

2.1. LA BAUXITE

Environ 95% de l'alumine mondiale est produite grâce au procédé Bayer. Ce procédé permet l'extraction de l'alumine contenue dans la bauxite. Cette roche latéritique a été découverte en 1821 par le chimiste Pierre Berthier sur la commune des Baux-de-Provence en France. Elle sera ensuite baptisée "Bauxite" par Henry Sainte-Claire Deville en 1861 (Bouchardon, 2009). Le nom de bauxite fait aujourd'hui référence aux roches composées en grande partie d'oxyde d'aluminium.

La bauxite est une roche sédimentaire montrant une structure variée et contenant dans des proportions variables de l'hydrate d'alumine, de la kaolinite, de la silice et des oxydes de fer, ces derniers lui conférant sa coloration rouge. Il existe deux types d'hydroxydes d'aluminium dans la bauxite : les hydroxydes mono-hydratés tels que la diaspore et la bœhmite, et les hydroxydes tri-hydratés comme la gibbsite. Les oxydes tri-hydratés comme la gibbsite se trouvent généralement dans les régions au climat tropical et sont très économiques à traiter, tandis que les hydroxydes mono-hydratés contenus dans les bauxites européennes et chinoises requièrent des conditions de pression et de température plus élevées pour être traitées (Larouche, 2002). La Figure 2.2 extraite du site internet du producteur norvégien d'aluminium Hydro (hydro.com) montre une image du minerai brut de bauxite.



Figure 2.2 - Bauxite (Hydro.com, 2020)

La qualité de la bauxite est quantifiée selon la teneur en alumine. Une bauxite est dite de haute qualité lorsqu'elle contient 50 % d'alumine disponible. Une bauxite est de faible qualité si elle contient moins de 40 % d'alumine disponible et une haute teneur en matière organique. La gibbsite pure ($\text{Al}(\text{OH})_3$) contient 65,4 % d'alumine, alors que les bauxites contenant plus de 60 % d'alumine disponible sont considérées comme de très haute qualité, mais elles restent très rares (Hind et al., 1999).

2.2. LE PROCÉDÉ BAYER

Inventé en 1887 par l'autrichien Karl Joseph Bayer, le procédé Bayer, dont deux brevets furent déposés en 1888 et 1894 (Bayer, 1888, 1894), permet d'extraire l'alumine de la bauxite par dissolution du minerai par de la soude caustique (liqueur bayer). Ce procédé reste aujourd'hui le procédé d'extraction de l'alumine le plus économique dans la fabrication de l'aluminium. Les grandes étapes du procédé Bayer sont décrites ci-après. Ces étapes et les figures les illustrant sont extraites de *Ingénierie de l'Aluminium* par Larouche (2002).

2.2.1. Le broyage

Lors de cette première étape, le minerai est broyé puis tamisé. Les plus grosses particules sont exclues puis renvoyées dans le circuit de broyage jusqu'à qu'elles soient de tailles adéquates. La Figure 2.3 illustre le fonctionnement de l'étape de broyage. L'étape de broyage est une étape nécessaire au procédé car elle permet d'augmenter la surface de contact entre la bauxite et la liqueur, et par conséquent d'améliorer le rendement du processus de digestion. Si le broyage est trop grossier, il y aura une perte d'extraction d'alumine dans la bauxite ; alors que s'il est trop fin, il y aura plus d'énergie dépensée que nécessaire augmentant ainsi le coût du procédé.

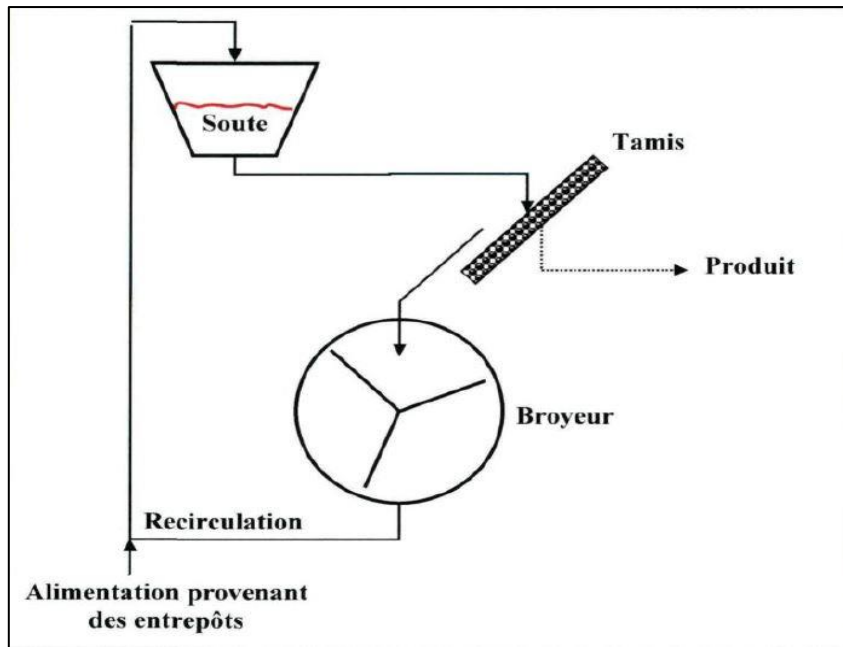


Figure 2.3 - Schéma de principe d'une unité de broyage (Larouche, 2002)

2.2.2. Le mélange

Après avoir été broyée, la bauxite est mélangée à de la chaux puis injectée dans une tour contenant de la liqueur usée provenant de l'étape de séparation solide-liquide. La Figure 2.4 illustre le processus de mélange. La chaux permet de précipiter le phosphate extrait de la bauxite et de limiter les risques de précipitation de l'oxyde d'aluminium lors de l'étape de séparation solide-liquide. De plus, la présence de phosphate dans l'alumine réduit l'efficacité du procédé d'électrolyse. Ce mélange produit une pulpe dont la fraction solide est de 50 % et dont la température atteint 85 °C.

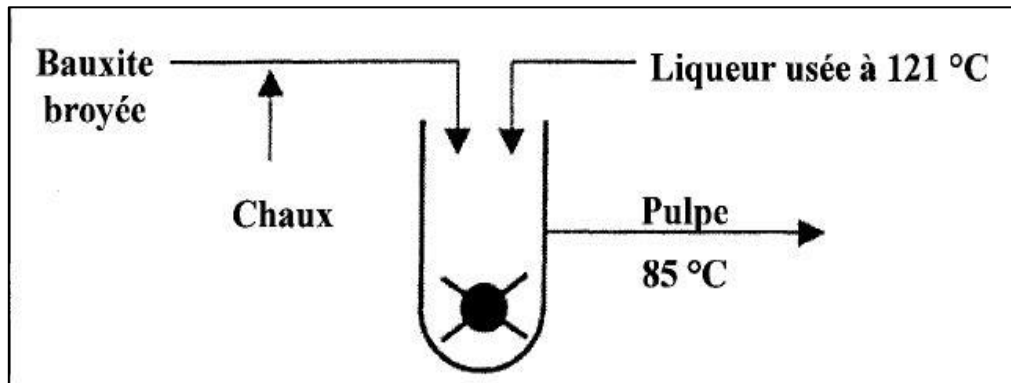


Figure 2.4 - Schéma du mélange de bauxite broyée, de chaux et de liqueur usée (Larouche, 2002)

2.2.3. La digestion

La digestion est une étape clé du procédé Bayer. Son but est de solubiliser l'hydrate d'alumine dans la solution de liqueur caustique (liqueur usée chaude). La pulpe (bauxite broyée, chaux et liqueur usée) est injectée dans les autoclaves à 85 °C. De la liqueur Bayer, usée et chauffée à 154 °C via un échangeur de chaleur, est injectée dans les autoclaves. L'alumine contenue dans la bauxite va être solubilisée à travers une série d'autoclaves sous des conditions spécifiques de pression (310 kPa) et de température (143 °C). Ces conditions peuvent varier selon la composition de la bauxite. Les autoclaves peuvent être verticaux ou horizontaux et permettent un temps de résidence suffisamment long afin de compléter la solubilisation de l'oxyde d'aluminium et la précipitation de la silice (dessilication). Le produit issu de la digestion est appelé *pulpe d'extraction*. La Figure 2.5 illustre l'étape de digestion.

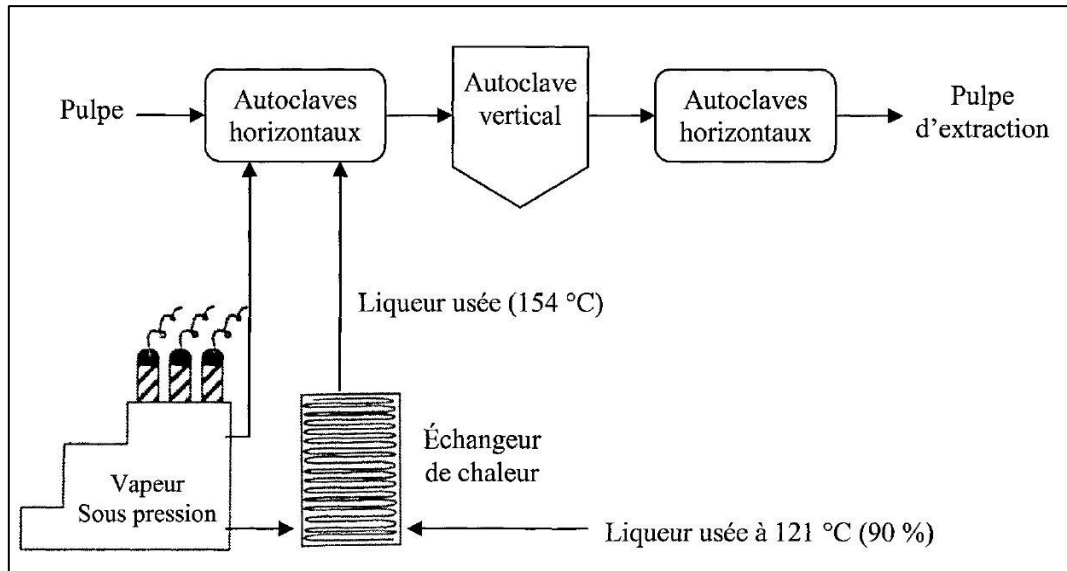
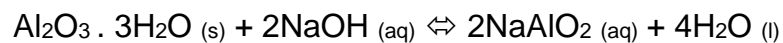


Figure 2.5 - Schéma de la digestion (Larouche, 2002)

Le procédé de digestion se caractérise par deux réactions chimiques distinctes. La première réaction chimique est la dissolution de l'oxyde d'aluminium sous la forme de tri-hydrate d'alumine contenue dans la bauxite par la liqueur Bayer :

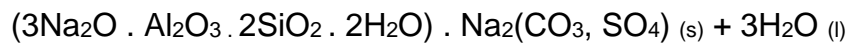
Tri-hydrate d'alumine + Caustique \Leftrightarrow Aluminate de sodium + Eau



Cette réaction est réversible et son équilibre dépend des conditions de pression et de température. L'augmentation de la température favorise le déplacement de l'équilibre vers la droite, permettant la dissolution de du tri-hydrate d'alumine. Au cours de cette étape, d'autres composés sont solubilisés, formant par la suite les impuretés issues du procédé Bayer.

La seconde réaction implique la dissolution de l'argile (silice) présente dans la bauxite sous forme de kaolinite puis une précipitation dans la liqueur pour former le produit de dessilication (sodalite):

Kaolinite + Caustique + Carbonate de sodium \leftrightarrow Sodalite (solide) + Eau



La silice (SiO_2) présente dans la bauxite et réagissant avec la caustique est appelée *silice réactive*. La sodalite formée au cours de la seconde réaction est rejetée dans la boue durant l'étape de séparation solide-liquide. Ainsi, une certaine quantité de caustique est perdue lors du procédé. Il est estimé que la conversion d'une tonne de silice engendre la perte d'une tonne de caustique. Les coûts de production varient donc avec la quantité de silice présente dans la bauxite. De plus, le taux de précipitation du silicate dirige le temps de digestion du procédé Bayer. Il peut y avoir contamination de l'alumine si la concentration de silicate dans la pulpe est trop élevée. Ce taux de dessilication dépend de la concentration initiale de silice dans la bauxite, la température de l'étape de digestion et la concentration en caustique de la liqueur Bayer. Aussi, la digestion de la bauxite entraîne d'autres réactions, telles que la dissolution de la gibbsite, la réversion de la boëhmite, la dissolution partielle des matières organiques et bien d'autres réactions.

2.2.4. La séparation solide-liquide

L'étape de séparation solide-liquide a pour but de clarifier la pulpe d'extraction par décantation. Il s'agit d'éliminer les particules solides en suspension dans la pulpe afin d'obtenir une phase liquide la plus claire possible en surverse et une phase solide avec une fraction solide élevée à la sousverse. Avant de procéder à la décantation, la pulpe d'extraction est injectée à travers trois détenteurs ou réservoirs de détente successifs afin de diminuer la pression de la pulpe à 140 kPa, 70 kPa puis 7 kPa. La détente produit une vapeur qui est utilisée pour réchauffer la liqueur usée. La Figure 2.6 illustre le procédé de séparation solide-liquide dans lequel la pulpe est dirigée vers les décanteurs où ses impuretés insolubles (Fe_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , etc.) sont retirées par floculation et décantation. Les impuretés sont recueillies sous forme de boue à la sousverse tandis que le surnageant contenant la solution de NaAlOH_4 est dirigé vers le réservoir d'alimentation des filtres (ALF).

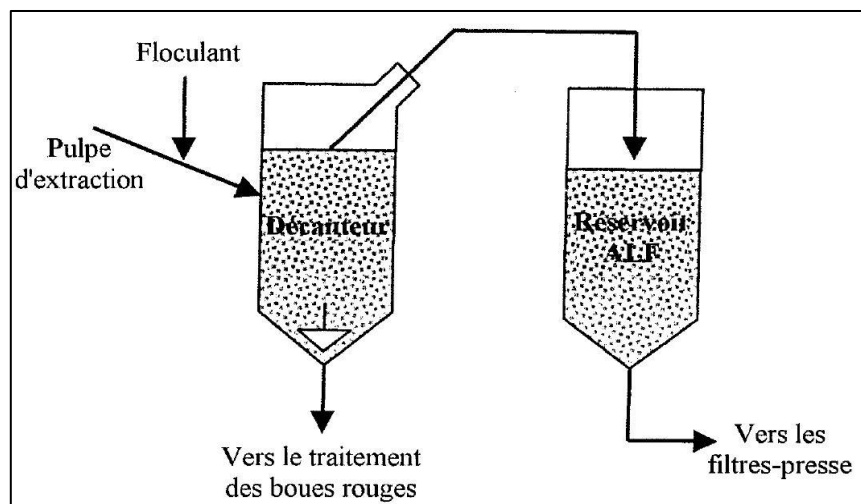


Figure 2.6 - Schéma de la séparation solide-liquide (Larouche, 2002)

Le procédé de décantation est influencé par plusieurs facteurs que sont la quantité de particules, la distribution granulométrique des particules (plus les particules sont fines et plus longue est la décantation), le niveau de turbulence dans le décanteur et la nature des particules (goethite, hématite, sodalite, boehmite, etc.). Afin d'aider la décantation, un flocculant est ajouté à la pulpe d'extraction. C'est un polymère synthétique qui va permettre l'agglomération des particules en suspensions en flocons, aussi appelés *flocs*. Ces flocons, plus volumineux et donc plus lourds, vont descendre plus rapidement vers la sousverse et accélérer le processus de décantation. Cependant, ces flocons sont très fragiles, s'ils subissent une contrainte de cisaillement au-delà d'une valeur critique, ils se brisent diminuant ainsi le rendement de la décantation.

2.2.5. Le lavage à contre-courant du résidu de bauxite

Le résidu de bauxite ou boue rouge est le résidu issu de la séparation solide-liquide et il contient des impuretés; sa composition dépend du type de bauxite traitée. Chaque année, c'est 150 millions de tonnes de résidu de bauxite qui sont produites par les raffineries d'alumine. Le résidu de bauxite est une substance nocive et potentiellement dangereuse avec un pH alcalin variant entre 10 et 13. Lors de cette étape, le résidu est lavé permettant de récupérer la soude caustique et l'alumine dissoute, en les retournant dans le procédé plutôt que les diriger vers le site de disposition avec les solides. Le lavage permet une réduction de l'alcalinité du résidu car la portion de liquide dans la boue est réduite et le liquide est de plus en plus dilué pendant le lavage réduisant d'avantage l'alcalinité du résidu. En outre, de plus en

plus d'usines à travers le monde, installent une étape de filtration sous pression de manière à réduire le contenu liquide de leurs résidus. D'une part cela économise de l'espace pour le stockage, et d'autre part cela réduit le coût de traitement des résidus sur le site. Également, cela évite de stocker une pulpe, ce qui peut mener à des catastrophes industrielles telle que l'accident de l'usine d'aluminium d'Ajka en Hongrie, en 2010.

2.2.6. La filtration de sécurité

Le surnageant provenant de l'étape de séparation solide-liquide est récupéré puis filtré afin de retirer les impuretés encore présentes, la filtration est présentée à la Figure 2.7. Dans les réservoirs ALF, du lait de chaux est ajouté à la surverse pour produire de l'aluminate de tricalcium (TCA) qui va agir comme un aide filtrant. La surverse est injectée dans des filtres-presses et subit une filtration sous une pression de 400 kPa. Les particules solides retenues sur le filtre servent de medium filtrant pour les plus petites particules de la suspension. Une fois le gâteau trop épais et dense ou que la pression dans le filtre devient trop élevée, le filtre est nettoyé. Le gâteau est alors récupéré puis dirigé vers le site de traitement des résidus de bauxite. En sortie de filtre, le filtrat (liqueur mère) contient généralement moins de 10 mg/L de solides à une température de 103-104 °C et est dirigé vers l'étape de précipitation.

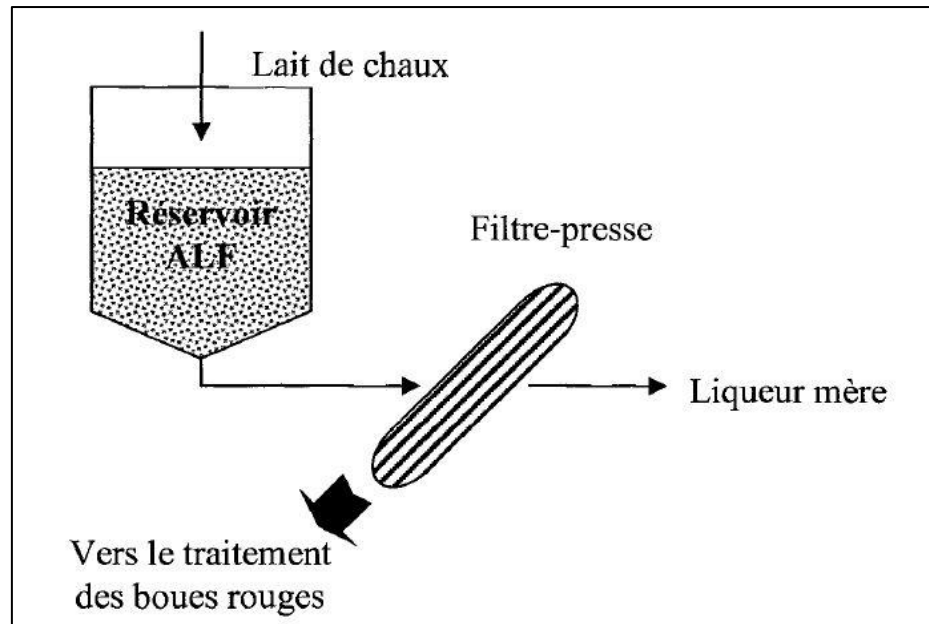


Figure 2.7 - Schéma de la filtration (Larouche, 2002)

2.2.7. La précipitation et la séparation de l'hydrate d'alumine

La liqueur mère issue de la filtration est refroidie à une température comprise entre 60 et 85 °C à travers un détenteur récupérant la vapeur pour réchauffer la liqueur usée se dirigeant vers les autoclaves. Une fois refroidie, la liqueur mère est déposée dans des réservoirs où la précipitation est amorcée par l'ajout de particules d'hydrate récupérées en aval et n'ayant pas la taille suffisante pour être classées comme produit et ainsi être dirigées vers la calcination. La Figure 2.8 illustre le procédé de précipitation.

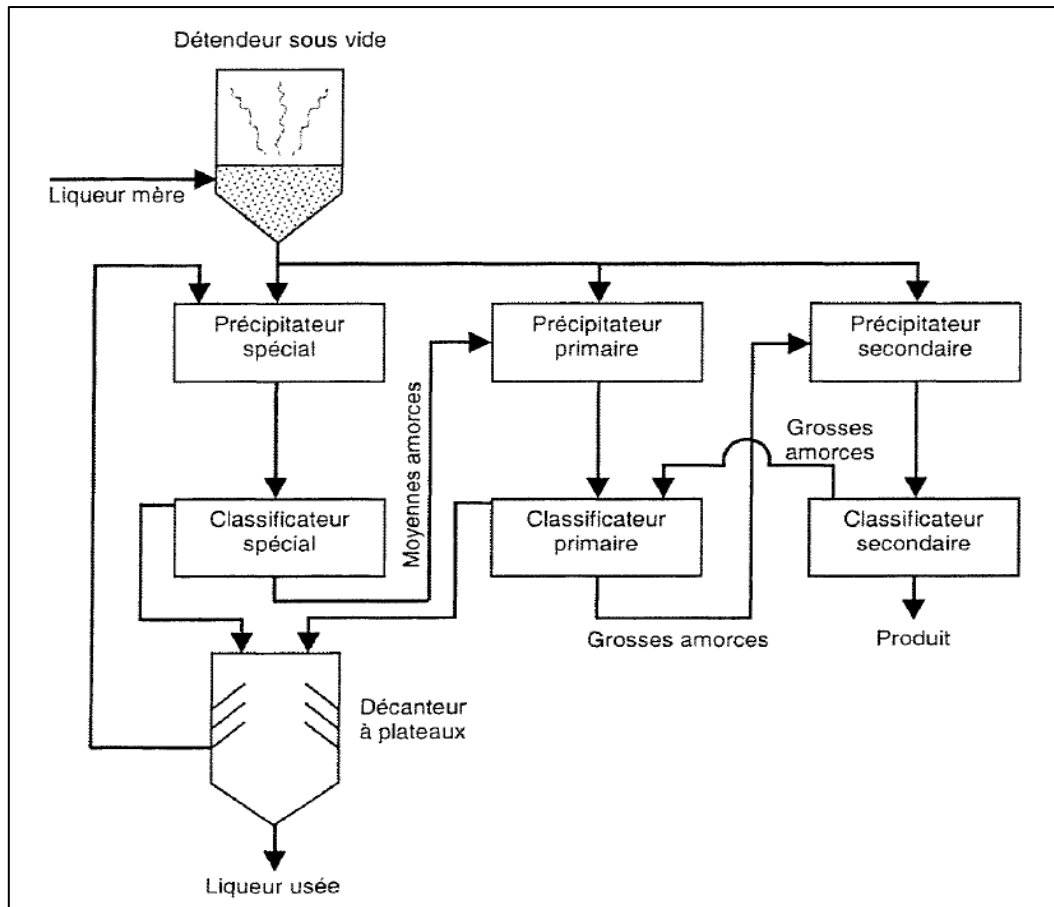


Figure 2.8 - Schéma de la précipitation (Larouche, 2002)

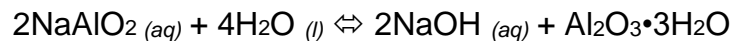
Il y a trois types de précipitateurs alimentant chacun un classificateur :

- Le *précipitateur spécial* reçoit les plus petites amorces provenant du décanteur à plateaux. La solution est dirigée vers le classificateur spécial, sa sousverse contient les amorces de tailles moyennes. La surverse contenant les amorces les plus fines est dirigée vers le décanteur à plateaux.
- Le *précipitateur primaire* reçoit la liqueur mère et les amorces moyennes provenant du classificateur spécial. La solution est dirigée vers le classificateur

primaire où la sousverse contient les grosses amorce. La surverse, qui contient les amorce plus petites, est dirigée vers le décanteur à plateaux.

- Le *précipitateur secondaire* reçoit la liqueur mère et les grosses amorce provenant du classificateur primaire. La solution est dirigée vers le classificateur primaire où la sousverse contient des particules d'hydrate suffisamment grosses pour être classées comme produit.

La réaction de précipitation du NaAlO_2 est obtenue par dilution et refroidissement de la liqueur mère. Les cristaux sont ensuite séparés de la soude caustique par sédimentation et filtration. La réaction de précipitation s'écrit de la façon suivante :



Lors de la précipitation, la solution est agitée afin d'uniformiser les sites de germination dans le liquide. La réaction de précipitation peut être très rapide mais nécessite un certain temps de résidence, afin de maximiser la production en fonction d'un optimum qui prend en compte les températures, le coût d'installation et d'entretien des réservoirs de précipitation, la disponibilité desdits réservoirs (vs leur nettoyage), le contrôle de la granulométrie, etc. Ce temps de résidence dure en moyenne 24 heures. Le décanteur à plateaux est un réservoir à longues durées de résidence pour permettre la séparation des particules d'hydrate les plus fines. La durée de décantation des particules submicroniques pouvant prendre plusieurs jours, l'utilisation de plateaux successifs permet de réduire les distances inter-particulaires et le temps de décantation. La surverse des plateaux est la liqueur usée

qui est alors recyclée pour l'étape de digestion après avoir été réchauffée dans diverses étapes d'échange de chaleur.

2.2.8. La calcination et le traitement du produit

Lorsque les cristaux d'hydrate d'alumine sont formés après la précipitation, il reste une série de six étapes supplémentaires afin d'obtenir le produit final :

- **Lavage de l'hydrate** : Diminuer la concentration de la soude caustique contenant l'hydrate d'alumine;
- **Décantation** : Récupération de l'hydrate solide;
- **Lavage de l'hydrate sur filtre** : Élimination totale de la soude caustique restante;
- **Séchage de l'hydrate** : Élimination de l'eau libre dans des fours à 150 °C et séparation des gaz du solide par des cyclones;
- **Calcination de l'hydrate** : Élimination de l'eau liée à l'hydrate dans un four rotatif entre 1000 et 1200 °C;



- **Refroidissement de l'alumine** : Refroidissement dans des lits fluidisés puis transport dans les silos d'entreposage.

L'oxyde d'aluminium obtenu est une poudre blanche appelée *alumine calcinée* dont la distribution granulométrique varie entre 20 et 200 µm.

2.3. LE RÉSIDU DE BAUXITE

Le résidu de bauxite, aussi appelé *boue rouge*, est le résidu principal du procédé Bayer produit lors de l'étape de séparation solide-liquide de la pulpe d'extraction issue de la digestion. Étant donné ses propriétés physico-chimiques et les larges quantités produites, le résidu de bauxite est devenu un enjeu capital pour l'industrie de l'aluminium. Cette section présente une caractérisation du résidu de bauxite et les méthodes de disposition de ce résidu.

2.3.1. Caractérisation du résidu de bauxite

2.3.1.1. Composition chimique

Le résidu de bauxite est principalement composé d'oxydes de fer, de titane, de silice et d'aluminium non-dissouts. Les oxydes de fer sont responsables de la couleur rouge brique des résidus (Hind et al., 1999). On retrouve aussi en plus petites quantités d'autres oxydes comme les oxydes de cuivre, chrome, zinc, plomb, manganèse, vanadium, gallium, scandium et d'autres éléments de terres rares dépendamment du type de bauxite traitée et des conditions d'extraction. La composition chimique du résidu de bauxite peut varier ainsi que les quantités produites. En effet, plus la qualité de la bauxite est élevée, et moins il y aura de résidu généré par tonne d'alumine produite. En plus des oxydes métalliques, on retrouve des matières organiques issues de végétaux décomposés et de la matière organique du sol. Parmi ces matières organiques, il y a des acides polybasiques, polyhydroxyacides, des acides humiques, fulviques, des alcools, phénols et autres

hydrates de carbone. La teneur en matières organiques a aussi un impact sur le rendement du procédé Bayer. Hind et al. (1999) prennent exemple de la bauxite australienne qui a une haute teneur en matières organiques (0,15-0,3 %p/p). Des molécules de matières organiques peuvent être solubilisée par la liqueur Bayer puis précipitées avec l'hydrate d'alumine et ne pas être évacuées lors de la séparation solide-liquide; il y a alors contamination de l'alumine.

Enfin, le résidu de bauxite contient aussi de la chaux (CaO) ajoutée lors de l'étape de mélange puis de la soude résiduelle (NaOH) qui n'aurait pas été récupérée lors de la séparation solide-liquide et du lavage à contre-courant. Ce sont les deux seuls composants qui ne sont pas originaires de la bauxite et qui subsistent dans le résidu de bauxite. On retrouve le sodium dans la sodalite produite lors de la dessilicatation. La présence de sodium rend difficile certaines applications dans le domaine de réutilisation des résidus de bauxite, comme en cimenteries par exemple (WorldAluminium, 2020).

Le Tableau 2.1 présente la composition chimique typique du résidu de bauxite et le Tableau 2.2 présente sa composition minéralogique typique (Evans, 2015).

Tableau 2.1 - Composition chimique du résidu de bauxite

Composés	Quantité (%p/p)
Fe₂O₃	5-60
Al₂O₃	5-30
TiO₂	0,3-15
CaO	2-14
SiO₂	3-15
Na₂O	1-10

Tableau 2.2 - Composition minéralogique du résidu de bauxite

Composés	Quantité (%p/p)
Sodalite (3Na₂O.3Al₂O₃.6SiO₃.Na₂SO₄)	4-40
Goethite (FeOOH)	10-30
Hematite (Fe₂O₃)	10-30
Magnetite (Fe₃O₄)	0-8
Silice (SiO₂) cristalline et amorphe	3-20
Aluminate de calcium (3CaO.Al₂O₃.6H₂O)	2-20
Boehmite (AlOOH)	0-20
Dioxyde de titane (TiO₂) anatase et rutile	2-15
Muscovite (K₂O.3Al₂O₃. 6SiO₂.2H₂O)	0-15
Calcite (CaCO₃)	2-20
Kaolinite (Al₂O₃. 2SiO₂.2H₂O)	0-5
Gibbsite (Al(OH)₃)	0-5
Perovskite (CaTiO₃)	0-12
Cancrinite (Na₆[Al₆Si₆O₂₄].2CaCO₃)	0-5
Diaspore (AlOOH)	0-5

2.3.1.2. Alcalinité du résidu de bauxite

Comme décrit à la section le lavage à contre-courant des résidus de bauxite permet de récupérer une partie de la soude caustique, mais comme il n'est pas parfait il en subsiste une certaine quantité, d'où l'alcalinité du résidu final. Même avec une concentration diminuée d'un facteur 10 par rapport à la liqueur mère, la résidu reste fortement alcalin (Power et al., 2011). Le pH de la soude restante dans le résidu de bauxite se situe entre 9,2 et 12,8 avec une valeur moyenne de $11,3 \pm 1$. Ce sont les ions tels que $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-/\text{Al}(\text{OH})_3$ et OH^- qui sont responsables de l'augmentation du pH du résidu de bauxite (Gräfe et al., 2011).

Avant de disposer le résidu dans les sites de disposition, il faut procéder à une neutralisation partielle ou complète afin de diminuer le pH du résidu. La neutralisation peut s'effectuer par l'utilisation d'acides (généralement acide sulfurique ou de l'acide chlorhydrique), du dioxyde de carbone, du dioxyde de soufre, de l'eau ou du saumure concentrée (solution aqueuse de sel). La neutralisation partielle ou complète permet de réduire le risque environnemental du résidu et permet de favoriser la re-végétalisation du terrain lors de la restauration. Par exemple, l'eau de mer permet de diminuer efficacement le pH du résidu entre 8 et 8,5. Elle abaisse aussi la concentration d'anions hydroxyle et aluminate entraînant la formation de composés de calcium et de magnésium tels que la calcite, l'aragonite, la brucite, les hydrotalcites, l'aluminohydrocalcite, l'hydrocalumite et la pyroaurite. L'ajout de composés de calcium, de magnésium et de potassium avec un pH plus bas aide la re-végétalisation (EuropeanAluminium, 2015).

2.3.1.3. La radioactivité

La bauxite contient de très faibles niveaux de matières radioactives naturelles en raison de la présence d'uranium (^{238}U) et de thorium (^{232}Th). Ces niveaux sont de l'ordre du mg/kg. Pendant le procédé Bayer, la majeure partie de l'uranium et du thorium reste dans le résidu non dissous. La concentration des espèces radioactives est donc proportionnellement plus élevée dans le résidu de bauxite que dans le minerai initial; on parle parfois de matières radioactives d'origine naturelle technologiquement améliorées. Dans le minerai de bauxite, les concentrations de ^{238}U varient généralement entre 0,03 et 0,6 Bq/g et entre 0,03 et 0,76 Bq/g pour le ^{232}Th . Elles se situent respectivement entre 0,08 et 0,66 Bq/g et entre 0,07 et 1,8 Bq/g dans le résidu de bauxite. La radioactivité est un aspect des résidus de bauxite qui inquiète souvent les gens lorsque l'on considère des applications dans le cadre de réutilisation du résidu de bauxite. Par ailleurs, tous les résidus ne sont pas égaux en la matière. Ces niveaux de radioactivité ne dépassent pas la valeur de 1 mSv/an, norme d'exposition prescrite pour la population civile (EuropeanAluminium, 2015).

2.3.1.4. La granulométrie et la densité du résidu

La distribution granulométrique du résidu de bauxite est fine. Les particules peuvent atteindre une taille de 1 mm pour les plus grosses et quelques microns pour les plus fines. La finesse de cette granulométrie classe le résidu de bauxite dans les argiles et sables fins. La taille moyenne des particules du résidu de bauxite se situe entre 2 et 100 μm avec une distribution de taille entre 0,1 et 200 μm (Gräfe et al., 2011). Généralement, environ 80 % des particules ont une taille inférieure à 100 μm (Ujaczki et al., 2018).

La masse volumique moyenne du résidu de bauxite est de $2,5 \pm 0,7 \text{ g/cm}^3$ (Gräfe et al., 2011). Avec une fraction solide de 50 %, la masse volumique du résidu de bauxite utilisé dans ce projet est de $2,12 \text{ g/cm}^3$.

2.3.2. La disposition du résidu de bauxite

Malgré plus de 1 200 brevets et des centaines d'essais expérimentaux réussis, moins de 4 millions de tonnes de résidu de bauxite ont été valorisées de manière productive parmi les 150 millions de tonnes produites annuellement dans le monde (Evans, 2016). Les propriétés physico-chimiques (granulométrie, pH, composition chimique et minéralogique) du résidu de bauxite rendent difficile la réalisation d'une méthode de valorisation efficace et productive (Borra et al., 2016; Liu et al., 2009). Actuellement, le résidu de bauxite est entreposé dans des sites de disposition. Les méthodes d'entreposages sont différentes selon la localisation de la raffinerie, le climat ou encore les réglementations du pays. On décompte quatre méthodes de

disposition du résidu de bauxite à travers le monde : la décharge en mer, le lagunage, l'empilement sec et la disposition sèche (EuropeanAluminium, 2015; Evans, 2015, 2016).

2.3.2.1. La décharge en mer

La décharge en mer a été pratiquée entre les années 40 et 60. De nombreuses alumineries européennes (France, Grèce, Royaume-Unis) et en Asie (Japon) ont adopté ce type de disposition. Construites proche de la mer, de rivières ou d'estuaires, ces usines rejetaient les résidus grâce à des pipelines à partir de la côte ou dans des fosses océaniques. L'eau de mer permet de neutraliser le résidu de bauxite, notamment son alcalinité, limitant l'impact sur l'environnement aquatique. Les rejets de résidus dans les rivières ne sont plus pratiqués par aucune usine depuis les années 70 (EuropeanAluminium, 2015) et la disposition en mer a cessé à la fin de l'année 2015 (Evans, 2016).

2.3.2.2. Le lagunage

Au début des années 80, une majorité des résidus de bauxite était disposé dans des réservoirs de type lagunes; cette pratique est toujours réalisée dans quelques installations. Avec cette méthode, le résidu de bauxite est pompé à une fraction solide comprise entre 15 et 30 % (le plus souvent 18-22 % (EuropeanAluminium, 2015)) dans des zones de stockage délimitées par des digues pour un confinement sécuritaire. Dans les sites construits au cours des 40 dernières

années, les zones de stockage ont normalement été scellées pour minimiser les fuites vers le sol et les eaux souterraines sous-jacentes. L'étanchéité des lagunes était assurée par des argiles compactées ou imperméables et/ou par l'utilisation de plastiques et autres matériaux membranaires. La superficie de ces zones de stockage était souvent dictée par le type de résidus de bauxite et différait pour les résidus argileux par rapport aux résidus plus sableux.

La liqueur surnageante est normalement retournée à l'usine pour être réutilisée, réduisant le coût d'utilisation de la soude caustique et évitant de contaminer l'environnement. Divers systèmes de drainage et de collecte des fuites ont été intégrés dans la conception et la construction des installations. Si le résidu n'est pas neutralisé avant la décharge dans la lagune, alors cette lagune est remplie d'un résidu hautement alcalin, peu compacté et recouvert par un lac de liquide alcalin, dont le pH reste très élevé même après plusieurs années d'inactivité.

2.3.2.3. L'empilement à sec (Dry Stacking)

Depuis les années 80, la méthode d'empilement à sec (*dry stacking*) est devenue la méthode la plus utilisée par les usines. En effet, elle permet de réduire les risques potentiels de fuite de liqueur caustique dans l'environnement, de diminuer la surface requise pour la disposition et de maximiser la récupération de la liqueur. De plus, l'amélioration des méthodes d'épaississement, de lavage des résidus avant le stockage et de la récupération de l'eau décantée pendant le

stockage permettent d'augmenter la récupération de la soude et de minimiser le potentiel de fuite vers l'environnement.

Le résidu de bauxite peut être épaissi en une suspension à haute densité (48-55 % de solides ou plus) par des technologies avancées d'épaississement et de floculation dans la raffinerie. Lorsque le résidu est stocké sous forme de dépôt empilable, l'eau de pluie aura tendance à s'écouler, minimisant ainsi le liquide stocké dans la zone d'élimination. L'eau récupérée de la surface est pompée vers l'usine pour récupérer les sels de sodium solubles. Les zones de résidus empilés sont souvent "sous-drainées" pour améliorer la stabilité de l'empilement des résidus et récupérer davantage d'eau pour la réutilisation dans la raffinerie.

Une réduction considérable de l'eau peut être obtenue en "travaillant" les résidus (*mud farming*) comme illustré à la Figure 2.9. La réduction de la présence d'eau dans les couches superficielles peut être améliorée en traversant le site avec des véhicules équipés de très gros rouleaux (amphiroles) qui "extraient" l'eau des couches superficielles de boues. Les tranchées sont ensuite régulièrement recreusées au fur et à mesure que l'eau s'écoule et que le résidu se consolide. Il peut être déplacé vers un autre emplacement pour le stockage. La fraction solide de ce résidu est d'environ de 60 à 65 %. Le *mud farming* permet aussi de favoriser la carbonatation et ainsi réduire le pH des boues.



Figure 2.9 - Amphirole utilisé pour le mud farming ©Yoann Robert

2.3.2.4. La disposition sèche (Dry Disposal)

Dans la méthode de disposition à sec, le résidu de bauxite est filtré en un gâteau sec (fraction solide supérieure à 65 %). Grâce au processus de filtration de l'eau ou de la vapeur; l'alcalinité du résidu est minimisée et la soude est récupérée. Les filtres à plaques et à cadres sont utilisés depuis les années 1930 tandis que les filtres à vide rotatifs sont utilisés depuis les années 1960. Sans traitement supplémentaire, le résidu sec est transporté par camion ou convoyeur jusqu'au site de disposition, où il est déposé en couches à un angle d'environ 5°. Les améliorations de l'équipement, en particulier la filtration sous pression, ont conduit à des résidus avec une plus forte fraction solide (plus de 70 % à Gardanne en France et Distomon en Grèce) qui sont plus faciles à manipuler. Certains essais ont également été entrepris avec une filtration à vapeur hyperbare (Hi-Bar). Ces équipements basés sur le principe amélioré des filtres à disques et utilisant une

différence de pression allant jusqu'à 6 bars et ont été utilisés avec succès pour les boues de charbon fines (EuropeanAluminium, 2015). Des études à Alunorte (Brésil) indiquent que par rapport à la méthode d'empilement à sec, la disposition sèche augmenterait la fraction solide du résidu de bauxite de 64 % à 80 %, une réduction de la quantité globale de résidu de 20 % en poids, et une réduction du contenu en liquide du résidu de 44 % (Castro et al., 2012).

Lorsque possible, l'eau de ruissellement du site de disposition est retournée dans l'usine. Par contre, pour diverses raisons elle doit parfois être rejetée dans l'environnement, elle est alors envoyée à une station d'épuration où elle est neutralisée avant d'être rejetée dans l'environnement. Cette méthode réduit la taille de la zone de stockage mais nécessite l'installation et le fonctionnement d'une usine de filtration.