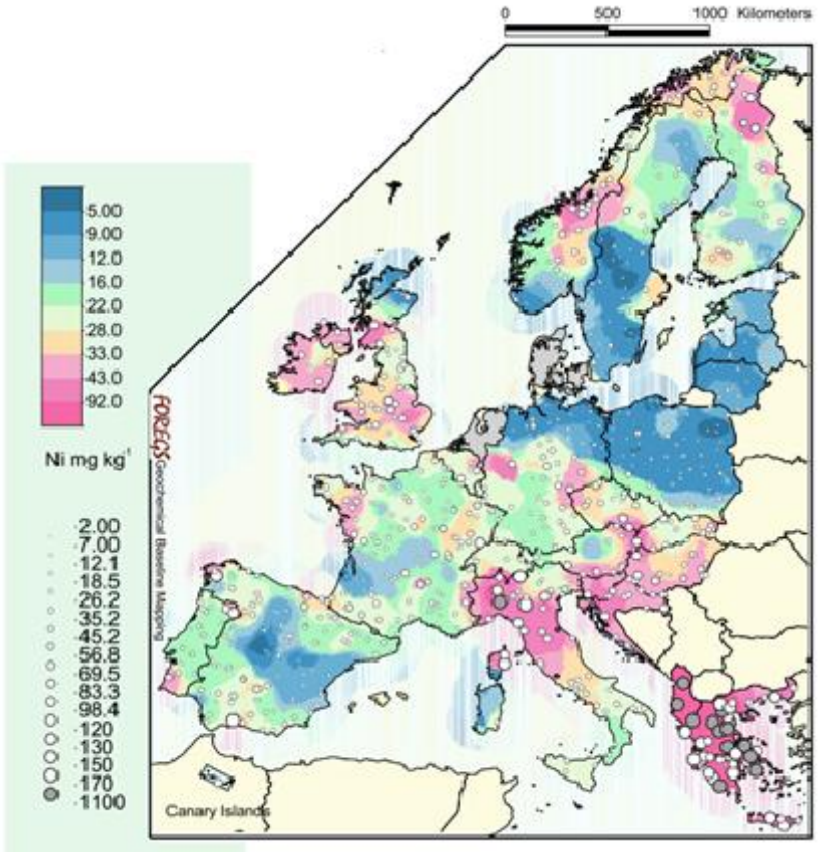


Figure 15. Distribution géographique du nickel dans les sédiments des plaines alluviales, d'après le site internet du FOREGS.

Sols

La valeur médiane en nickel est de 21,8 mg/kg dans les sous-sols, avec une gamme allant de < 2,0 mg/kg à 2 400 mg/kg. Dans la couche supérieure, la valeur médiane est de 18,0 mg/kg, avec des valeurs allant jusqu'à 2 690 mg/kg.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

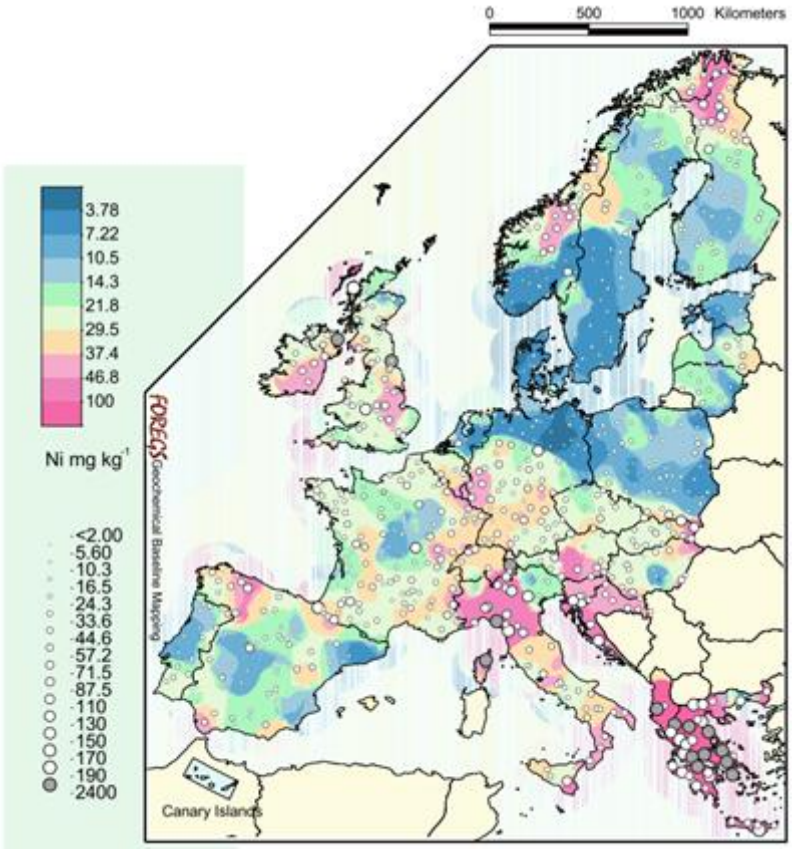


Figure 16. Distribution géographique du nickel dans les couches profondes des sols, d'après le site internet du FOREGS.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

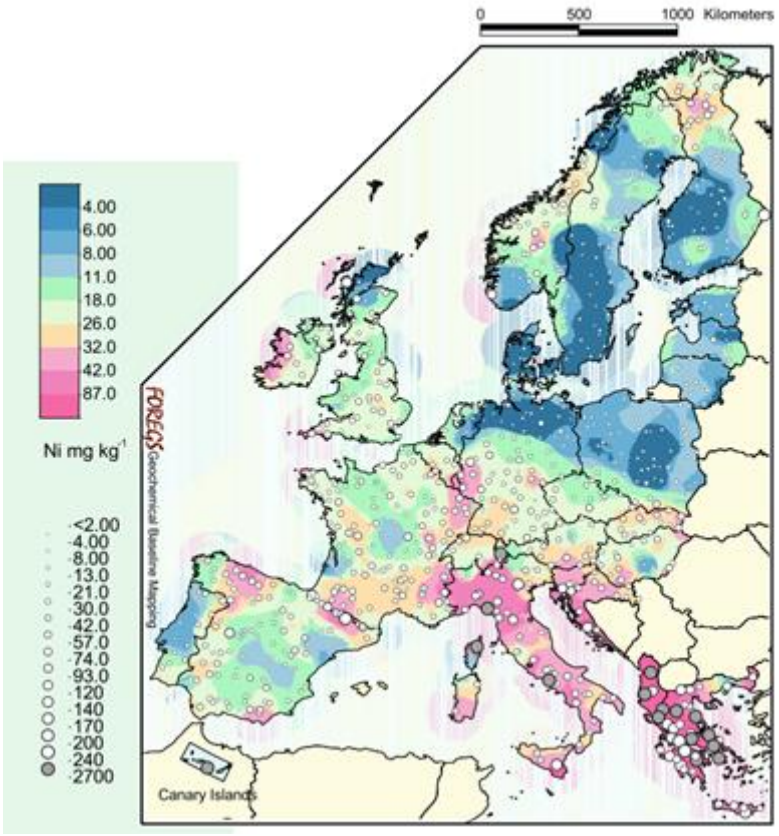


Figure 17. Distribution géographique du nickel dans les couches superficielles des sols, d'après le site internet du FOREGS.

Humus

La valeur médiane en nickel total est de 3,80 mg/kg, avec des valeurs comprises entre < 0,3 mg/kg et 74,9 mg/kg.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

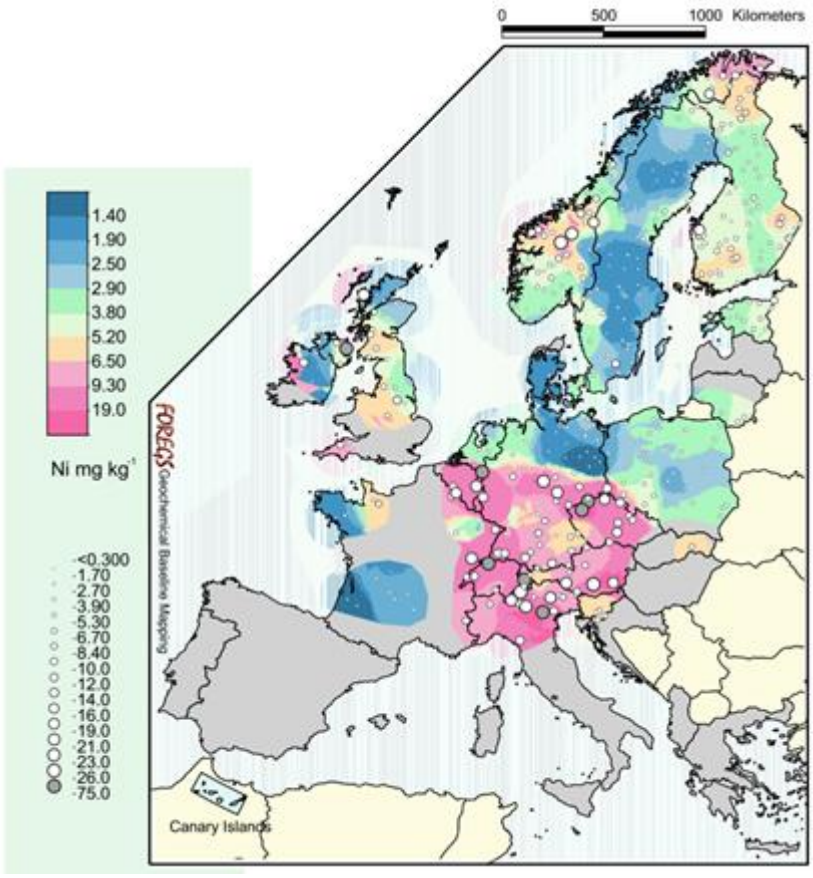


Figure 18. Distribution géographique du nickel dans l'humus, d'après le site internet du FOREGS.

Boues de stations d'épurations

Selon le site internet du CNB, les boues d'épuration concentrent les contaminants présents dans les eaux usées. Le taux de capture des contaminants (y compris le nickel) par les boues se situe entre 70 et 90 % des quantités entrantes dans la station d'épuration. Les teneurs des boues en contaminants varient selon la qualité des eaux entrantes et les traitements de stabilisation et/ou de déshydratation appliqués aux boues. Le chaulage, par exemple, diminue les valeurs observées par effet de dilution.

Le site internet du CNB (Comité National sur l'épandage des Boues d'épuration) reprend des données collectées à travers des enquêtes ou des campagnes de mesure menées par l'ADEME,

en 1995, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse et Recyval en 1998 et SYPREA en 2000. En ce qui concerne le nickel, la valeur moyenne observée correspond à 40 $g.t^{-1}$ (matière sèche). Ce chiffre est à mettre en parallèle avec la valeur limite réglementaire de 200 $g.t^{-1}$ (matière sèche).

Selon le site internet du CNB, une analyse statistique plus approfondie permet d'identifier des situations à faible niveau de contamination et des situations comparativement moins bonnes. Néanmoins, les données les plus récentes (SYPREA, 2000 cité par le site internet du CNB) confirment la baisse continue des teneurs en éléments métalliques des boues d'épuration.

4.2.3 Dans l'atmosphère

Selon le site internet « Public Health » de la Commission européenne, des mesures sur les espèces de nickel présentes dans l'air ambiant (mesures moyennes journalières) ont été effectuées en deux sites à Dortmund (Allemagne) : cf. Tableau 12.

Tableau 12. Mesures des espèces de nickel présentes dans l'air ambiant, d'après le site internet Public Health.

Site	Formes soluble (%)	Formes sulfides (%)	Poussières métalliques (%)	Formes oxydes (%)	Somme ($ng.m^{-3}$)
Urbain	22,4	8,3	18,6	50,7	7,4
Industriel à proximité d'une mine d'acier	42,1	4,5	7,4	46,0	11,9

Marlière *et al.* (2002), fournissent quelques indications quantitatives quant à la présence de nickel dans l'air de différents types de site (typologie définit par l'occupation des sols) :

- sites industriels et urbains : de 70 à 95 $ng.m^{-3}$;
- sites industriels urbains et sub-urbains : de 4 à 140 $ng.m^{-3}$ (moyenne de 33) ;
- sites urbains : de 3 à 100 $ng.m^{-3}$;
- sites ruraux : 3 et 9 $ng.m^{-3}$ (deux concentrations indiquées).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

4.2.3.1 Dépôts atmosphériques

Motelay-Massei *et al.* (2005) ont mesuré les dépôts atmosphériques humides et solides de nickel (Fig. 3.2) sur cinq stations situées le long de la Seine.

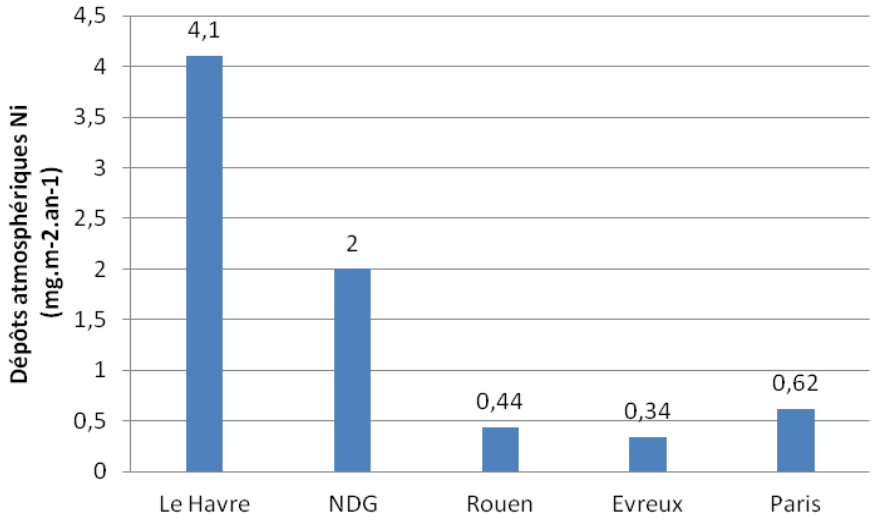


Figure 19. Dépôts atmosphériques de nickel pour cinq stations françaises ; NDG : Notre-Dame-de-Gravenchon, d'après Motelay-Massei et al., 2005.

En généralisant la valeur la plus basse de dépôt de nickel atmosphérique (0,34 $mg.m^{-2}.an^{-1}$ à Evreux) à la surface totale de la France (550 000 km^2) on peut estimer un minima de dépôts annuel de nickel par voie atmosphérique : 187 tonnes. Pour cette même année, les rejets vers les eaux étaient estimés à 61 tonnes.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

5 POSSIBILITES DE REDUCTION DES REJETS

5.1 Produits de substitution

Selon RPA (2000) et (European Commission, 2001a), il y a de nombreuses applications où aucune alternative à l'utilisation de nickel n'est disponible.

De plus, selon RPA (2000), le nickel est utilisé en remplacement de certaines applications de substances potentiellement dangereuses. Par exemple, les batteries Ni-MH[65] ont été développées comme alternative aux batteries rechargeables Ni-Cd[66].

De plus, selon les producteurs de nickel, INSG (International Nickel Study Group) et Eramet (2005), le nickel possèderait des avantages au détriment de ses éventuelles alternatives :

- prolongation de la durée de vie des équipements de production et des articles dans lesquels il est présent (par le biais d'une augmentation de la résistance à la corrosion et à la chaleur des matériaux).
- facilité de nettoyage (en termes d'élimination de la prolifération bactérienne). (notamment dans le milieu médical et dans l'industrie agro-alimentaire).
- les propriétés magnétiques particulières conférées aux alliages contenant du nickel facilitent leur tri lors de la récupération d'anciens équipements.

Dans le cadre des travaux sur le nickel en cours dans le cadre de REACH, le Nickel Institute a réalisé des analyses des alternatives à certains composés du nickel (oxyde et sulfate de nickel) dans les secteurs industriels suivant : coatings décoratifs, industrie aérospatiale, industrie électronique. Une analyse socio-économique des conséquences d'une éventuelle interdiction du sulfate de nickel pour les coatings décoratifs a été réalisée.

L'oxyde de nickel est utilisé comme catalyseur dans le raffinage des hydrocarbures et le piégeage du soufre. Sa substitution impliquerait une augmentation de coûts, ainsi qu'une augmentation de l'utilisation d'énergie. De plus, l'élimination du soufre sera moins efficace, ce qui augmentera la quantité de soufre dans les carburants et donc les émissions vers l'atmosphère. Il n'existe pas pour le moment d'alternatives permettant de ne plus utiliser l'oxyde de nickel dans les pigments ou le verre.

---

[65] Ces batteries ont été développées pour des usages particuliers tels que l'usage dans des véhicules électriques et hybrides. Cet usage est encouragé par la Commission européenne (Anyadike, 1999).

[66] Cette technologie Ni-Cd sera interdite à partir du 1er juillet 2006 suivant la directive européenne 2002/95/CE du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

5.2 Réduction des émissions industrielles

Selon (European Commission, 2001a), l'industrie de la métallurgie du nickel peut respecter les performances environnementales suivantes :

- 10 à 300 g de poussière de nickel formés par tonnes de nickel produite ;
- 0,1 à 10 mg.L^{-1} de liquide de lavage des gaz (dont 10 à 60% de matière en suspension).

Après traitement de ces rejets, les émissions de nickel peuvent être abaissées à des valeurs non quantifiables pour les poussières et à moins de 0,1 mg.L^{-1} pour les rejets liquides.

Selon (European Commission, 2005), au sujet du traitement de surface des métaux et des plastiques, avant traitement, les émissions aqueuses de nickel sont estimées à moins de 2 mg.L^{-1}. Celles-ci peuvent être ramenées à des valeurs négligeables en appliquant les meilleures techniques de traitement des effluents disponibles.

5.2.1 Techniques de traitement pour les effluents aqueux

Le Tableau 13 présente un récapitulatif des différentes techniques de traitement des effluents contenant du nickel et/ou des ses composés. Ces techniques (décrites ci-après) sont dédiées au traitement des effluents liquides, spécialement dans le domaine de la chimie, mais aussi pour le traitement d'effluents de traitement de surface, ou encore l'effluents provenant du lavage de gaz contenant du nickel (industrie métallurgique, incinération de déchets,…).

*Tableau 13. Récapitulatif des techniques et de leur efficacité vis à vis de la dénickelisation des effluents aqueux ; * : élimination de 0 à 20% ; ** : de 20 à 50% ; *** : de 50 à 80% ; **** : de 80 à 100%, d'après Degrémont, 2005.*

Technique	Efficacité
Clarification complète	*
Clarification + affinage CAG	**
Membranes OI ou NF	****

5.2.1.1 Clarification

La clarification regroupe les processus suivants : coagulation, floculation et décantation.

Le coagulant ajouté à l'eau a pour rôle de transformer les métaux lourds dissous dans l'eau en composés insolubles qui précipiteront. On utilisera alors un procédé de décantation ou de filtration pour finir le traitement.

Les taux de nickel peuvent être réduits de 0 à 20% (Degrémont, 2005). On doit veiller à séparer le nickel des composés cyanurés avec lesquels il forme des complexes stables qui ne pourront pas être traités (European Commission, 2005a).

5.2.1.2 Filtres à charbon actif

Le phénomène physique à l'œuvre au sein des filtres à charbon actif[67] est l'adsorption, c'est à dire l'adhésion des matières à filtrer sur la surface d'un solide, sans réaction chimique. L'utilisation de la filtration par charbon actif en poudre permet une adsorption moyenne du nickel (Degrémont, 2005).

Ces procédés sont utilisés notamment dans le traitement des effluents des activités de traitement de surface (nickelage). Dans cette industrie, les émissions de nickel concernent les milieux aquatiques et les sols, mais très peu le compartiment atmosphérique (European Commission, 2005a)

5.2.2 Techniques spécifiques de réductions des émissions industrielles aqueuses dans le domaine de la chimie

Lorsqu'il est utilisé comme catalyseur, le nickel est récupéré et recyclé en grande partie. Une optimisation des taux de récupération est de recyclage pourrait parfois être envisageable.

Des procédés spécifiques sont utilisés dans le domaine de la chimie pour les effluents liquides fortement chargés en métaux et notamment en nickel (European Commission, 2003[68]) :

- cristallisation pour des effluents provenant de la fabrication de dithiocarbamates métalliques (pour des concentrations dans l'effluent comprises entre 50 et 250 ppm) ;

[67] On dénomme également « filtres CAG » les filtres à charbon actif granulaire.

[68] Best Available Techniques Reference Documents: Common Waste Water and Waste Gas Treatment/ Management Systems in the Chemical Sector http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/cww.html (consulté en janvier 2014).

- cristallisation pour des effluents provenant de la fabrication de certains élastomères métalliques (pour des concentrations dans l'effluent comprises entre 50 et 400 ppm).

Dans ces deux cas, les concentrations en nickel après traitement pouvant être atteintes sont de 1 mg/L.

- précipitation suivie d'un procédé de séparation. La performance du procédé est très variable.

5.2.3 Réductions des émissions industrielles aqueuses dans le domaine du traitement de surface

Le secteur ayant fait l'objet d'une action prioritaire du Service des Installations Classées, les émissions ont été réduites dans ce secteur ces dernières années.

Les niveaux d'émissions atmosphériques suivants peuvent être atteints par certaines installations pour le nickel (d'après European Commission, 2005a) : 0,01 à 0,1 mg/Nm^3

Un moyen important pour réduire les émissions est d'augmenter l'efficacité de l'emploi du nickel en minimisant les pertes de nickel lors des opérations de rinçage, en recyclant les eaux de rinçage :

- pour un fonctionnement en circuit « fermé », une efficacité de 95 % peut parfois être atteinte (on utilise alors des traitements de type membranaire) ;
- pour un fonctionnement sans circuit fermé, l'efficacité peut parfois être portée à 80-85 %.

5.2.4 Réductions des émissions industrielles lors des opérations minières

A tous les stades de l'extraction du minerai de nickel, des précautions doivent être prises pour protéger l'environnement[69] :

- contrôle de la circulation des eaux de ruissellement pour éviter les entraînements de matériaux fins : réseau de drainage, bassins de décantation, barrages filtrants ;
- aucun rejet volontaire de matériaux dans la nature, ni au moment du traçage des pistes, ni au moment de l'exploitation (stockage des stériles en décharges contrôlées et stabilisées) ;
- revégétalisation des surfaces dénudées en fin d'exploitation, notamment le sommet des décharges de latérites ;

[69] Selon Eramet (2005), le principal polluant rejeté pour l'industrie minière du nickel est le SO_2 (originaires des minerais sulfurés).

- contrôle des rejets de poussières, selon le site internet de la société Eramet, la mise en place de différents dispositifs de captage (électrofiltres, filtres à manche) permet de diminuer des trois quarts les émissions de poussières.

5.2.5 Réductions des émissions industrielles lors du traitement des minerais

Dans le domaine des minerais latéritiques, des essais menés en usine pilote sur le site futur de l'usine de Goro Nickel en Nouvelle-Calédonie permettent d'estimer les rejets de nickel potentiellement induits par cette future installation et d'apprécier sa performance environnementale (Goro Nickel, 2004b). Ces rejets concernent uniquement les effluents liquides :

- les valeurs attendues moyennes annoncées correspondent à 0,5 $mg.L^{-1}$ de nickel ;
- les valeurs attendues maximales annoncées correspondent à 2 $mg.L^{-1}$ de nickel ;
- le flux moyen au débit nominal de 1 500$m^3.h^{-1}$ annoncé correspond à 0,75 $kg.h^{-1}$.

Pour atteindre ces valeurs, il est envisagé de mettre en place un process de traitement des effluents à base de précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes insolubles par neutralisation avec du calcaire et de la chaux à ph > 7.

5.3 Autres possibilités envisageables

5.3.1 Accroissement du recyclage

Selon Eramet (2005), des perspectives s'ouvrent actuellement avec la valorisation de certains sous-produits tels que les poussières des aciéries électriques élaborant des aciers inoxydables. Néanmoins, à ce jour l'impact de ces mesures est difficilement chiffrable.

En ce qui concerne le recyclage des batteries, l'ADEME[70] indique que, pour l'année 2012, 1 973 tonnes d'accumulateurs Ni-Cd et 2 904 tonnes des NiMH ont été mises en vente et 900 tonnes d'accumulateurs NiCd, et 250 tonnes de NiMH ont été traités.

Le taux de collecte pour les piles et accumulateurs portables a été, en 2012, de 35,4 %.

[70] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=0114256509FEE2CF7274229C10450B92_tomcatlocal1386078272092.pdf (consulté en janvier 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

5.3.2 Exemple du traitement des sols

Une société chargée de traitement des sols indique qu'à ce jour, aucune problématique de nickel seul ne leur a été soumise, néanmoins, la problématique nickel se retrouve fréquemment associée à celle d'autres métaux (en particulier le chrome et le cuivre).

La principale difficulté technique réside dans la spéciation du nickel (certaines formes complexées du nickel sont solubles). La rémédiation consiste donc en la stabilisation de ces sols (fabrication de complexes de nickel insolubles par ajout d'un agent chimique et modification du pH des sols). Ce premier traitement chimique peut s'accompagner d'un traitement physique secondaire : emprisonnement des complexes dans une matrice cristalline étanche.

Le coût de ces techniques est évalué entre 50 et 500 €.t^{-1} de sol à traité en fonction de la complexité de la pollution (pollution simple ou multi-pollution).

L'efficacité de ce procédé permet d'atteindre des seuils de lixiviation des déchets inférieurs à 50 mg.kg^{-1} de matière sèche (valeur limite pour l'acceptation en centre de stockage des déchets ultime de classe 1).

Ce type de techniques a été mis en œuvre :

- en 1994, pour le traitement *in-situ* de terres polluées par des métaux lourds (chrome, nickel et cuivre) : 3 000 m^3 de sols situés à Clamecy (Nièvre) où étaient initialement situés des bassins de décantation d'effluents industriels ;
- en 1996, pour la stabilisation de boues de dragage polluées par des métaux lourds et des composés organiques (chrome, nickel, zinc et cuivre) : sédiments à teneurs métalliques trop importantes pour que l'épandage soit autorisé.

5.3.3 Exemple pour le secteur du traitement des déchets dangereux

Le site internet de la DRIRE d'Ile-de-France rapporte un exemple de traitement des effluents liquides industriels contenant du nickel en centre de traitement et de valorisation de déchets dangereux. Cette installation de valorisation de nickel par voie électrolytique permet d'extraire du nickel pur de déchets liquides provenant de l'industrie électronique (bains de sulfamate de nickel sans matière organique ni toxique contenant en moyenne 35 g.L^{-1} de nickel). Mis en servie en 2003 suite à un investissement de 220 k€, ce centre obtient, pour 1 tonne de déchet traité, 34 kg de nickel pur qui peut être recyclé. La quantité finale de déchets destinés à être stockés en centre d'enfouissement technique de classe 1 n'est plus que de 2,5 kg par tonne de déchet brut traité, alors qu'elle était de 140 kg en l'absence du traitement de valorisation.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

6 ASPECTS ECONOMIQUES

6.1 Place de la substance dans l'économie française

6.1.1 Consommation française

Selon le site internet de l'ENIA, en 2002, la consommation française de nickel équivalait à 90.10^3 tonnes (soit 13 % de la consommation européenne). Sur ces 90.10^3 tonnes, 40 % sont originaire de la filière de recyclage.

6.1.2 Evolution de la production française

La Figure 20 (repris du site internet de la société Eramet) présente l'évolution de l'offre de nickel dans le monde occidental. Cette figure permet de visualiser la relative stabilité dans le temps de la production de nickel en Nouvelle-Calédonie.

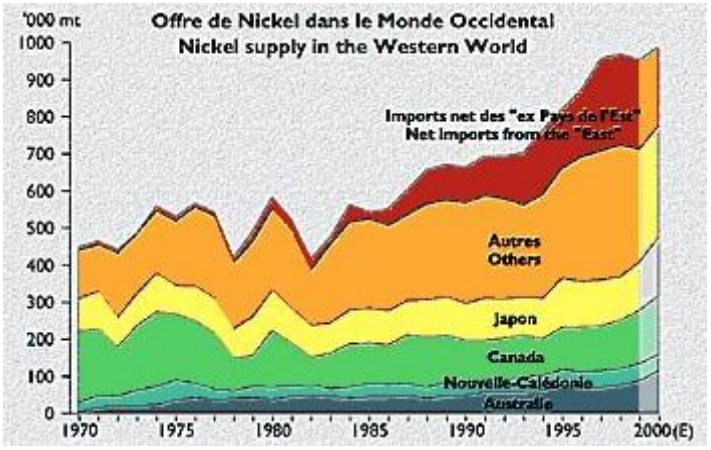


Figure 20. Offre de nickel dans le monde occidental, d'après le site internet d'Eramet.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

6.1.3 Place dans l'économie française

Selon le site internet de l'ENIA, la totalité de la valeur ajoutée[71] créée par les industries du nickel primaire, intermédiaire et de produits manufacturés est estimée à 6 G€.an^{-1} selon la répartition indiquée au Tableau 14. Ce secteur industriel emploie 105 000 salariés français.

Tableau 14. Répartition de la valeur ajoutée du nickel par secteur industriel, selon le site internet de l'ENIA.

	Valeur (M€)	Nombre de salariés
Industrie primaire du nickel (extraction, raffinage et recyclage)	350	2 500
Usage primaire (production d'alliages)	1 000	15 000
Usage intermédiaire	400	10 000
Usage final (tous les produits contenant du nickel)	4 500	77 000[72]
Total	6 250	105 000

6.1.4 Place dans l'économie européenne

Selon le site internet Nickel Institute[73], la totalité de la valeur ajoutée créée par les industries du nickel primaire, intermédiaire et de produits manufacturés est estimée à 40 G€ en 2004 selon la répartition indiquée Tableau 15. Ce secteur industriel emploie 465 000 salariés européens.

[71] Augmentation du prix d'un article à chaque étape de sa fabrication à l'exception du coût initial du nickel (site internet de l'ENIA).

[72] La totalité de ces emplois n'est probablement pas attribuable au seul nickel.

[73] http://www.nickelinstitute.org/~/media/Files/SocioEconomicWeinbergReports/SocioEconomicImpactNickel-29Jan04-FinalReport-logo_.ashx (consulté en janvier 2014).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Tableau 15. Répartition de la valeur ajoutée du nickel par secteur industriel en 2004, selon le site internet de Nickel Institute.

	Valeur (M€)	Nombre de salariés
Industrie primaire du nickel	2 600	13 000
Usage primaire et intermédiaire	13 000	132 000
Usage final	25 000	320 000
Total	40 600	465 000

6.1.5 Prix du marché du nickel

Selon Eranet (2005), le cours du nickel au LME[74] connaît depuis une trentaine d'années des fluctuations parfois rapides et de grande amplitude (du fait des phénomènes de spéculation et d'amplification propres aux marchés des matières premières) : cf. Figure 21. En 2004, le prix moyen du marché était de 13,9 $.kg^{-1} ou 11,4 €.kg^{-1}.

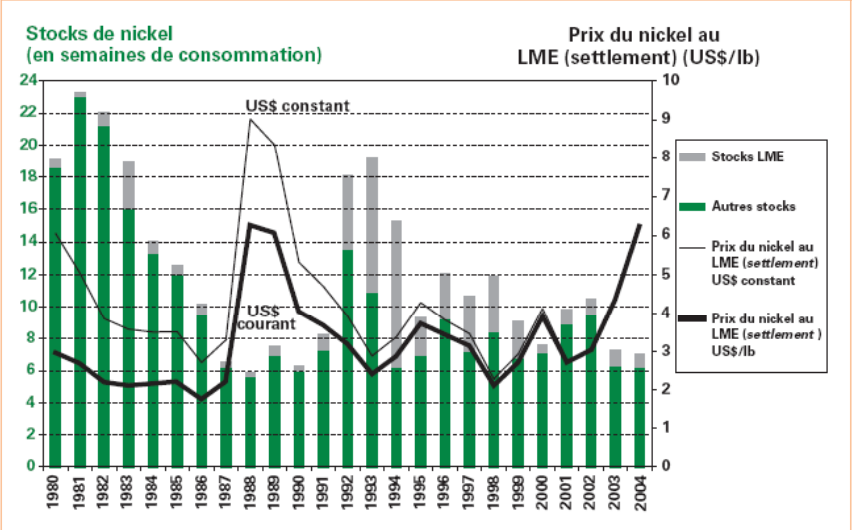


Figure 21. Prix du nickel au London Metal Exchange, d'après Eramet, 2005.

[74] LME : London Metal Exchange ou Bourses des Métaux de Londres.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Selon le site internet CNUCED :

« A court terme, la volatilité des prix du nickel est très importante (environ 16,5 % entre janvier 1998 et janvier 2006). Un certain nombre de facteurs sous-tendent cette instabilité. Au niveau de l'offre : les incertitudes liées aux approvisionnements et en particulier ceux relatifs à la situation de Cuba, de la Fédération de Russie ou encore des Philippines, ainsi que le nombre limité de producteurs ont un impact sur le prix du nickel. Dans ce cadre également, l'impact des arrêts momentanés de production de certains grands groupes pour cause de négociations d'accords collectifs tend à renforcer cette volatilité. Du coté de la demande, la situation d'autres secteurs tels que celui de la sidérurgie influence fortement le développement des cours du nickel. La substitution possible avec les déchets d'inox pour certaines applications peut également jouer un rôle en cas de forte variation des prix de ces deux produits. Finalement, dans un marché étroit (au niveau de l'offre) et relativement segmenté, la variabilité des stocks est une source importante d'instabilité des cours. Cette volatilité inhérente à la situation spécifique du marché du nickel attire ponctuellement les fonds d'investissements, renforçant encore ce phénomène et engendrant un développement parfois erratique des cours. ».

6.1.6 Evolution du marché de la métallurgie

Depuis 1950, la consommation de nickel dans le monde occidental croit de 4 % par an. La consommation mondiale suit cette même croissance depuis 1992. Eramet (2005) indique que la plus forte croissance de l'usage du nickel lié à la production d'aciers inoxydables (5 %.an^{-1}) est compensée par une croissance plus faible des autres secteurs (construction, monnaie, superalliages pour l'aéronautique et alliages à base de nickel destinés aux industries électroniques).

Cette croissance de 4 %.an^{-1} devrait se maintenir dans les années à venir. En effet, les usages de cet élément pour la fabrication des aciers inoxydables devraient s'intensifier (RPA, 2000). De plus, la majorité des moteurs d'avion sont constitués à plus de 30 % de nickel et ce secteur est supposé connaître une croissance annuelle de 5,3 % jusqu'en 2015 (Anyadike, 1999).

6.1.7 Données sur les producteurs français de nickel

Le principal producteur de nickel français (nickel électrolytique) est la société Eramet, en 2013, cette société et ses filiales (Le Nickel SLN ; Erasteel) étaient responsables de :

- la production de la moitié du nickel produit en France et en Nouvelle-Calédonie ;
- la production de la quasi-totalité du nickel sous forme de produits finis en France et en Nouvelle-Calédonie.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Ainsi, en 2012, cette société était à l'origine de la production de 56 447 tonnes de nickel (ferronickel et matte) pour un effectif moyen de 3 000 personnes, un chiffre d'affaires de 898 M€[75] et des investissements de 146 M€.

En Nouvelle-Calédonie, sa filiale SLN exploite d'importants gisements de minerai. Elle transforme le minerai dans son usine métallurgique de Doniambo, à proximité de Nouméa. En France, la raffinerie de Sandouville près du Havre, produit du nickel de haute pureté et des sels de nickel à partir d'un produit intermédiaire (la matte de nickel) élaborée à Doniambo (site internet d'Eramet).

6.1.8 Données sur les projets de production de nickel en France

La société Inco développe actuellement un projet de site industriel de production de nickel en Nouvelle-Calédonie. Ce projet, initié en 2001, porte le nom de "Goro Nickel" et porte sur la construction d'une unité de traitement hydrométallurgique des latérites du Sud néo-calédonien par la lixiviation du minerai à l'acide sulfurique sous pression. L'objectif affiché pour ce site industriel est la production annuelle de 54 000 tonnes de nickel et ce pour une durée d'une vingtaine d'années.

L'impact économique de ce projet correspond à la création de 2 500 emplois directs ou induits, soit 5 % de la population active, et l'équivalent de 10 à 12 % du produit intérieur brut (PIB) annuel du territoire, grâce aux importations et aux exportations (Pitoiset, 2003).

Une demande "d'autorisation d'exploiter des installations classées" a été publiée en 2004 (Goro Nickel, 2004). A ce jour, suite à des modifications dans le projet industriel, une nouvelle demande d'autorisation est en cours de rédaction.

6.1.9 Données sur les producteurs français d'aciers inoxydables

D'après le site internet de l'ENIA, environ 10^6 t d'acier inoxydable et d'autres alliages sont produites en France pour une valeur de 1,6 G€.an^{-1}.

D'après le site internet de la SCF, les producteurs français d'aciers inoxydables sont Aperam (transformation d'acier inoxydable brut en tôles laminées), Industeel (production des tôles hyper lourdes et d'aciers inoxydables), Ugitech (production d'acier inoxydable brut et de produits longs) et Aubert & Duval.

[75] Chiffre uniquement lié à l'activité « nickel ».

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

6.1.10 Batteries Ni-Cd

La société française SAFT est un acteur majeur du marché des accumulateurs Ni-Cd. Seul fabricant français, elle emploie 4 000 personnes dans le monde, dont 2 000 en France réparties sur trois sites. Son chiffre d'affaires global est d'environ 598 millions d'euros ; la moitié environ est réalisée en France. La production d'accumulateurs Ni-Cd pour l'industrie représente 50 % à 60 % de son activité (premier rang en Europe). L'emploi du couple Ni-Cd subsiste pour des piles et batteries rechargeables grand public, mais est désormais marginal pour des batteries de téléphones mobiles et d'ordinateurs portables. En revanche, leur emploi reste important pour les outils portables (Drag, 2000 dans Brignon *et al.*, 2005).

6.2 Impact économique des mesures de réduction ou de substitution

Aucune information n'a été obtenue à ce sujet.

6.3 Coût de l'impact sur la santé humaine des émissions

Une estimation de coût des dommages globaux des émissions atmosphériques de nickel a été effectuée par Rabl (2005) : 3,8 € par kg de nickel valeur comprise (entre 0,3 et 20 €.kg^{-1}). L'auteur précise que 95 % du coût des dommages sont imputables aux impacts sur la santé, soit 3,6 €.kg^{-1} de nickel émis.

7 CONCLUSIONS

La présence du nickel dans l'environnement résulte, pour plus de 84 % des émissions, de son utilisation dans la production d'acier et divers alliages, dans les batteries, les circuits électriques. Le nickel existe également naturellement dans l'environnement.

Malgré un déclin des rejets industriels lié à la mise en place de nouvelles technologies de contrôle des émissions de nickel, et un meilleur recyclage des effluents riches en nickel, les apports de cet élément aux milieux aquatiques vont perdurer longtemps. Ceci est lié à de multiples raisons :

- existence de sources naturelles de nickel ;
- difficulté et/ou impossibilité de supprimer le nickel dans certaines applications particulières (alliages, aciers inoxydables,…) ;
- durée de vie importante des produits contenant du nickel (à l'exception des batteries) ;
- recours à des produits contenant du nickel en remplacement à des produits présentant un fort impact pour l'environnement (remplacement des batteries au plomb, cadmium, … par des batteries Ni-MH) ;
- encouragement à l'usage de produits contenant du nickel dans une optique de préservation de l'environnement (du nickel est utilisé pour les batteries des véhicules électriques et hybrides, ...) ;
- croissance du marché de l'ensemble des produits contenant du nickel ;
- présence d'apports industriels diffus à l'échelle du territoire ;
- apport agricoles diffus via les engrais, difficilement contrôlables.

Malgré les progrès effectués dans le domaine de la dépollution des effluents industriels et le fort intérêt économique que représente la valorisation des déchets contenant du nickel, la disparition des rejets (d'origine anthropique) de cet élément à court terme semble hors de portée.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

8 LISTE DES ABBREVIATIONS

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

CNB : Comité National sur l'épandage des Boues d'épuration

CNUCED : Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement

E-PRTR : Registre Européen des Rejets et des Transferts de Polluants

ESIS : European chemical Substances Information System

FOREGS : Forum of the European Geological Surveys

ICPE : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

INRS : Institut National de la Recherche et de Sécurité

INS : Institut National Spatialisé

IREP : Registre Français des Emissions Polluantes

ISSF : International Stainless Steel Forum

Ni : nickel

RPA : Risk and Policy Agency

RSDE : Action Nationale de Recherche et de Réduction des Réjets de Substances Dangereuses dans les Eaux

SCF : Société Chimique de France

SFTS : Société Forézienne de Traitement de Surface

SLN : Société Le Nickel

9 REFERENCES

9.1 Entreprises, organismes et experts interrogés

INERTEC (D. Verschuere) : traitement des déchets et du domaine des liants hydrauliques afin de développer de nouvelles technologies pour le traitement des déchets industriels dangereux

http://www.inertec.fr/

INERIS : Statut de la Nouvelle – Calédonie vis à vis de la Directive Cadre sur l'Eau

9.2 Sites Internet consultés

Alloy Wire
http://www.alloywire.com/french/monel_alloy_400.html
http://www.alloywire.com/french/inconel_alloy_600.html

BASOL http://basol.developpement-durable.gouv.fr/recherche.php

BMBF : Bundesministerium fur Bildung und Forschung
http://www.cleaner-production.de/bmbf/htmlneu/view.php?obj=27946

CIRAD : Institut français de recherche agronomique au service du développement des pays du Sud et de l'outre-mer français
http://www.cirad.fr/fr/actualite/communique.php?id=372

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/polluants/metaux-lourds/nickel

CNB : Comité National sur l'épandage des Boues d'épuration
http://www.acta.asso.fr/epuration/data/pages/f31.htm

CNUCED : Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement

Information de marché dans le secteur des produits de base
http://r0.unctad.org/infocomm/francais/nickel/plan.htm

DRIRE d'Ile-de-France
http://www.drire.gouv.fr/ile-de-france/environnement/actions/78/78_sarp_limay.html

ECB : European Central Bank
http://www.ecb.europa.eu/euro/coins/common/html/index.fr.html

ECHA : European Chemicals Agency
http://echa.europa.eu/fr/

ENIA : European Nickel Industry Association
http://www.enia.org/index.cfm/ci_id/12992/la_id/1.htm

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Environnement Canada
http://www.ec.gc.ca/substances/ese/fre/pesip/lsip1_nickel_fr.cfm

EPER : European Pollutant Emission Register
http://www.eper.cec.eu.int/eper/emissions_pollutants.asp?i=

Eramet (société)
http://www.eramet.fr/fr/nickel/hp_nickel.php

ESIS : European chemicals Substances Information System
http://esis.jrc.ec.europa.eu/index.php?PGM=cla

E-PRTR : Registre européen des rejets et des transferts de polluants
http://prtr.ec.europa.eu/PollutantReleases.aspx

Euro-inox
http://www.euro-inox.org/

FOREGS : Forum of European Geological Surveys
http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/

Goodfellow
http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=noyssmFfhxYcc4gPLY7zXdMHtYFyoi&n=Hl6EK9Xcyg17YI66cDowFdpJuFTinL&ewd_urlNo=GFCat411&Catite=NI100260&CatSearNum=1
http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=orQCg5DJj2qub4t7rz0ggtpvgorWEk&n=jXAlfgv6DwtfneBxEY64315imQ2IQN&ewd_urlNo=GFCat4B11&Catite=CU100400&CatSearNum=2

ICSCs : International Chemical Safety Cards (Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques)
http://www.cdc.gov/niosh/ipcs/french.html

IFREMER http://www.ifremer.fr/littoralbasnormand/page.php?numpage=49

INERIS http://www.ineris.fr

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité
http://www.inrs.fr/INRS-PUB/inrs01.nsf/inrs01_dossier_view_view/D527e367530BBBFFC1256CE6003D53C9/$FILE /visu.html?OpenElement

INS : Inventaire National Spatialisé
http://90.83.82.201/ins-webapp/

IREP : Registre français des émissions polluantes
http://www.pollutionsindustrielles.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php

INSG : International Nickel Study Group
http://www.insg.org/

Lenntech http://www.lenntech.com/fran%E7ais/data-perio/Ni.htm

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-micropolluants-dans-les.html

Nickel Consortia
http://www.nickelconsortia.eu/nickel-sulphamate.html

Nickel Institute
http://www.nickelinstitute.org/Sustainability/EnvironmentalQuality/Soil.aspx
http://www.nickelinstitute.org/NickelUseInSociety/AboutNickel/WhereWhyNickelIsUsed.aspx

ORDIF : Observatoire Régional d'Ile de France
http://www.ordif.com/indicateurs/boues_STEP.htm

OSPAR http://www.ospar.org/content/content.asp?menu=30200304000000_000000_000000

Piren-Seine 2006
http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/communications/2005/Session_3_3.pdf

Public Health : Commission européenne
http://europe.eu.int/comm/health/ph_risk/committees/sct/docshtml/sct_out93_en.htm

RSDE http://www.ineris.fr/rsde/

Saft http://www.saftbatteries.com/000-corporate/include-content/index.html

SCRD : Le Groupe E. Raoul-Duval
http://www.scrd.net/scrd_new/francais/textile_colorants_naturels_intro.html

SCPS : Société de Conseil et de prospective scientifique
www.scpsgroup.com

SFC : Société Française de Chimie
http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm
http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/mater/acin/cadacin.htm

SFTS : Société Forézienne de Traitement de Surface
http://www.sfts.fr/

Special Metals http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20600%20(Sept%202008).pdf
http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20690.pdf

9.3 Bibliographie

ADEME, 2012. Piles et accumulateurs, Rapport annuel (http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=0114256509FEE2CF7274229C10450B92_tomcatlocal1386078272092.pdf).

AESN (Agence de l'Eau Seine-Normandie), 2004. Bilan des flux, sources et voies de transfert aux eaux de surface du bassin Seine-Normandie des 4 métaux prioritaires (Cd, Hg, Pb, Ni) : Synthèse. AESN/DAI, 2004.

ANSES, 2013. Bilan 2013 de déclarations des substances importées, fabriquées ou distribuées en France en 2012 (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_public_format_final_20131125.pdf).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Anyadike, N, 1999. The Nickel Industry - On the Brink of Expansion, Financial Times Energy, London.

ATSDR, 1997. Toxicological Profiles for nickel. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA: U.S Department of Health and Human Services, Public Health Services (http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp15.html).

Barbotin, L., 2004. Cette batterie est infatigable. L'expansion, 685, p. 115, (http://www.lexpansion.com/bindata/10/685/PDF0685exp0685115.pdf).

Bennett, B.G., 1981. Summary Exposure Asessments for Mercury, Nickel, Tin. London (Exposure Commitment Assessments of Environmental Pollutants, 1.

Brignon, J.-M., Malherbe, L. et Soleille, S., 2005. Les substances dangereuses prioritaires de la directive cadre sur l'eau : Fiches de données technico-économiques. Rapport INERIS DRC/MECO – 2004 – 48088/rapport_substances_dce_2004.

Caplat, C., 2001. Caractérisation géochimique des sédiments fins du littoral du Calvados (Baie de Seine) – Comparaison de matériaux portuaires contaminés à des matériaux non contaminés de la baie des Veys, Université de Caen, Thèse d'Université, Sciences de la Terre et de l'Unnivers, 182p.

Chiffoleau, J.C. (coord), 2001. La contamination métallique, IFREMER, Région Haute Normandie, (Programme scientifique Seine- Aval), 8, 39p.

CITEPA, 2005. Emissions dans l'air en France métropole : métaux lourds, 28p (http://www.citepa.org/emissions/nationale/ML/Emissions_FRmt_MLavr05.pdf).

Commission européenne, 2003. Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux piles et accumulateurs usagés, COM(2003) 723 final.

Danish EPA, 2008a, Nickel, Risk Assessment Report.

Danish EPA, 2008b, Nickel Chloride, Risk Assessment Report.

Danish EPA, 2008c, Nickel Carbonate, Risk Assessment Report.

Danish EPA, 2008d, Nickel nitrate, Risk Assessment Report.

Danish EPA, 2008e, Nickel sulfate, Risk Assessment Report.

Degrémont, 2005. Mémento technique de l'eau (10ème édition), 1928p.

Drag, N., 2000. Substitution of rechargeable Ni-Cd batteries, study for the European Commission, Arrhenius Laboratory, Stockholm University.

DRIRE Ile-de-France, 2003. Rejet d'eaux industrielles 2003 : Principaux résultats des contrôles inopinés réalisés par la DRIRE Ile-de-France sur les rejets d'eau de 31 établissements industriels franciliens (http://www.drire.gouv.fr/ile-de-france/environnement/actu/com_presse_ci2003.html).

Eramet (Société), 2005. Métallurgie du nickel, pour en savoir plus. Techniques de l'ingénieur, M2 251.

European Commission, 2001a. IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/).

European Commission, 2001b. IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/).

European Commission, 2002. IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques for Common Waste Water and Waste Gas Treatment / Management Systems in the Chemical Sector (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/cww.html).

European Commission, 2003. Integrated Pollution Prevention and Control, (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Organic Chemical Industry (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/).

European Commission, 2004. Integrated Pollution Prevention and Control, (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Chemicals, Ammonia, Acids, and Fertilizers Industries (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/).

European Commission, 2005a. IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/).

European Commission, 2005b. IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, 397p (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/).

European Commission, 2005c. IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/).

European Commission, 2010. Evaluation of Regulation (EC) 2003/2003 relating to Fertilisers (http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/fertilizers/final_report_2010_en.pdf).

European Commission, 2012. Study on option to fully harmonise the EU legislation on fertilising materials including technical feasibility, environmental, economic and social impacts, Annexes to Final Report (http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/fertilizers/annexes_16jan2012_en.pdf).

France ST, 2005. Un bel exemple de partenariat franco-espagnol réussi. France ST, Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France à Londres, 79, p. 1, (http://www.ambascience.co.uk/IMG/pdf/FranceST_079_FR_avec_page_de_garde_fr.pdf).

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Goro Nickel, 2004. Projet Goro Nickel, Demande d'autorisation d'exploiter des installations classées.

Goro Nickel, 2004. Projet Goro Nickel, Demande d'autorisation d'exploiter des installations classées, Etude d'impact, tome 3, volume 2, 16 p.

Haut Comité de Santé Publique, 2000. Politiques publiques, pollution atmosphérique et santé : poursuivre la réduction des risques (http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/004001641/0000.pdf).

Hertel, R.F., Maass, T. et Muller, V.R., 1991. Nickel. World Health Organization, Geneva (Switzerland). Environmental Health Criteria, 108.

IFREMER, 2005. Les substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) : Fiches de synthèse, 89p. (http://www.ifremer.fr/delpc/pdf/RAPPORT_FICHES33_SUBSTANCES.pdf).

INERIS, 2006. Nickel et ses dérivés. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques (http://www.ineris.fr/substances/fr/).

INERIS, 2010. Approche de la maîtrise des risques spécifiques de la filière véhicules électriques : Données de base sur les différentes technologies de stockage d'énergie.

INRS, 2009. Nickel et ses oxydes. Fiche Toxicologique n°68 (http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/doc/fichetox.html?refINRS=FT%2068).

INRS, 2012. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France, (http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ED%20984).

INSG, 2000. Nickel Statistics, information downloaded from International Nickel Study Group (www.insg.org).

Kabata-Pendias, A. et Pendias, H., 1992. Trace elements in soils and plants. London (UK), CRC Press. 2nd Ed.

Marlière, F., Bocquet, N. et Rouez, M., 2002. Metaux-Mercure : Rapport final, Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. Rapport INERIS DRC – 08-39266- AIRE /ra111802.doc, 87 p.

McGrath, S.P., 1995. Chromium and nickel. Heavy metals in soils. London (UK), Blackie, Academic & Professional. 2nd Ed.

Motelay-Massei A., Ollivon D., Tiphagne K., Garban B., 2005. Atmospheric bulk deposition of trace metals to the Seine river basin : concentrations, sources and evolution during 1988-2001. Watern Air & Soil Pollution. 164 (1-4),16.

Noreus Drag, 2000. Substitution of rechargeable Ni-Cd batteries, study for the European Commission, Arrhenius Laboratory, Stockholm University.

OMS, 2000. Air Quality Guidelines for Europe. World Health Organization. Copenhagen, 2nd Ed.

OMS, 2004. Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization. Geneva, 3rd Ed.

NICKEL ET PRINCIPAUX COMPOSES

Ontario, 2001. Le nickel dans l'environnement. Feuille-info 01-505.

Pitoiset, A., 2003. Nickel : Goro, terrain miné, L'Express du 13/03/2003, (http://www.lexpress.fr/info/france/dossier/caledonie/dossier.asp?ida=387353).

Rabl, A., 2005. Combien dépenser pour la Protection de la Santé et de l'Environnement : un cadre pour l'évaluation des choix. Les rapports de l'Institut Veolia Environnement, 4, 56 p. (http://www.institutveoliaenvironnement.org/fr/ressources/cahiers/C06DNDJr80ApT97Rb0yArw3x.pdf).

Rieger, B. et al., 2006, « Late Transition Metal Polymerization Catalysis », John Wiley & Sons.

Robert, J. et Alzieu, J., 2005. Accumulateurs - Accumulateurs à oxyde de nickel. Techniques de l'ingénieur, D3 353.

RPA, 2000. Socio-Economic Impacts of the Identification of Priority Hazardous Substances under the Water Framework Directive, Final Report (http://www.shmu.sk/File/projekty/tpds/docs/priorityhazardoussubstances.pdf).

Stolojan, N., 2003. Le nickel : situation actuelle et perspectives du marché mondial. Ecomine, Mai 2003, République Française, Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (http://www.industrie.gouv.fr/sessi/).

Wallinder, I.O., Bertling, S., Kleja, D.B. et Leygraf, C., 2006. Corrosion-induced release and environmental interaction of chromium, nickel and iron from stainless steel. Water, Air, and Soil Pollution, 170, 17-35.

WFD, 2003. Source screening of priority substances under the WFD: Results for Nickel (priority substance). Version 2 (non publiée).