

### **I-3-Élaboration du nickel**

Le nickel se trouve dans deux principaux types de minerai :

*Minerais sulfurés*, sous forme de  $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$ , associée, à de  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ , de  $\text{FeS}_2$  et de  $\text{CuFeS}_2$ .

Les minerais utiles ont des teneurs de 0,7 à 3 % de nickel et composent de Cu, Co, Pt, Ag et Au qui sont récupérés. Ils sont traités, après fragmentation, par séparation magnétique puis par flottation à des teneurs de 10 à 15 % de Ni.

*Minerais oxydés* : ces minerais sont très pauvres de Cu et des métaux précieux, mais contient du Co avec une teneur en eau d'environ 25 %. On distingue :

Les minerais silicatés (sapolites) dans lesquels le nickel se remplace au magnésium de la serpentine ( $3\text{MgO}, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$ ), leur teneur en Ni est de 2,3 à 3 % et contient aussi 10 à 30 % de fer et du cobalt.

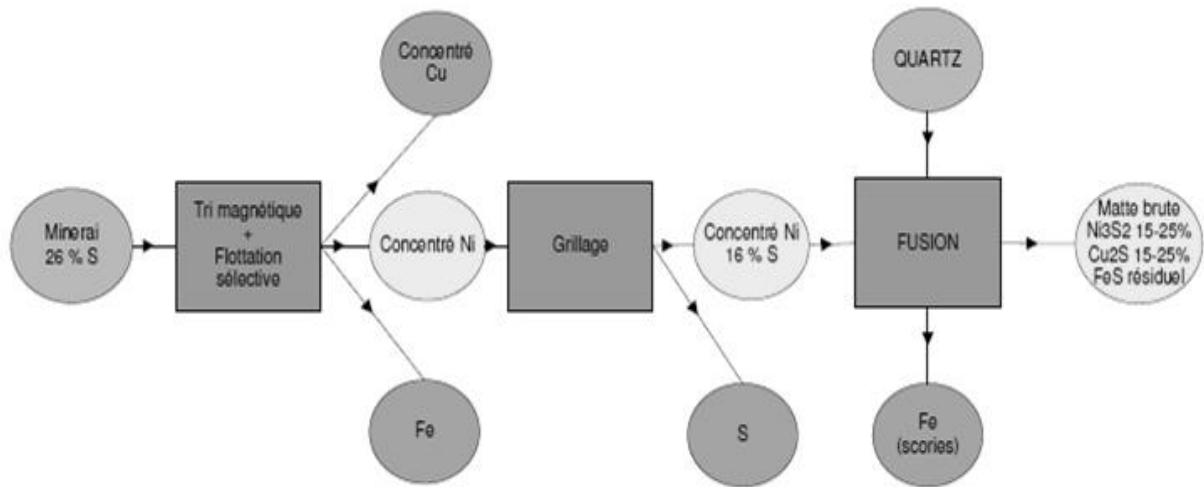
#### **I-3-1-Elaboration de nickel par voie pyrométallurgique**

L'élaboration tend vers la préparation d'une matte brute composée de sulfures de Fe, de Cu et de Ni qui sera affinée en une matte bessemerisée qui sera raffinée pour produire un Ni de haute pureté.

##### **I-3-1-1-Traitement des minerais sulfurés**

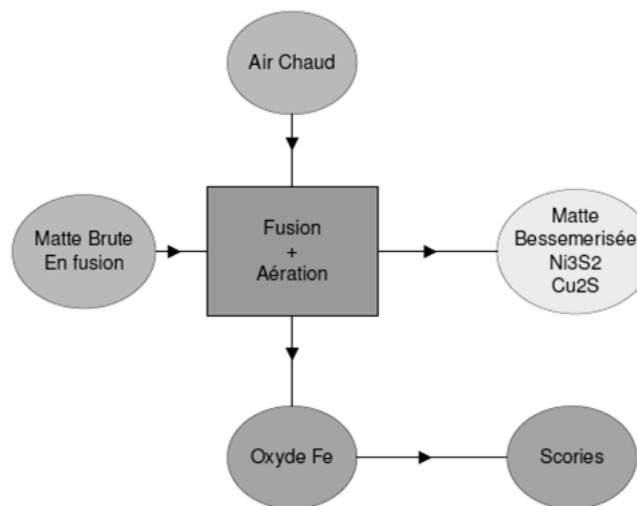
Le minerai va subir une série de procédé de traitement par triage magnétique et flottation sélective pour débarrasser d'une grande partie du Fe et séparer le reste en deux parties : les concentrés de Cu et les concentrés de Ni. Les concentrés de Ni sont grillés. La teneur en soufre passe de 26 à 16%. Ce concentré sera mis en fusion dans des fours à réverbère avec addition de quartz.

Le Fe est éliminé dans les scories. La matte brute est alors composée d'un mélange  $\text{FeS}$ ,  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  et  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Le traitement du minerai sulfuré en matte brute est montré à la Figure I-3.1.



**Figure I-3--1- traitement de minerai sulfuré en matte brute**

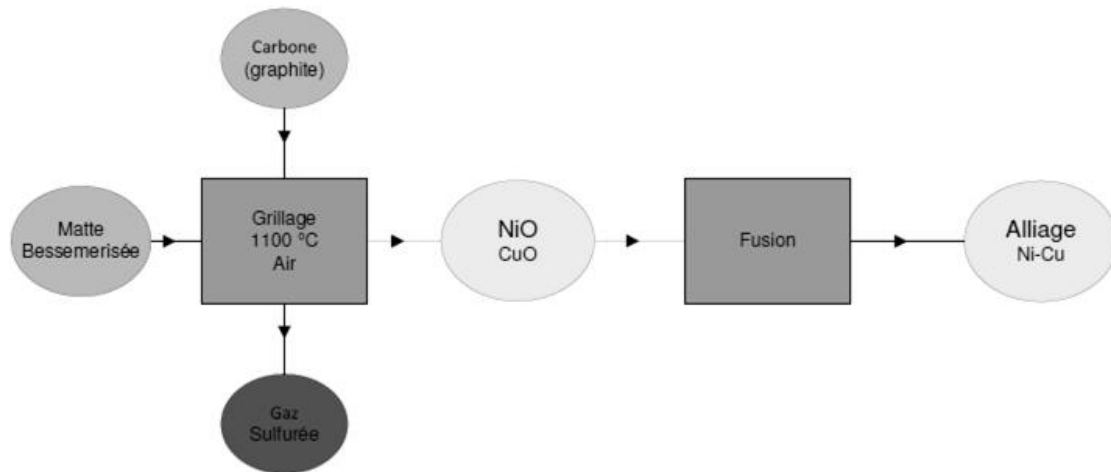
La matte brute est ultérieurement bessemerisée par passage dans des fours à tambour ou les sulfures seront oxydés par un courant d'air chaud. Le FeS s'oxydera en favori par rapport aux  $Ni_3S_2$  et  $Cu_2S$  et seront débarrassé sous forme de scories. La matte bessemerisée contient alors 75- 80% de Ni et Cu 20% de soufre sous forme de  $Ni_3S_2$  et  $Cu_2S$  et 0.3-0.5% de Fe sous forme FeS. La bessemerisation de la matte brute est montrée à la Figure I-3-.2.



**Figure I-3-2- Bessemerisation de la matte brute**

Le traitement de la matte bessemerisée est réalisé en quatre façons :

**Préparation directe d'un alliage Ni-Cu (Monel):** La matte bessemerisée est finement fragmenté puis grillée au four à 1 100°C et réduite par le carbone pour avoir l'alliage. Ce procédé ne pas laisser la récupération des éléments rares est quasiment abandonné. Le mélange ainsi produit est transporté à la fusion et l'alliage est coulé. La préparation de l'alliage Ni-Cu est montrée à la Figure I-3-3.



**Figure I-3-3- Préparation de l'alliage Ni-Cu à partir de la matte bessemerisé**

**Procédé Orford :** La matte est mise en fusion en additionnant du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et du coke. Le refroidissement excite la séparation de la matte en une couche de sulfure double de Cu et de Fe légère (Top) et une couche de sulfure de Ni lourd (bottom). Les deux couches se séparent simplement après coulage de la matte en fusion. Le procéder est refaite jusqu'à ce que la couche en NiS contenir une teneur en Ni de 70% et en S de 30%. Le bottom est ensuite grillé à 1 100°C avec réduction par addition de carbone, puis coulé en (planches) de Ni d'une teneur de 95% en Ni. Ces planches seront affinées par électroplaquage pour avoir des cathodes de Ni pures à 99.9%. Le procédé Orford est montré à la Figure I-3-4.

**Procédé Sproule et Harcourt :** La matte bessemerisée est fusionné, puis refroidie graduellement jusqu'à 500°C. Dans ces formalités, le Cu et le Ni vont se séparer en formant des gros cristaux de sulfures de Cu et de Ni. Une série de traitement de finement fragmentation et de flottation favorise la séparation de Cu du Ni pur. Ces sulfures de Ni ne seront converti en Ni métal. Le procédé Sproule et Harcourt est montré à la Figure I-3-5.

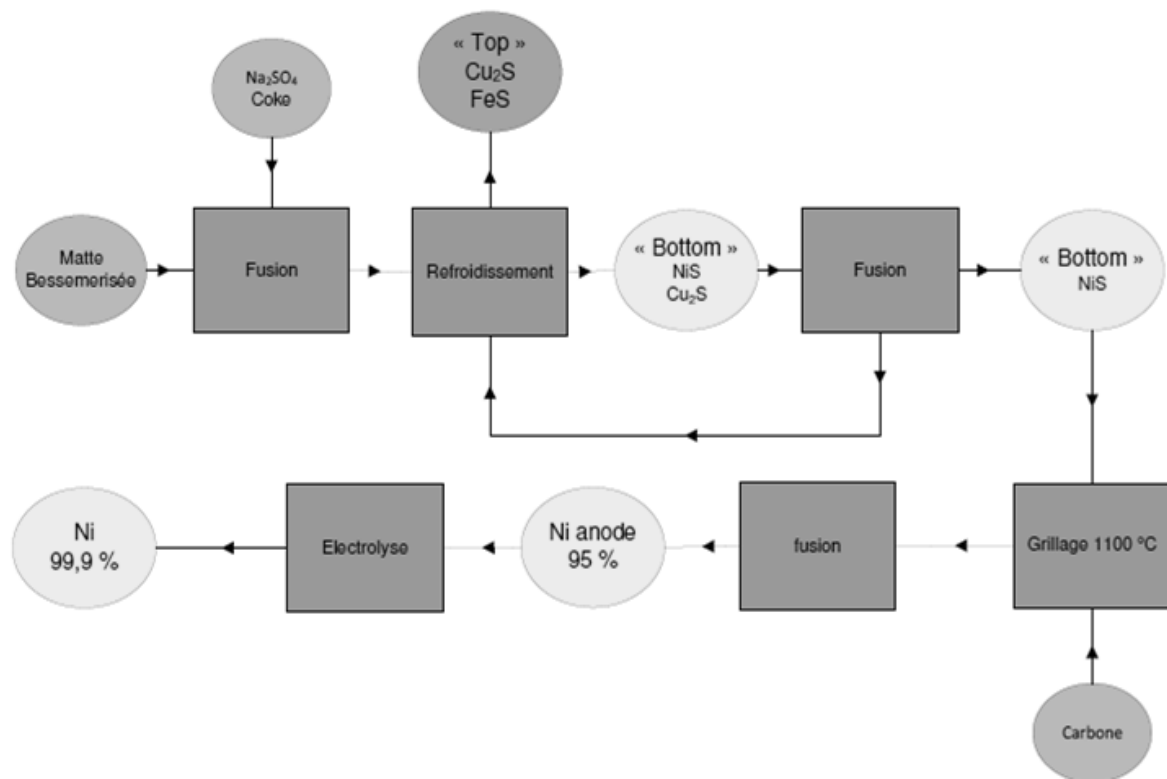


Figure I-3-4- Procédé Orford

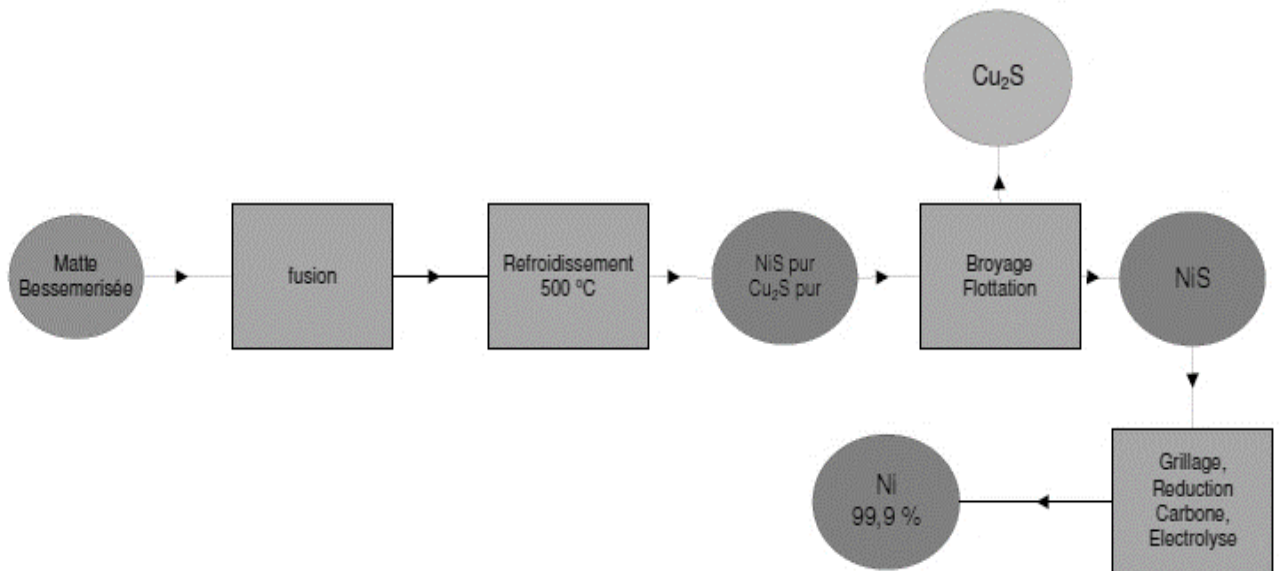
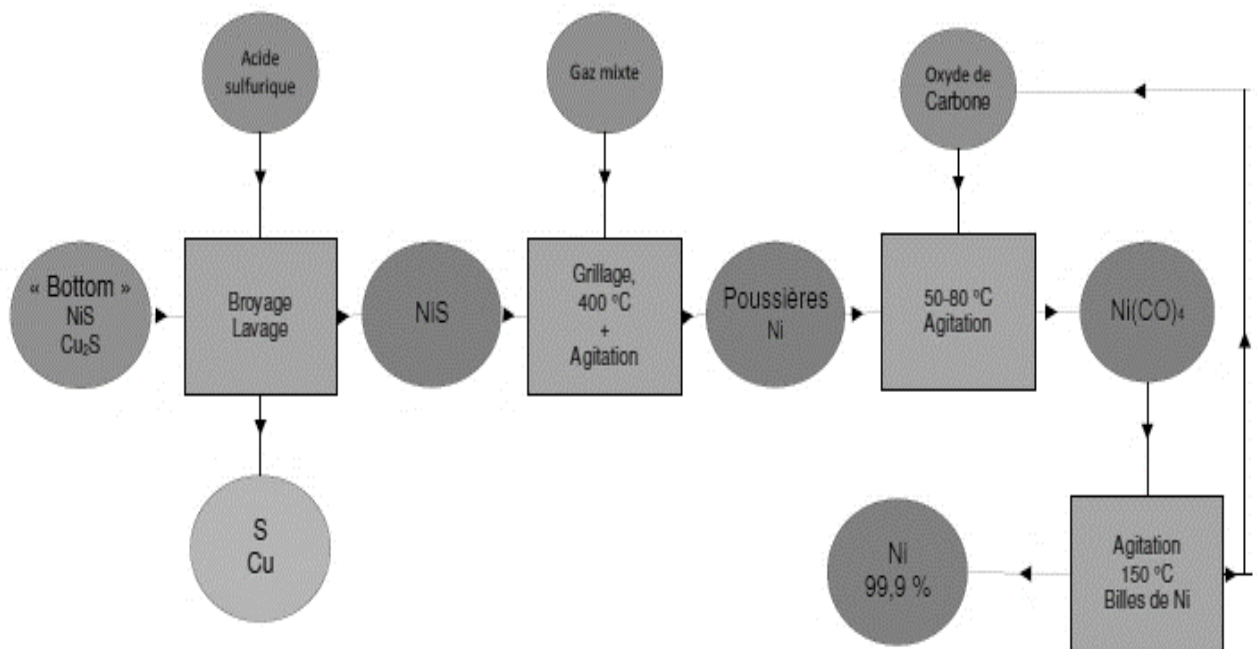


Figure I-3-5. Procédé Sproule et Harcourt

**Procédé Mond:** Ce traitement peut s'effectuer à la matte bessemerisée ou au « bottom ». Le « bottom » est lavé avec l'acide sulfurique pour enlever le NaSO<sub>4</sub>, ainsi qu'une partie du Cu. Ce « bottom » est grillé à 1 100°C puis réduit par un air chaud à 400°C. Le produit de grillage est déplacé sur des tables vibrantes pour produire une « poussière de Ni ». Cette poussière de Ni est déplacé dans des volatilisateur ou circule le CO chaud à 50-80°C pour construire un nickel-tétracarbonyle. Cette réaction chimique peut être réversible à 150°C pour former un Ni pur.



Cela s'effectué dans des colonnes de fonte chargées de billes de Ni en vibration ou le nickeltetracarbonyle ne se déposera en Ni pur. Le procédé Mond est montré à la Figure I-3-6.



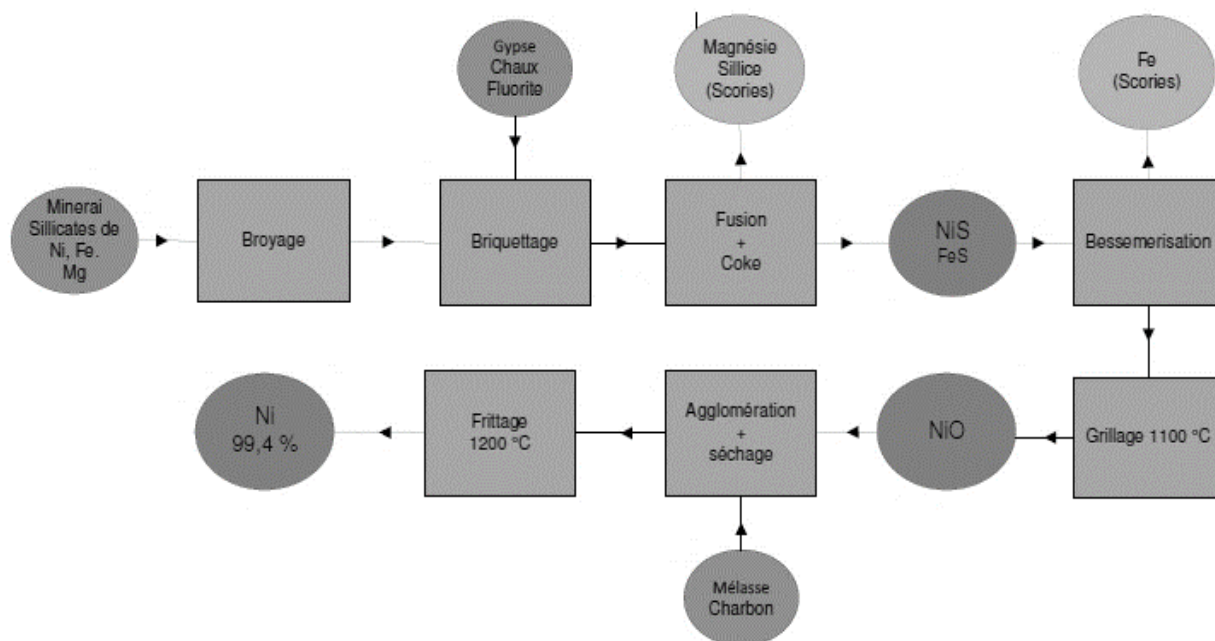
**Figure I-3-6. Procédé Mond**

### I-3-1-2- Traitement des minerais silicatés

Ces minerais ne contiennent pas de Cu mais ont des pourcentages forts en Si et Mg ce qui les rend peu fusibles. On emploie donc deux méthodes de traitement, une méthode par

fusion sulfurante et une autre par utilisation de fours électriques pour produire un alliage ferro-nickel .

**Fusion sulfurante** : Le minerai silicaté est finement fragmenté puis briqueter avec du gypse  $\text{CaSO}_4$ , de la chaux  $\text{CaO}$  et de la fluorite  $\text{CaF}_2$ , puis le tout est fondu en four à cuve avec du coke. Les silicates de métaux sont convertis en sulfures, la chaux, l'alumine et la silice sont scorifiées ainsi que la magnésie rendue fusible par la fluorite. La matte brute produit contient 30-40% de Ni, 40-50% de Fe et le reste est du S. Cette matte brute est bessemerisée ensuite grillée. L'oxyde de Ni produit est aggloméré avec du charbon de bois et de la mélasse, puis séché pour être ensuite grillé pour obtenir l'oxyde en métal. Les grains de Ni vont alors s'agglomérer par frittage pour obtenir un métal pur à 99.4% Le schéma de la fusion sulfurante est présenté à la Figure I-3-7.



**Figure I-3-7- Schéma de la fusion sulfurante**

**Préparation d'un ferro-nickel** : Les oxydes de nickel et de fer sont directement réduits par le carbone et cette réduction apparemment totale ou sélective en fonction des enthalpies des différent oxydes. La réduction totale s'effectué en four électrique ou à cuve et permet de produire un alliage Ni-Fe fortement carburé. La réduction sélective s'effectué en four

électrique en utilisant une quantité limitée de carbone pour réduire la totalité de l'oxyde de nickel, tandis que le Fe(III) est réduit à l'état d'oxyde de Fe(II).

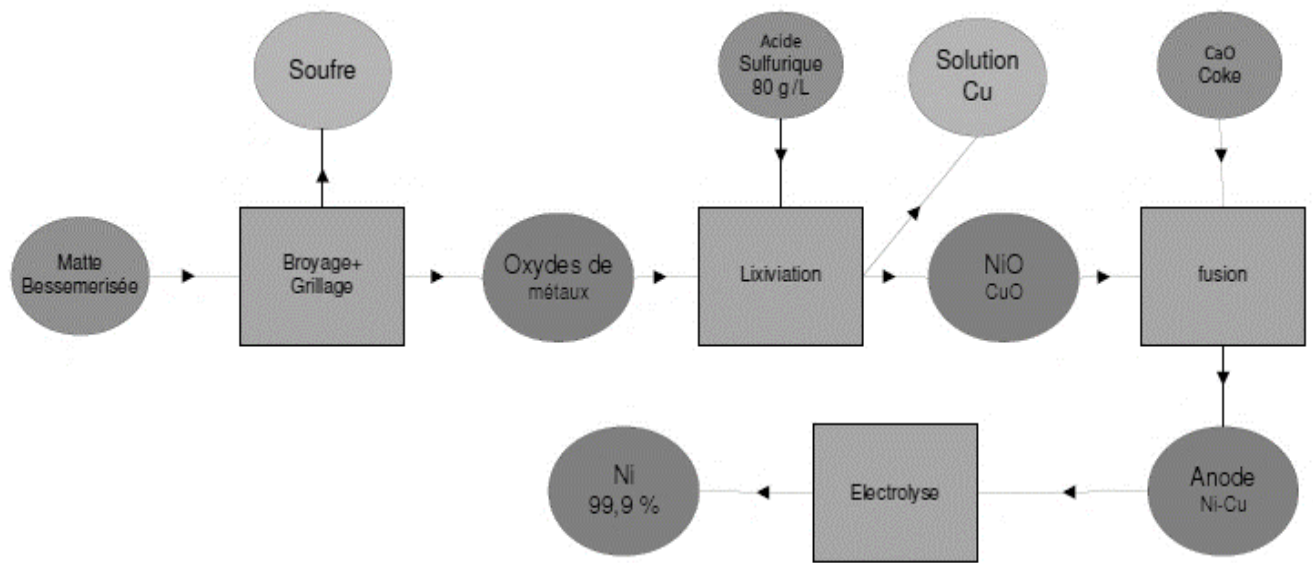
### ***I-3-1-3- Traitement des minerais arséniés***

Le minerai est désargenté par cyanuration ensuite grillé afin d'éliminer le soufre et une partie de As. Le tout sera fondu et le fer sera éliminé sous forme de scories. La matte arséniée (Ni, Co, As) sera finement fragmentée, puis grillée pour en enlever l'As restant. Le Ni et le Co seront oxydés puis traités par voie humide lors d'une lixiviation acide par l'acide sulfurique. Ce lixiviat sera traité par précipitation sélective pour précipiter le Cu, Fe, As, et Co sous forme d'hydroxyde et obtenir le nickel par électrolyse ou précipitation chimique.

### **I-3-2- Traitement du minerai de nickel par voie hydrométallurgique**

Plusieurs procédés hydrométallurgiques ont été effectués pour le traitement de mattes de Ni bessemerisées comme le procédé Hybinette.

**Procédé Hybinette:** Ce procédé s'effectue au traitement des mattes cuivreuses. La matte cuivreuse bessemerisée est finement fragmentée, puis grillée pour enlever 99% du soufre. Elle est ensuite lixiviée par une solution d'acide sulfurique afin que le cuivre et une faible teneur du Ni total passe en solution. Le résidu de la matte constitué par une énorme quantité de Ni est fondu avec du coke et de la chaux pour obtenir un alliage Cu-Ni qui sera coulé en anode, puis traité par électrolyse pour obtenir un Ni pur. Le schéma du procédé Hybinette est montré à la Figure I-3-8.



**Figure I-3-8- procédé Hybinette**

**Préparation électrolytique du nickel :** Ce procédé utilisé pour préparer du nickel pur à partir d'anode d'un alliage quelconque de nickel comme Ni-Cu, Ni-Fe ou un Ni très impur. L'électrolyse est mise à un pH faiblement acide, à des températures près de 90°C et des densités de courants de 200 à 400 A/m<sup>2</sup>

**Procédé Caron:** Ce procédé a été effectué pour le traitement des latérites fortement ferrifères cubaines (0.6% Ni). Le minerai est réduit à 1 000°C par un gaz gazogène afin de faire passer le Ni et le Co sous forme métallique et l'oxyde de fer à l'état d'oxyde magnétique. La matière de la réduction est lixivié par de l'ammoniaque et du carbonate d'ammonium sous un fort courant d'air. Le Ni se dissout en produit des complexes ammoniacaux. Les complexes insolubles en particulier l'hydroxyde de Fe(III) sont filtrés. La solution ammoniacale de Ni est évaporée et le carbonate basique de Ni précipite, ensuite il est calciné (77% Ni et 0.58% Co). Plusieurs méthodes utilisées pour la séparation Ni-Co.

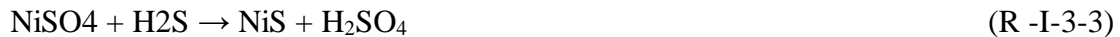
**Procédé Sherrit Gordon :** Ce procédé est effectué sur les concentrés de métaux sulfurés qui sont traités par lixiviation ammoniacale. Le Ni, Co et Cu dessous en solution, le résidu ferreux est rejeté. Le Cu est précipité par vaporisation sous forme de sulfure et le nickel est précipité par l'hydrogène sous pression.



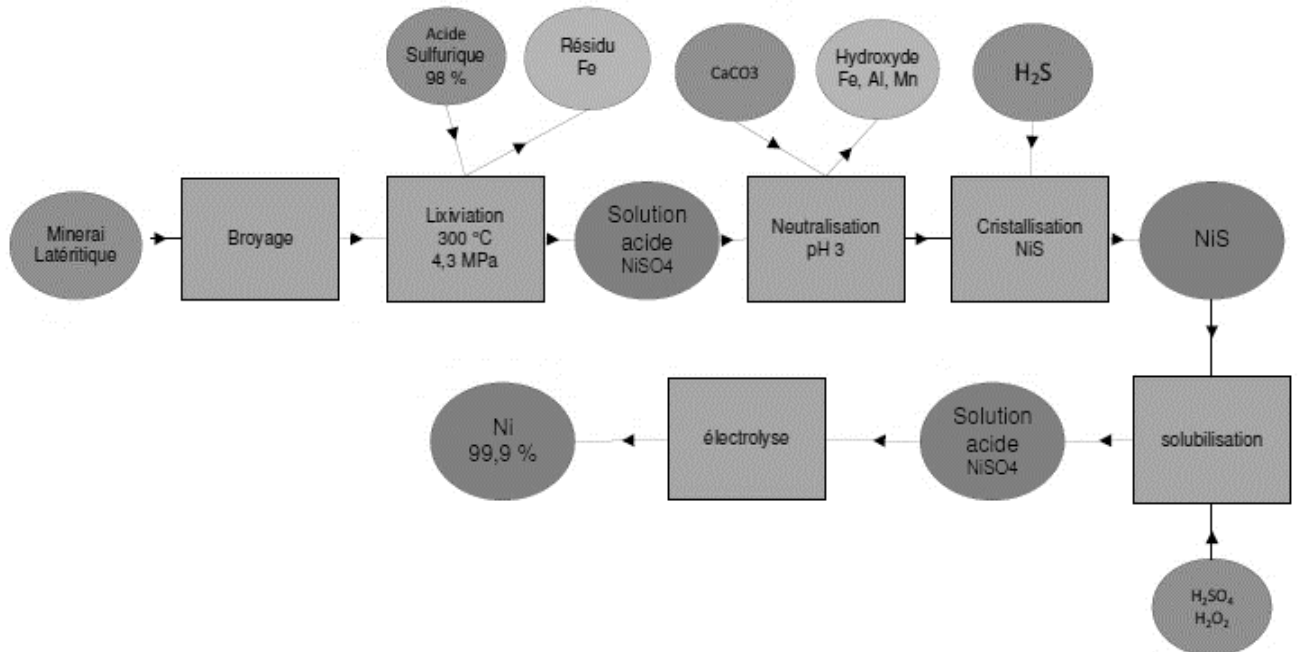
**Procédé Moa:** Ce procédé effectué une lixiviation par acide sulfurique 98% à 300°C sous pression 4.3 MPa pour traiter sous vibration un minerai latéritique finement fragmenté. 94% du nickel est mis en solution sous forme de sulfate (R I-3--2) tandis qu'à cause de sa faible solubilité dans les conditions, le fer reste dans le résidu.



On neutralise le lixiviat par  $\text{CaCO}_3$  jusqu'à pH 3. Le fer, l'aluminium et le manganèse précipitent. Enfin, le nickel précipite sous forme de  $\text{NiS}$  grâce à l'addition d' $\text{H}_2\text{S}$  sous pression (R -I-3-3).



Le  $\text{NiS}$  est remis en solution dans une solution d'acide sulfurique avec  $\text{H}_2\text{O}_2$  puis un nickel de haute pureté est obtenu par électrodeposition ou par extraction par solvant. Le schéma du procédé Moa est présenté à la Figure I-3-9.

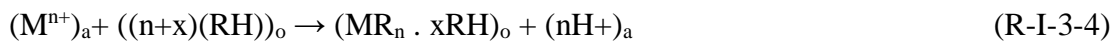


**Figure I-3-9. Procédé Moa**

**Procédé « Atmospheric Pressure Sulphuric Acid Leach »** : Ce procédé est utilisé pour traiter du minerai de type latérite. Le minerai est lixivié à pression atmosphérique à 95°C pendant 4 h avec une solution d'acide sulfurique 3 N avec une concentration en solides de 250 g/L. 85% du Ni et 75% du Co sont extraits. Le lixiviat obtenu constitue alors 2.7 g Ni/L et 0.16 g Co/L. Une lixiviation à contre-courant en trois étapes à 95°C avec une solution d'acide sulfurique 2 N et 35% de solides autorise de réduire la consommation d'acide pour un taux d'extraction du nickel de 81% .

### **I-3-3-Extraction par solvant**

L'extraction par solvant est un précédé de séparation en hydrométallurgie. Les acides phosphoniques sont généralement utilisés pour la séparation Co-Ni. L'acide di-alkyl phosphonique permet l'extraction sélective du nickel et du cobalt par rapport aux autres métaux contenus dans des lixiviats d'acide sulfurique. Le principe de l'extraction est un échange de cations entre une phase aqueuse et une phase organique :



$M^{n+}$  est un cation métallique n-valent. RH est un acide phosphonique et les phases aqueuses et organiques sont représentées par « a » et « o ».

L'acide phosphonique a une aptitude pour produit des complexes avec certains métaux en fonction du pH. La chélation des métaux peut être sélective. Le transfert des métaux de la phase organique vers la phase aqueuse se fait par contact sous vibration avec une solution acide. Ce solvant a été mis en place à l'origine pour séparer le nickel des autres métaux de valeurs comme le cobalt. L'utilisation d'un solvant d'extraction permet une extraction sélective de métaux de forte valeur comme le nickel à partir de solution aqueuse concentrée avec plusieurs autres métaux indésirables.