

L'industrie de l'alumine

La bauxite

La bauxite

La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine ; son nom vient du village des « Baux-de-Provence » où le français Pierre Berthier découvrit ce minerai en 1821.



Figure 1: Minerai de Bauxite (Source: www.garrotchailac.com)

C'est une roche riche en oxyde d'aluminium. Elle est composée, dans des proportions variables, des hydrates d'alumine, de la kaolinite, de la silice et des oxydes de fer qui lui donnent souvent une coloration rouge. Selon la forme minéralogique dans laquelle l'alumine est engagée, on parle de bauxite gibbsitique, boehmitique ou diasporique.

On distingue deux types de bauxite, la bauxite de karst (sur substrat carbonaté) et la bauxite latérique (sur substrat alumino-silicaté). Le tableau suivant donne une composition moyenne de la bauxite.

Composé	Bauxite de karst	Bauxite latérique
	En % de minerai sec	
Al ₂ O ₃	48 à 60	54 à 61
SiO ₂	3 à 7	1 à 6
Fe ₂ O ₃	15 à 23	2 à 10
TiO ₂	2 à 3	2 à 4
CaO	1 à 3	0 à 4
H ₂ O (combiné)	10 à 14	20 à 28
Zn, V, C organique	traces	-

Tableau 1: Composition moyenne de la Bauxite (Source: [Burraqato F., 1964](#))

Les réserves:

L'aluminium est le métal le plus abondant de la croûte terrestre, et le 3^{ème} élément après l'oxygène et le silicium. On le trouve uniquement combiné à de l'oxygène. Les gisements de bauxite sont peu nombreux, on les trouve principalement dans trois grandes zones : l'Afrique, l'Amérique Latine et l'Océanie.



Figure 2: Les principaux gisement de Bauxite dans le monde

La bauxite s'est formé il y a des millions d'années au cours du crétacé, sous un climat tropicale, les éléments solubles et une partie de la silice ont été lessivés par les eaux de pluie acidifiées par les décompositions organiques de l'humus, ne laissant que l'alumine et l'oxyde de fer.

Les réserves mondiales connues à ce jour, sont estimées à 28 000 millions de tonnes. La Guinée est le pays qui possède le plus de réserve. L'usine de Gardanne importe actuellement le minerai de ce pays. Le tableau suivant présente les principaux réservoirs mondiaux de bauxite ainsi que leur niveau d'exploitation.

Pays	Réserves estimées de bauxites (en millions de tonnes)	Production de bauxites (en millions de tonnes, 2012)
Guinée	7 400	19,00
Australie	6 000	73,00
Brésil	2 600	34,00
Viet Nam	2 100	0,30
Jamaïque	2 000	10,30
Indonésie	1 000	30,00
Inde	900	20,00
Chine	830	48,00
Guyane	850	1,85
Grèce	600	2,00
Surinam	580	4,20
Total	28 000	263

Tableau 2 : Principales réserves et productions minières de bauxites (en 2012 ; sources : [USGS](#))

Le procédé Bayer

Le procédé Bayer est un procédé d'extraction de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) contenu dans la bauxite. Il a été découvert en 1887 par le Chimiste autrichien Karl Josef Bayer.

A l'heure actuelle, plus de 95% de l'alumine est produite à partir de la bauxite par ce procédé. Il a été mis en place à l'échelle industriel pour la première fois en 1893, par la société « alumine pure », à Gardanne avec l'aide de son inventeur. Le site de Gardanne a été retenu pour sa proximité avec les matières premières : la bauxite et le charbon.



Le procédé Bayer est un procédé d'extraction par dissolution à haute température et haute pression de la gibbsite et ou de la boehmite contenue dans la bauxite par une solution concentrée de soude.

Voici un schéma représentant toutes les étapes du procédé:

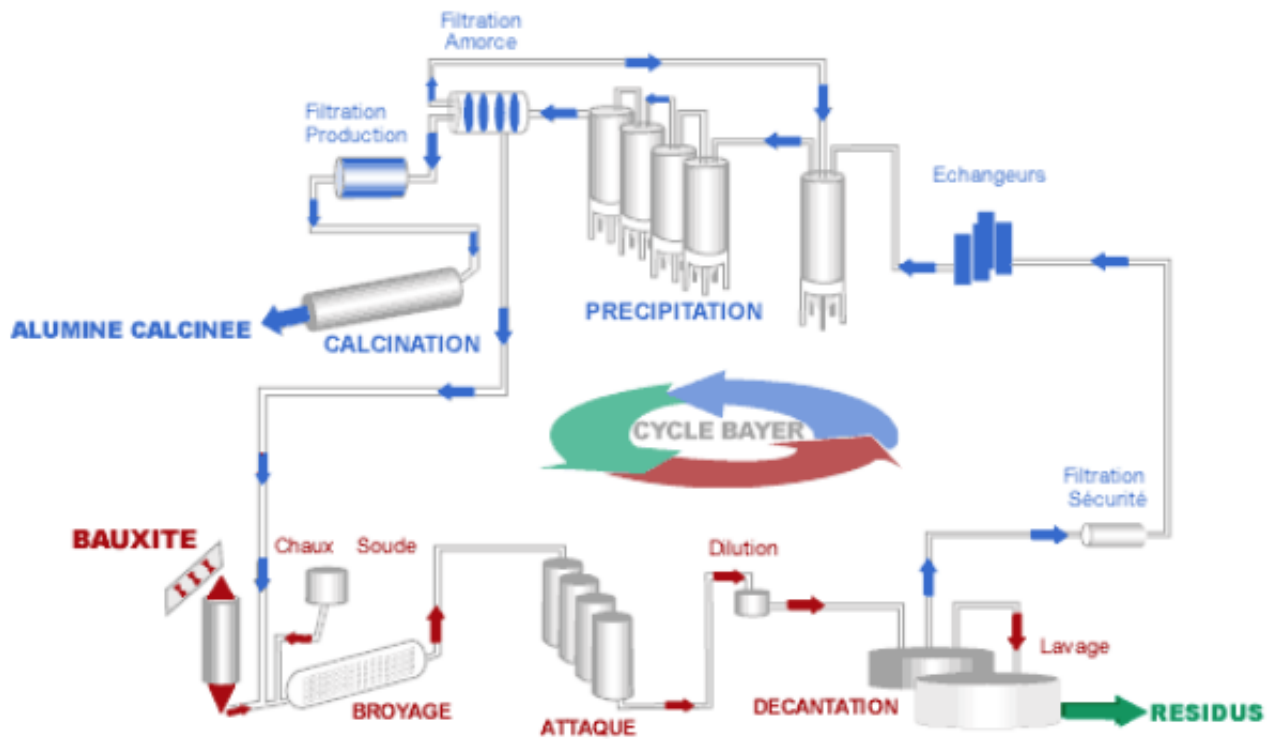


Figure 1: Schéma du procédé Bayer (Source: [Rio Tinto Alcan](#))

Les cinq étapes:

- **Le broyage**: la bauxite est broyée en fines particules pour faciliter l'extraction
- **L'attaque**: la bauxite est mélangée avec de la soude et de la chaux dans des réacteurs à haute température et haute pression.
- **La décantation**: on sépare la phase liquide, riche en aluminium, de la phase solide dans des clarificateurs. Les résidus sont lavés plusieurs fois et forment les "boues rouges". Leur couleur est due à leur forte concentration en oxyde de fer.
- **La précipitation**: la liqueur est refroidie et diluée pour faire précipiter l'aluminium sous forme d'hydrate d'alumine ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).
- **La calcination**: l'alumine chauffée à plus de 1000°C pour la déshydrater.

Le produit obtenu en fin de cycle est une poudre blanche d'alumine (Al_2O_3).

Ce procédé est basé sur la solubilité de l'aluminium par rapport aux autres constituants du minerai: en ce plaçant dans des conditions basiques, l'aluminium se dissout pour donner l'ion aluminate $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ tandis que les autres constituants restent insolubles. Le graphique suivant montre la solubilité de l'aluminium en fonction du pH.

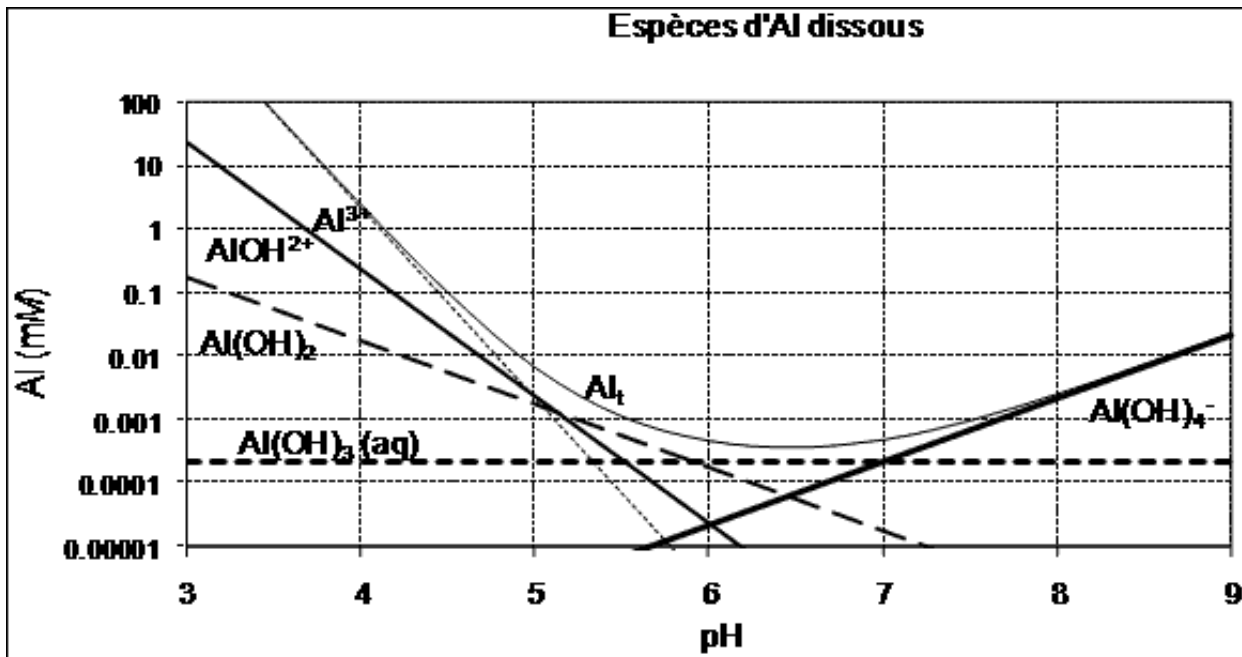


Figure 2: Solubilité des espèces d'aluminium (et de l'aluminium total, Al_t) en fonction du pH dans un système en équilibre avec la gibbsite microcristalline (0,001 mM = 0,027 mg/L; Driscoll et Schecher, 1990)

Les températures et pressions de réaction et la concentration de soude dépendent de la composition minéralogique de la bauxite. En effet, la gibbsite est plus facilement soluble que la boehmite. Le tableau suivant présente les conditions opératoires d'extraction de l'alumine selon la forme minéralogique dans laquelle est engagée l'aluminium (Hudson et al., 1987).

	Gibbsite, $Al(OH)_3$	Boehmite, $\gamma-AlOOH$
Temperature, °C	140-150	230-250
Pressure, atm	3.0	6.0
NaOH, M	2.4-2.75	3.5-3.75

Tableau 1: Conditions opératoires de dissolution de la Gibbsite et de la Boehmite (Source: Hudson et al., 1987)

Sur le site de Gardanne, la bauxite utilisée contient de forte concentration en gibbsite et en boehmite. L'extraction ce fait en deux fois en utilisant les conditions nécessaire à la dissolution de la gibbsite et de la boehmite afin d'optimiser le rendement d'extraction et ainsi de limiter la production de résidus. Le schéma suivant représente le bilan massique du procédé (LOI = perte au feu):

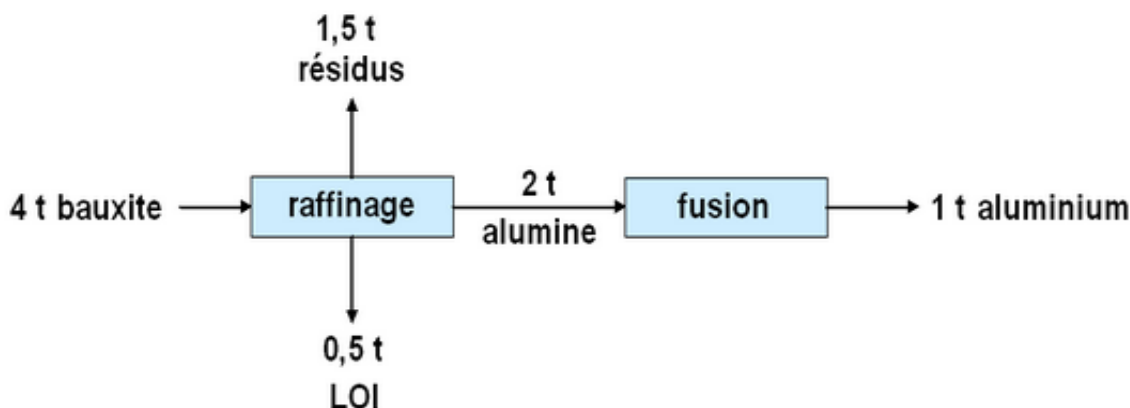


Figure 3: Débit massique type du procédé Bayer (base sèche). (Source : INERIS, BREF 2009)

Le résidu: les boues rouges

Comme vous avez pu le lire dans la page précédente, le procédé Bayer produit en moyenne 1,5 tonne de déchets par tonne d'alumine. Ce ratio dépend de la composition de la bauxite et des réglages du procédé.

La liqueur chargée en aluminium est séparée des résidus insolubles. Ces résidus vont être lavés plusieurs fois en passant dans des clarificateurs où circule un courant d'eau qui passe à contre-courant. Le schéma suivant reprend le procédé Bayer en incluant le traitement des résidus.

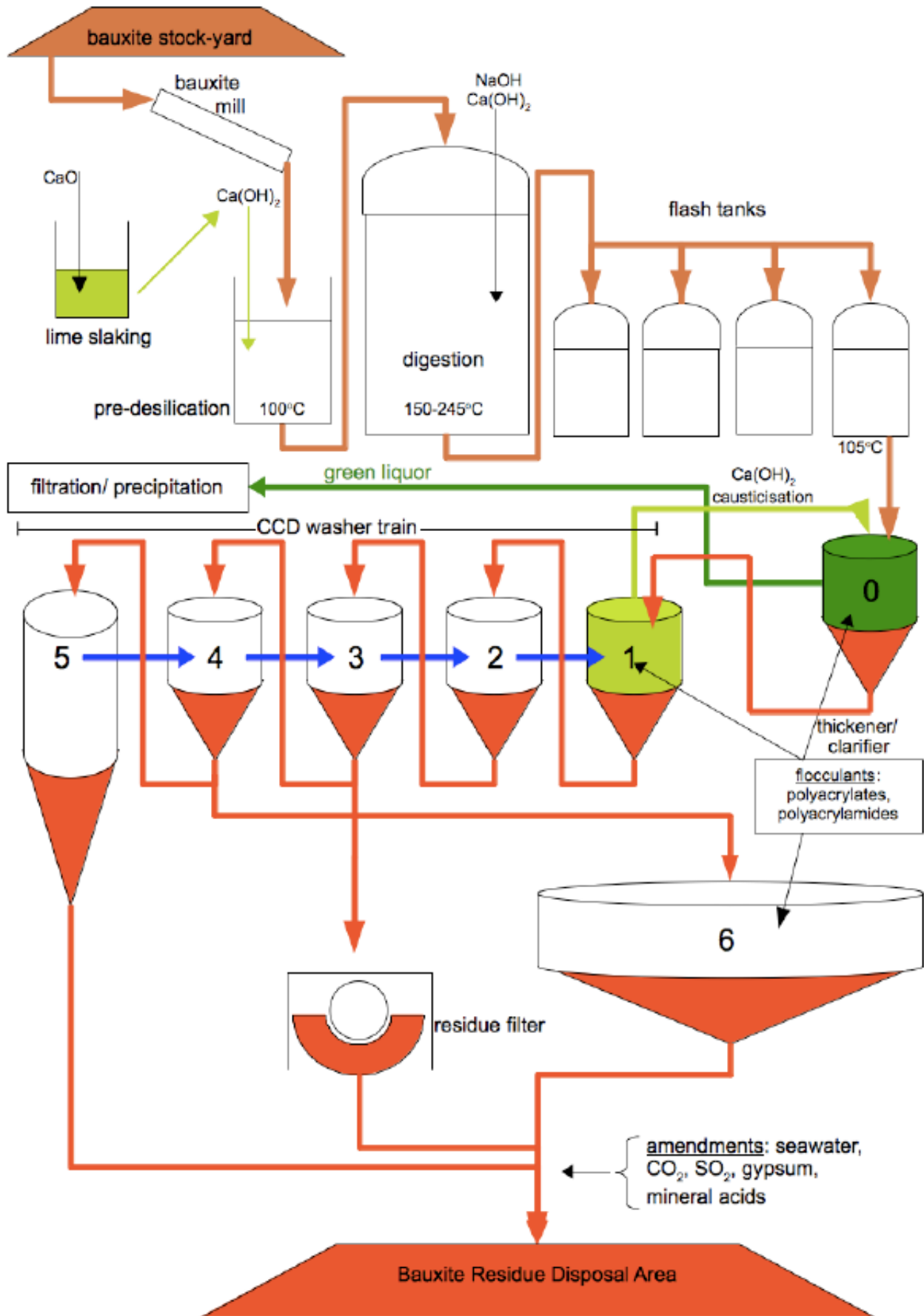


Figure 1: Schéma du procédé Bayer incluant le traitement des résidus (Sources: *Power and al., 2009*)

La boue obtenue est ensuite traitée par un ajout de composé neutralisant, si nécessaire, et diluée afin de l'ajuster aux caractéristiques optimales pour le rejet en mer (densité supérieur à l'eau de mer, concentration en phase solide 120g/L).

On obtient alors une pulpe de couleur rouge, c'est à dire un mélange d'une phase liquide et d'une phase solide. C'est cette pulpe qui est communément appelé "boue rouge". Elle tient sa couleur des oxydes de fer qu'elle contient.

Quelques chiffres mondiaux

L'alumine

L'alumine, ou oxyde d'aluminium Al_2O_3 , est un composant utilisé dans de nombreux produits industriels. La production d'alumine est estimée à 91,6 millions de tonnes en 2012 (sources: [USGS](#)). La carte suivante présente la production d'alumine par continent en 2012 (en millier de tonnes):

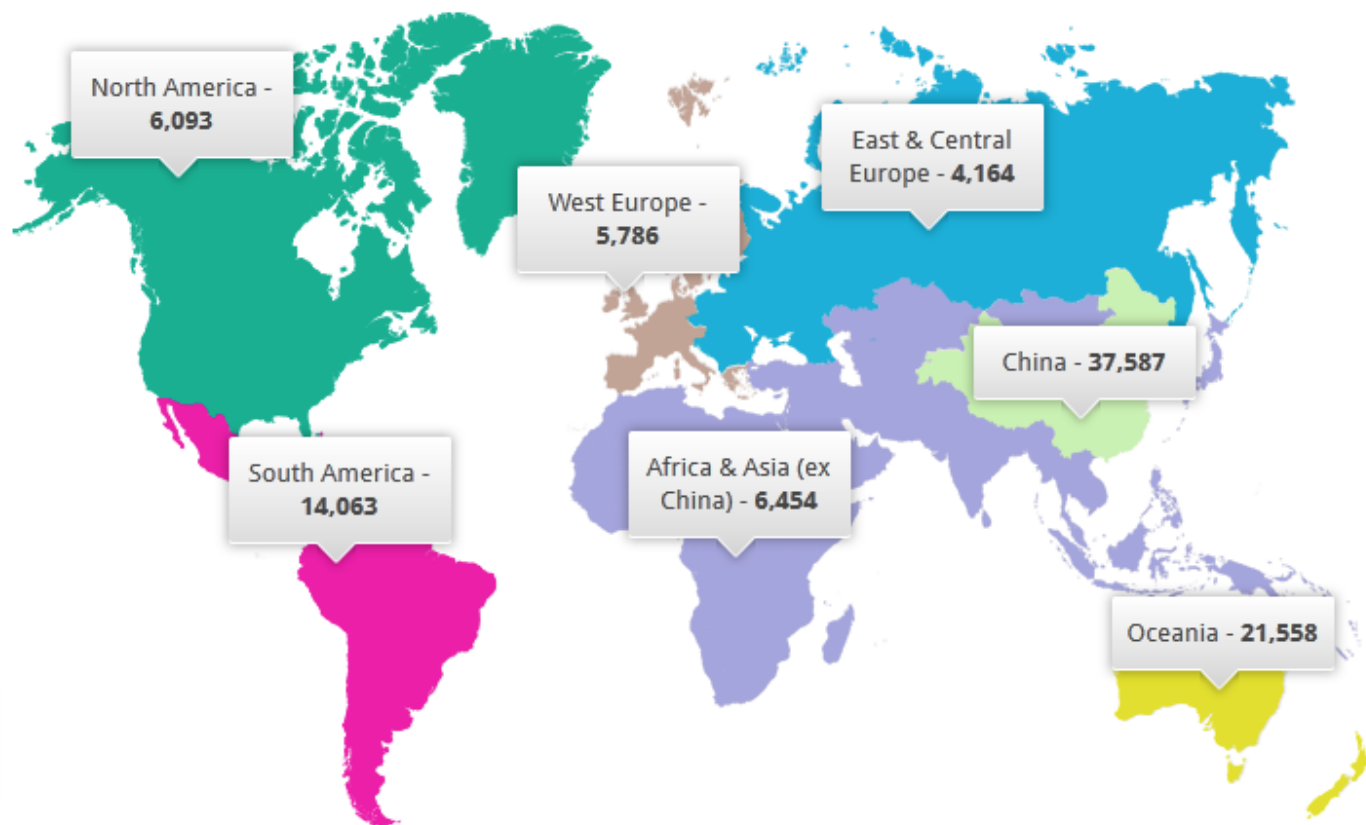


Figure 1: Production d'alumine dans le monde en 2012 (en millier de tonnes) (Source: www.world-aluminium.org)

L'alumine est majoritairement (93 %) destinée à la production d'aluminium. D'autres voies particulières d'utilisation sont tout de même présentes : c'est ce qu'on appelle l'alumine de spécialité. La matière première intervient alors dans diverses productions telles que catalyseurs, abrasifs, céramiques.

L'entreprise de Gardanne importe le minerai de Kobé (Guinée) depuis 1989 (voir [Historique](#)). Les 524 000 tonnes d'alumine produites en 2011 ne sont pas négligeable vis à vis de la production mondiale. D'autant plus que la totalité de la matière première ; c'est à dire environ 1,3 millions de tonnes de bauxite ; provient actuellement de l'importation.

Les résidus

La production d'alumine génère des déchets communément dénommés « boues rouges » dus à leur couleur fortement teintée. Les teneurs en hydroxydes et oxydes de fer sont élevés et expliquent la soutenance du rouge.

Les proportions de résidus produits dépendent largement du procédé d'extraction et de la composition de la bauxite originale. Le rapport de production résidus/alumine est par exemple de 0,63 pour l'usine de Gardanne avec le procédé actuel, alors qu'il est de 3 pour l'usine située en Hongrie. On peut estimer un

rapport moyen mondial de 1,5. Ainsi durant l'année 2012, la quantité de résidus produits est estimée à 130 millions de tonnes. La quantité totale stockée depuis le commencement de l'extraction d'alumine au XIX^{ème} siècle est quant à elle évaluée à 2,7 milliards de tonnes (Gräfe et al, 2011).

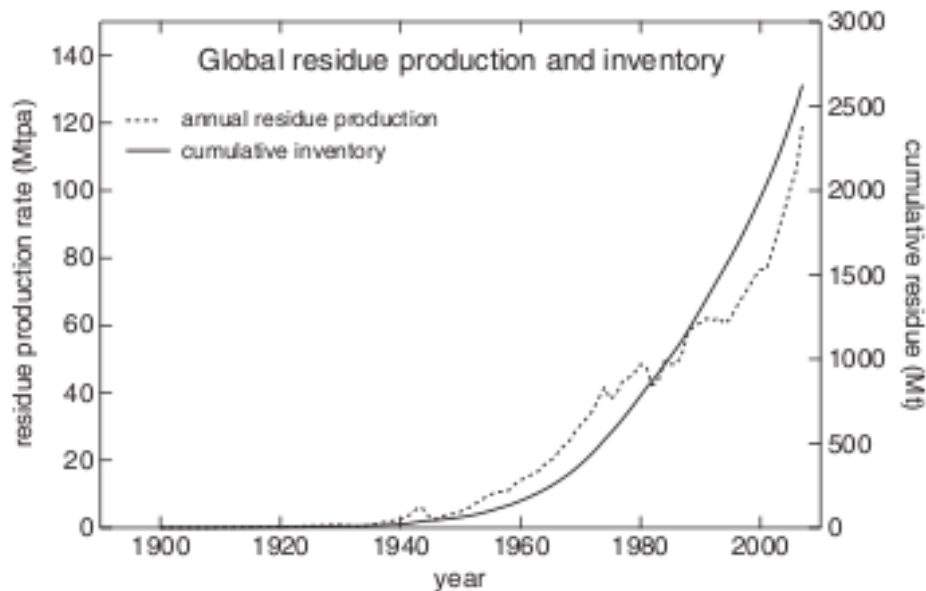


Figure 2 : Production annuelle mondiale de résidus de bauxite (Source: Gräfe et al, 2011)

Les quantités de résidus de bauxites sont considérables si bien que la gestion de ces déchets devient alors un problème succinct à la production d'alumine. Avant les années 1970, les deux principales modes de gestion des résidus étaient le lagunage et le rejet en mer, selon la localisation du site de production. En 1965 un tiers des industries rejetaient les boues rouges dans la mer, tandis que les deux tiers restants utilisaient le lagunage. Historiquement, les industries françaises et japonaises ont favorisé le largage en mer comme meilleure solution économique et aussi environnementale. D'un autre côté le nord américain pratique plus largement le lagunage même en cas de proximité de la mer.

Lors des années 1980, des voies de valorisations se sont développés, puisque la quantité de résidus produits atteignait déjà 1 milliard de tonnes (voir figure 1). Des procédures de séchage des résidus ont été mises en places. En 1985, 45 % des industries séchaient les boues ; la proportion atteignait 70 % en 2007. Le rejet en mer actuel représente 2 à 3 % de la production mondiale de résidus de bauxite. Ils sont localisés principalement au Japon, en France et en Grèce.