

# ANALOGIE ENTRE UN MÂCHEFER ISSU DE L'INCINÉRATION DE DÉCHETS INDUSTRIELS ET DES ROCHES IGNÉES

## APPLICATION A L'ÉTUDE DE LA LIXIVIATION

Jean-Louis Pineau\*, Laurent Febvay-Choffel\*\*, Michel Arnold\*\*\*

LEM CNRS ENSG Nancy - Tredi Salaise - CRPG CNRS Nancy

L'analogie entre un mâchefer issu de l'incinération de déchets industriels et une roche ignée permet d'approcher les mécanismes physico-chimiques qui sont à l'origine de la mise en solution du chrome et du cuivre et du blocage du plomb et du zinc contenus dans ce déchet lors de la lixiviation. Le paramètre majeur qui conditionne le comportement de ces métaux lors d'une lixiviation est le pH dont la tendance à la basicité est expliquée par un déficit d'aluminium vis-à-vis du sodium et par la formation de sulfure puis sulfate de sodium.

Le chrome se trouvant essentiellement à l'intérieur de la magnétite, la quantité de chrome solubilisée est donc faible.

The analogy between slag that is produced during incineration of industrial wastes, and igneous rocks allow to approach the physical, chemical mechanisms of Cr, Cu solubility and Pb, Zn insolubility during leaching. pH is an important parameter because the metals behaviours depend on it. It varies with relative quantity of aluminium in regard of sodium of slag, and with sulfite transformation into sulfate. Most of the chromium is inside the magnetite, so quantity of solubilized Cr is small.

Comme le risque majeur encouru par le stockage des déchets est l'entraînement par les eaux des éléments polluants contenus dans ces derniers, son évaluation doit privilégier l'étude de l'interaction entre l'eau et les déchets. A cet effet, un essai de lixiviation correspondant à la norme NF X 31 210 est imposé. Il correspond à trois lixiviations successives en vue de contrôler la décroissance de la mise en solution des métaux. Cet essai fait partie d'un ensemble d'opérations visant à caractériser au mieux le déchet. L'ensemble des opérations est donné dans la circulaire ministérielle du 28 décembre 1990, laquelle a été appliquée à une recherche effectuée sur du mâchefer issu de l'incinération de déchets industriels, menée à partir de 1991 [Febvay-Choffel, 1995]. Pour que les conclusions de cette étude ne se limitent pas à un constat comme c'est généralement le cas, une analogie a été démontrée entre le mâchefer et les roches ignées pour expliquer les résultats obtenus lors du premier essai de lixiviation. La synthèse des résultats expérimentaux obtenus

est donnée dans la première partie, la démonstration de l'analogie et son application dans les deux parties suivantes.

### ÉTUDE DU MÂCHEFER

Le mâchefer étudié provenait de l'unité Tredi de Strasbourg dont le schéma se trouve dans l'article Pineau, Febvay-Choffel (1997). L'étude a été menée sur 7 productions journalières. Elle correspond au schéma donné par la circulaire ministérielle de décembre 1990, à savoir une description du déchet, une analyse chimique et un essai de lixiviation (X31 210) associé à une analyse du lixiviat. Le lixiviat est la solution aqueuse dans laquelle se trouvent les métaux dissous par la lixiviation.

Le mâchefer sortant du four après avoir subi une trempe dans la garde hydraulique, a l'aspect d'une roche volcanique. Il se présente sous la forme de boulets, de laves, de cendres. La lave est la forme dominante. La synthèse des analyses chimiques élémentaires des 7 échantillons correspondant aux 7 productions journalières est donnée dans le tableau 1. Chaque échantillon a fait l'objet d'une lixiviation suivant la procédure de la norme NF 31 210. La synthèse des résultats de la lixiviation est donnée dans le tableau 2.

La comparaison des teneurs en métaux lourds des 7 échantillons de mâchefer brut avec les concentrations de ces métaux dans les lixiviats montre qu'il n'y a pas de correspondance. En particulier, le zinc est insoluble dans les limites de l'analyse chimique contrairement au cuivre bien qu'ils aient pratiquement les mêmes teneurs dans le mâchefer brut. Le chrome est partiellement soluble avec des valeurs comprises entre 0,02 mg/l et le seuil de 0,01 mg/l.

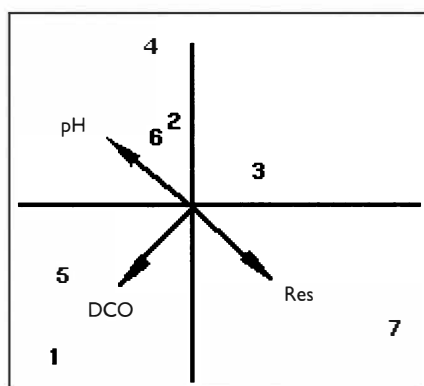
La description des 7 échantillons en fonction de la quantité relative d'éléments solubles, du pH, de la résistivité et de la DCO est donnée dans la figure 1. Elle est obtenue à l'aide d'une analyse en composantes principales (ACP). Le plan de la figure 1 ayant un pourcentage d'inertie de 90 % donne une bonne représentation de la proximité des 7 échantillons. Le même principe d'étude qui a été effectué sur les éléments majeurs du tableau 1 montre que les teneurs en fer et soufre total sont les seules à pouvoir donner une image proche (figure 2) de la figure 1.

**Tableau 1 : Synthèse des analyses chimiques élémentaires des 7 échantillons de mâchefers**

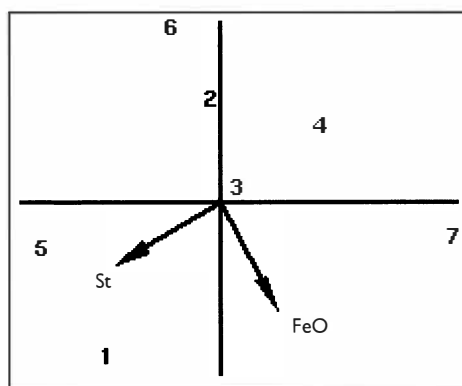
Éléments majeurs (%)												
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	St
v.max	45,65	17,98	34,92	1,88	2,86	10,16	10,82	1,61	7,69	2,54	4,32	2,91
v.min	24,71	7,43	14,53	0,54	1,64	6,41	2,66	0,56	3,66	0,96	0,5	0,03
Métaux lourds (ppm)												
	Pb	Zn	Cu	Cr								
v. max	1215	6300	7000	6825								
V. min	190	600	971	2716								

**Tableau 2 : Synthèse des analyse des lixiviats**

Caractéristiques du lixiviat				Éléments (mg/l)		Métaux lourds (mg/l)			
	pH	DCO mg/l	résistivité ohm.cm	Sulfate	Chlorure	Pb	Zn	Cu	Cr
v. max	10,42	156,0	2241	205,0	127,0	< 0,01	< 0,05	0,13	0,02
v. min	7,13	8,05	290	52,2	10,1	< 0,01	< 0,05	< 0,05	< 0,01



**Figure 1 : Représentation des caractéristiques de la solution**



**Figure 2 : Diagramme Fe/St du brut**

Ces différentes remarques constituent un constat. L'explication nous est fournie par l'analogie mâchefer/roche ignée.

**ÉTUDE DE LA CONSTITUTION DU MÂCHEFER**

Sachant que, d'une part, les minéraux étant le résultat d'un équilibre chimique et thermodynamique entre des éléments, leur étude permet de comprendre la roche dont ils sont issus et que d'autre part il y a une similitude entre le mâchefer et les roches ignées, nous nous sommes servi des techniques des minéralogistes pour expliquer la constitution du mâchefer. Les résultats les plus significatifs ont été obtenus avec la diffraction des rayons X et la microsonde de Castaing couplées aux diagrammes chimiques.

**La constitution minérale décrite par la diffraction des rayons X**

Les diffractogrammes X obtenus se caractérisent par un bruit de fond important correspondant à une forte proportion de matière amorphe. Le tableau 3 donne les minéraux qui sont discernables.

La présence de ces différents minéraux montre :  
 – qu'avec l'hypersthène trouvé dans les échantillons 3 et 6, la température dans le four a été d'au moins 1300°C [Ausschuss für metallurgische Grundlagen, 1981],

– que cette température a du être atteinte avec les autres productions parce que du quartz coexiste avec de la magnétite,

– que l'abaissement de température lors de la trempe, a été brutal à partir de cette température puisque la matrice amorphe est importante, – que ce refroidissement final à l'eau a permis la formation de sulfate et de carbonate.

Bien que la description donnée par les RX permet d'avoir une approche de la constitution du mâchefer, elle est limitée à cause de la matrice amorphe qui est

prépondérante. Nous complétons cette description par une analyse à la microsonde de Castaing afin de préciser la nature des constituants rencontrés.

**Tableau 3 : Résultats de l'analyse diffractométrique aux rayons X**

Minéral	1	2	3	4	5	6	7
Feldspath - (K, Na) Si <sub>3</sub> AlO <sub>8</sub>						-	
Thénardite - Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>							
Hématite - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					*		
Hypersthène - (Mg, Fe) SiO <sub>3</sub>			*			-	
Lépidocrocite - FeO. OH							
Magnétite - FeO. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	**	**	**	**	**		**
Quartz - SiO <sub>2</sub>	**	**		-	*		*
Sidérite - FeCO <sub>3</sub>							*

\*\* détermination facile/\* détermination moins facile/- détermination délicate

**Les constituants déduits de l'analyse à la microsonde de Castaing**

La taille des minéraux étant micronique, le choix s'est porté sur la microsonde de Castaing parce qu'elle associe une analyse optique de la surface du solide à des analyses chimiques ponctuelles élémentaires.



Figure 3 : Texture d'un mâchefer

Tableau 4 : Analyse chimique des constituants du mâchefer

	Matrice max/min	Cristaux blancs max/min	Cristaux noirs max/min
SiO <sub>2</sub>	42,8/36,5	0,14/0,10	49,7/48,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,4/8,0	7,2/2,9	31,3/30,3
Na <sub>2</sub> O	0,47/0,5	0,08/0,00	2,9/2,4
K <sub>2</sub> O	1,2/0,0	0,05/0	0,3/0,16
MgO	7,3/1,7	2,6/2,5	0,05/0
CaO	23,3/15,9	0,53/0,47	15,4/13,6
FeO	15,7/11,1	55,7/48,6	0,68/0,66
SO <sub>3</sub>	0,56/0	0,12/0	0,2/0,04
TiO <sub>2</sub>	8,6/4,1	31,5/23,1	0,25/0,20

L'analyse optique d'une surface de l'ordre du mm<sup>2</sup> répétée plusieurs fois sur chacun des échantillons a montré que les différents échantillons de mâchefer ont la même texture (figure 3). La texture est la suivante : des cristaux de couleur claire, de forme trapue et des cristaux le plus souvent allongés, de couleur noire, noyés dans une gangue. Le tableau 4 illustre l'analyse chimique ponctuelle des 3 constituants décrits dans la figure 3.

L'application de la théorie de l'équilibre chimique moléculaire aux données du tableau 4 montre que les cristaux blancs avec 5 % environ d'alumine, 2,5 % de magnésie, 50 % d'oxyde de fer et 30 % d'oxyde de titane ont une composition proche de celle d'un spinelle. Ils doivent correspondre à la magnétite détectée par les RX. Les cristaux noirs ont une composition d'alumino-silicates de calcium et de sodium similaire à celle d'un plagioclase appartenant à la famille des feldspaths détectés par les RX. La matrice a une composition intermédiaire entre ces deux composants. Elle représente la phase liquide dans laquelle se sont développés les

cristaux précédents. Le brusque refroidissement de cette matrice a empêché la croissance cristalline.

De plus, sachant que la composition d'un plagioclase est comprise entre le pôle albite : Na.(Si<sub>3</sub>Al.O<sub>8</sub>) et le pôle anorthite : Ca.(Si<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) nous pouvons analyser la teneur en alumine nécessaire à la stoechiométrie. Elle est comprise entre 32 % et 96 % par rapport à la teneur en silice. Dans notre cas le rapport est compris entre 14 % et 36 %. Il y a un déficit d'alumine qui touche en priorité le sodium puisque l'albite est un minéral de basse température qui n'a pas le temps de se former à cause du refroidissement brutal. De fait, une partie du sodium s'associe avec le soufre sous la forme de sulfure. Ce dernier s'oxyde lors de la trempe pour donner la thénardite mise en évidence avec l'échantillon 5 qui a la plus forte teneur en sodium.

Cette confirmation de la constitution permet d'aborder la répartition des métaux lourds dans les 3 constituants majeurs : la matrice, le spinelle, les plagioclases.

### La répartition des métaux lourds

Les métaux lourds analysés ont été le zinc, le chrome, le plomb et le cuivre. L'étude statistique de leurs teneurs obtenues par la microsonde de Castaing montre que les métaux se répartissent en 2 groupes, le groupe du zinc et du chrome lié au spinelle et le groupe du plomb et du cuivre à priori indépendant du constituant (figure 4). La restriction concerne le plomb parce que son seuil de détection se situe dans l'intervalle [0,3 % ; 0,4 %].

Le zinc ne se trouve que dans le spinelle et s'y trouve de façon aléatoire. Le chrome se répartit entre le spinelle pour l'essentiel et la matrice pour le restant. Il se trouve dans le spinelle de façon régulière. Ce résultat est conforme à la composition des spinelles de formule générale RM<sub>2</sub>O<sub>4</sub> avec R pouvant être du : Mg, Fe<sup>2+</sup>, Zn et M du : Al, Cr, Fe<sup>3+</sup>.

L'étude de la répartition du plomb et du cuivre a été menée à partir des affinités de ces métaux pour l'oxygène et le soufre (tableau 5) et leurs solubilités dans la magnétite à

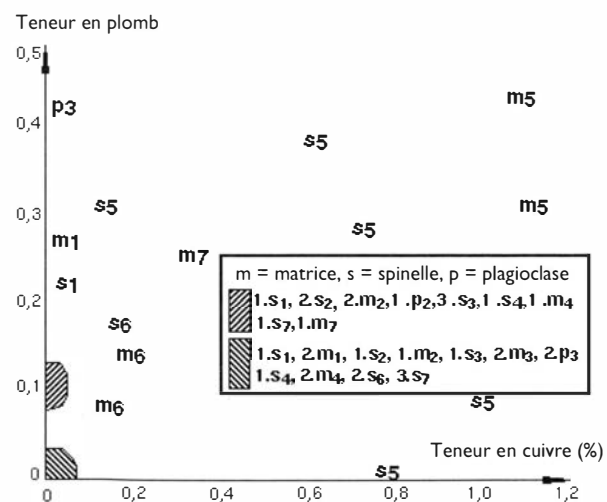


Figure 4 : Répartition du plomb et du cuivre dans les constituants

Tableau 5 : Affinités

A (joule) à température 1000°C	Fe		Pb		Cu	
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	PbO	PbS	Pb <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	CuO	CuS
	54 005	22 269	45 477	2 139	9 017	36 637

Tableau 6 : Potentiels d'ionisation

Potentiel (eV/unit charge)	Fe <sup>3+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Cu <sup>+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>
	7,95	7,46	7,67	10,17	10,58

hautes températures reliées aux potentiels d'ionisation (tableau 6) [Goldschmidt, 1958]. Comme la magnétite est le spinelle décrit par les RX, l'affinité du fer pour l'oxygène donnant la magnétite est donnée à titre de référence. Les affinités (A exprimé en joule) ont été établies à partir des enthalpies et des entropies des divers éléments à 1000°C. potentiel

Il ressort des deux tableaux 5 et 6 que :

– Le plomb se comporte de façon différente suivant le milieu récepteur. Le plomb qui se trouve dans la matrice, est dissous dans le verre aluminosilicaté qui la compose. Le plomb qui pourrait se trouver dans la magnétite, ne peut se présenter que sous la forme de très fines inclusions parce que son rayon ionique étant supérieur à celui du fer, ne lui permet pas d'être dans le réseau que se soit sous forme interstitielle ou par substitution.

– Le cuivre s'est transformé en un sulfure de cuivre. Cette hypothèse a été vérifiée par la mise en évidence de quelques grains de ce composé. La présence du cuivre dans la magnétite est probablement liée à la solubilisation de ce métal dans l'oxyde ferreux liquide et dans l'oxyde ferrique qui constituent la magnétite.

Cet aperçu de la répartition des métaux lourds sert à l'analyse des résultats de la lixiviation présentés dans le tableau 2.

## ANALYSE DE LA LIXIVIATION

L'analyse des caractéristiques du lixiviat est traitée en priorité parce qu'elle décrit l'équilibre global lixiviat/solide.

### Analyse des caractéristiques du lixiviat

Le pH des lixiviats est basique. Il est compris entre 7,1 et 10,4. Pour expliquer ce résultat expérimental, nous avons supposé dans un premier temps que la composition minéralogique en était le paramètre déterminant. Dans un deuxième temps nous avons cherché les éléments qui pouvaient à la fois décrire la composition minéralogique et expliquer la basicité à partir du sodium contenu dans certains minéraux et libéré lors de leur solubilisation superficielle pendant la lixiviation, sachant que la teneur en sodium du brut n'a pu être corrélée au pH. Les éléments retenus sont le soufre de la thénardite qui est un sulfate de sodium et l'alumine et la silice dont le rapport décrit l'état minéralogique silico-alumineux du mâchefer compris entre le pôle sodique de l'albite et le pôle calcite de l'anorthite. Dans un troisième temps, nous avons cherché la corrélation entre ces paramètres et le pH. Elle a été obtenue comme le montre la figure 5 avec

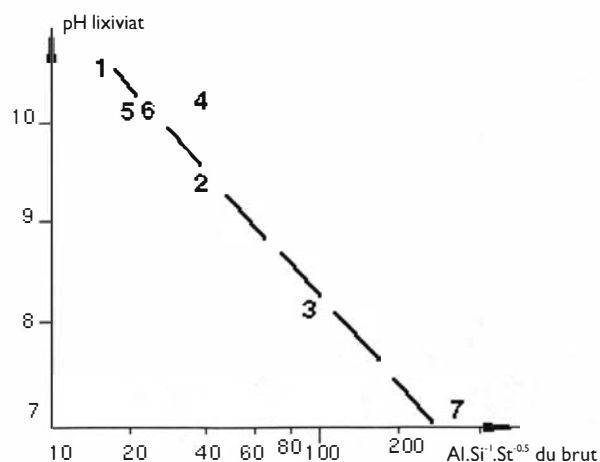


Figure 5 : Relation pH du lixiviat et teneur en Al, Si et St du brut

DCO (mg O<sub>2</sub>/l)

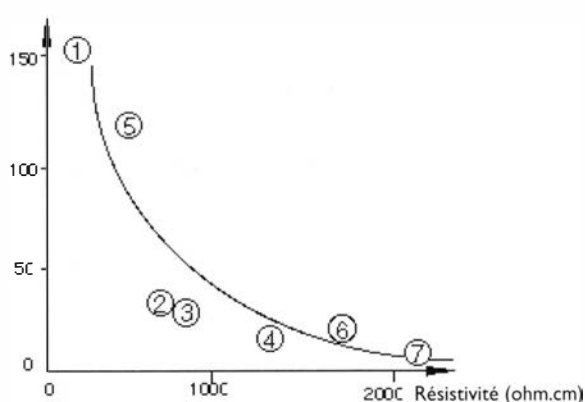


Figure 6 : Relation DCO/résistivité (lixiviat)

Cl (mg/l)

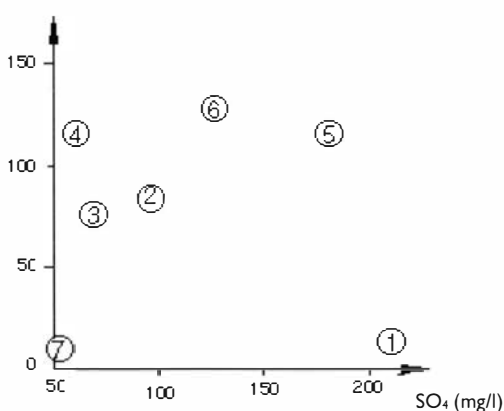


Figure 7 : Relation Cl/sulfate (lixiviat)

en abscisse le logarithme du produit du rapport Al/Si par l'inverse de la racine carrée de la teneur en soufre total. Ce résultat nous amène à admettre une relation de cause à effet entre la composition minéralogique et le pH.

L'étude de la DCO et celle de la résistivité ont été menées conjointement parce que ces caractéristiques sont reliées comme le montre la figure 6.

Il ressort de la figure 6 le classement suivant des 7 lixiviats : 1, 5, 2 et 3, 4 et 6, 7.

Ce classement n'est pas expliqué par les concentrations en sulfate et chlorure des lixiviats comme le montre la figure 7. Par contre il est pratiquement le même que celui obtenu à partir de la relation suivante (relation 1) définie par les éléments St, CO, Al/Si du brut et appliquée aux teneurs correspondantes centrées réduites des 7 échantillons de brut :

relation 1:  $0,4185 (Al/Si) + 0,9681 (CO_2) + 0,9422 (St)$

La relation 1 a été déterminée à partir d'une série d'ACP sur les différents éléments majeurs du brut. Les éléments retenus sont ceux qui par leur composition donnent une proximité des points correspondants aux échantillons proche de celle donnée par l'étude de caractéristiques du lixiviât. Le classement obtenu à partir des données calculées en appliquant la relation 1 pour les 7 échantillons est le suivant, il est proche de celui du graphe DCO/résistivité :

(n°éch ; donnée) :

(1 ; 3,0), (5 ; 1,38), (3 ; 0,042), (2 ; 0,062), (6 ; -1,1), (7 ; -1,64), (4 ; -1,8)

Les éléments du brut communs aux caractéristiques du lixiviât sont le soufre totale et le rapport Al/Si, alors que l'étude des proximités décrites par les figures 1 et 2 montre que ce sont le soufre totale et l'oxyde de fer qui intervien-

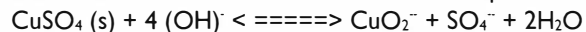
nent. Cette différence au niveau du fer et du rapport Al/Si s'explique par l'altération superficielle de la magnétite d'autant plus importante que le pH du lixiviât est élevé, à potentiel électrique EH constant comme le montre la figure 8 [Garrels, Christ, 1967]. Comme la basicité du lixiviât dépend du déficit en aluminium, ce terme est remplacé par la teneur en oxyde de fer.

### Analyse des concentrations en métaux lourds dans le lixiviât

Chacun des 4 métaux lourds a un comportement propre. Le plomb se trouve à des concentrations inférieures au seuil de 0,01 mg/l. Ce résultat s'explique par la faible solubilité du  $Pb_2 SiO_4$  dont le pKs est égal à 33,9.

Les concentrations en zinc sont elles aussi inférieures au seuil de l'analyse chimique, à savoir 0,05 mg/l. Ce résultat s'explique par l'inertage de ce métal inclus dans la magnétite. Cependant même si ce métal avait pu être accessible à la solution, sa solubilité aurait été faible dans la gamme de pH comprise entre 9,5 et 10,5 puisqu'elle aurait été liée à l'hydroxyde de zinc.

Les concentrations en cuivre varient entre 0,310 mg/l et des valeurs inférieures au seuil de 0,05 mg/l. Ceci est dû à la solubilité du sulfate de cuivre en milieu basique :



avec une affinité chimique de la réaction égale à 207 kJ/mole.

Les concentrations en chrome varient entre 0,02 mg/l et des valeurs inférieures à 0,01 mg/l. Deux facteurs interviennent. Le premier facteur est la teneur en chrome dans le mâchefer avec une concentration de ce métal dans la magnétite. Le deuxième est le pH du lixiviât. Comme la surface de la magnétite s'oxyde d'autant plus facilement que le pH est basique, la faible quantité de chrome solubilisable se trouve dans cette partie superficielle de la magnétite.

Le chrome se trouvant essentiellement à l'intérieur de la magnétite, la quantité de chrome solubilisée est donc faible. La magnétite fait office de minéral d'inertage.

### CONCLUSION

Les constituants essentiels du mâchefer étudié sont :

- un spinelle à tendance ferrifère assimilé à une magnétite dans laquelle se retrouvent tout le zinc et la majeure partie du chrome qui sont des atomes constitutifs de ce minéral et une partie du cuivre par suite de sa solubilité dans la magnétite fondue ;
- une matrice aluminosilicatée dans laquelle se trouve l'autre partie du plomb sous forme de silicate de plomb ;
- des plagioclases.

Les constituants secondaires qui interviennent dans l'étude sont :

- la thénardite qui est un sulfate de sodium,
- des sulfures et sulfates de cuivre.

La lixiviation du mâchefer a mis en évidence :

- Un pH du lixiviât variant entre 7 et 10,5. La basicité du pH s'explique par un déficit relatif d'aluminium vis-à-vis de la sili-

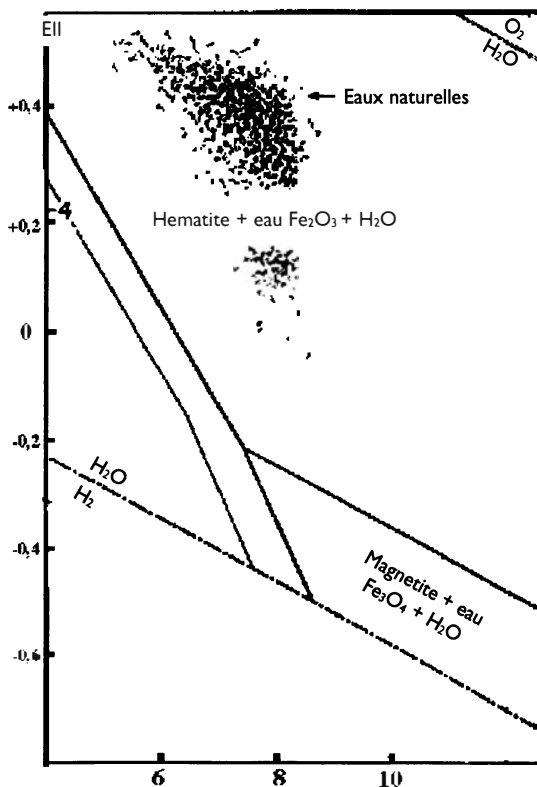


Figure 8 : Diagramme d'équilibre de la magnétite

## APPEL À PUBLICATIONS

**Nous souhaitons publier dans cette revue et nous espérons pouvoir ouvrir nos colonnes à tous les travaux relatifs aux différents aspects du problème des déchets :**

- Collecte, tri, préparation, transfert, stockage,
- Valorisation énergétique : énergie, matière première, matériaux, agriculture,
- Analyse et caractérisation, tests de comportement, nomenclature, classification,
- Traitements thermiques,
- Traitements biologiques,
- Traitements chimiques et physico-chimiques,
- Stabilisation-solidification : procédés et comportement à long terme,
- Déchets, sol et sous-sol,
- Procédés propres,
- Déchets-santé,
- Droit et législation.

### Présentation des articles

- 5 Pages incluant textes, figures et références soit l'équivalent de 15 000 signes au maximum.
- Les textes originaux doivent être expédiés sur disquette 3,5 pouces (Mac ou PC) accompagnés d'une version papier en 3 exemplaires pour le comité de lecture dont une version originale comportant tableaux, figures, ou photographies éventuels. Les fichiers de tableaux ou de figures existants doivent être joints sur la disquette avec originaux papier.
- Le nom du logiciel utilisé doit être spécifié.
- L'article doit impérativement comporter les éléments suivants si possible dans cet ordre :
  - titre,
  - nom, qualité et coordonnées de l'auteur,
  - résumé de 50 mots en français et en anglais,
  - introduction,
  - matériels et méthodes,
  - résultats,
  - discussion,
  - conclusion,
  - références.

Nous publions également les résumés de thèses qui nous sont envoyés ainsi que les résumés de mémoires de DEA ou de DESS lorsqu'ils sont accessibles, sur demande, aux lecteurs.

### Envoi des articles

Alain Navarro, Laboratoire d'analyses environnementales des procédés et systèmes industriels (Laepsi) - Insa bâtiment 404 - 20, avenue Albert Einstein - 69621 Villeurbanne cedex - Tél. : 04 72 43 84 30 - Fax : 04 72 43 87 17. Secrétariat : Norma Renard (Tél. : 04 72 43 87 72 - Fax : 04 72 43 80 84)

ce en vue de former un plagioclase sodique. Le sodium en surplus s'associe au soufre présent pour donner ultérieurement la thénardite.

- La présence du chrome en solution est due à la faible quantité de chrome qui se trouve dans la partie superficielle de la magnétite qui est altérée lors d'une lixiviation basique.
- La présence de cuivre en solution est due à la réaction du sulfate de cuivre en milieu basique.
- Le plomb n'est pas présent en solution parce que le silicate de plomb est pratiquement insoluble.
- Le zinc n'est pas présent en solution parce que noyé dans la magnétite, il n'est pas accessible à la solution, et néanmoins parce que l'hydroxyde de zinc est peu soluble à ces pH.

Il apparaît clairement que le comportement du mâchefer à la lixiviation dépend de sa constitution minéralogique et des caractéristiques de la solution. Comme la solution lixivian- te dépend des deux paramètres majeurs que sont le pH et le EH, il serait souhaitable que dans la circulaire ministérielle du 28/12/1990 ainsi que dans la référence à la norme ENV 12 920 « *Caractérisation de base du comportement à la lixiviation en fonction du scénario* » figure également la mesure du EH.

#### \* Jean-Louis Pineau,

Laboratoire Environnement et Minéralurgie - UMR 75 69 CNRS - École nationale supérieure de géologie - Institut national polytechnique de Lorraine - Rue du Doyen Marcel Roubault - BP 40 - 51501 Vandœuvre cedex

#### \*\* Laurent Febvay-Choffel,

Tredi Salaise - BP 19 - 38150 Salaise-sur-Sanne

#### \*\*\* Michel Arnold,

Centre de recherche pétrographique et géochimique - Rue Chapelle des Pauvres - 54500 Vandœuvre

#### Remerciements

Les auteurs remercient la société Tredi pour la contribution financière à cette recherche sur la stabilisation des mâchefers et le CNRS

### Bibliographie

- Ausschuss für metallurgische Grundlagen. 1981 Schlackenatlas-Verlag Stahleisen M.B.H. Dusseldorf 1981- 282p
- Circulaire ministérielle du 28 décembre 1990 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement. Bomet n° 467 -91/11 du 20 avril 1991
- Febvay-Choffel L. 1995- *Étude des mâchefers résultant de l'incinération de déchets industriels : stabilité et confinement* -Thèse doct. INPL confidentielle -INPL Nancy 205p + annexes
- Pineau J.L., Febvay-Choffel L. 1997- *Hétérogénéité et homogénéité, application à l'échantillonnage de mâchefer issu de l'incinération de déchets industriels* - *Déchets, Sciences & Techniques* n°6 p 21-25
- Garrels R.M., CHRIST C.L. 1967- *Equilibres des minéraux et de leurs solutions aqueuses trad.* Wollast- monographies de chimie minérale- Gauthier-Villars 1967- 335p
- Golschmidt V.M., 1958 - *Geochemistry* - Oxford Univers. Press- 1958 -730p