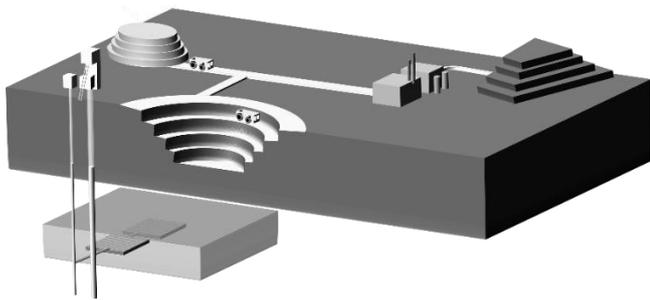


**FILIÈRE CHARBON**

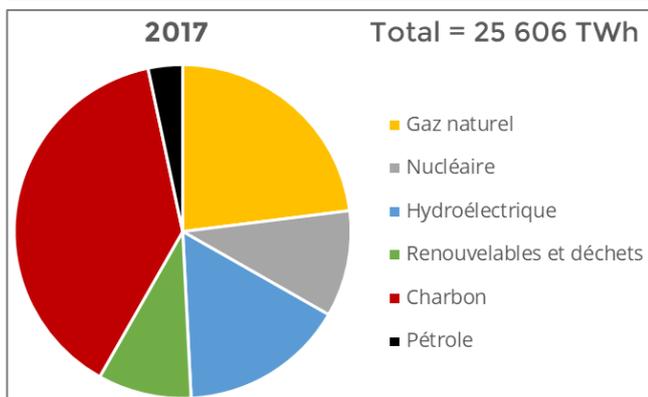
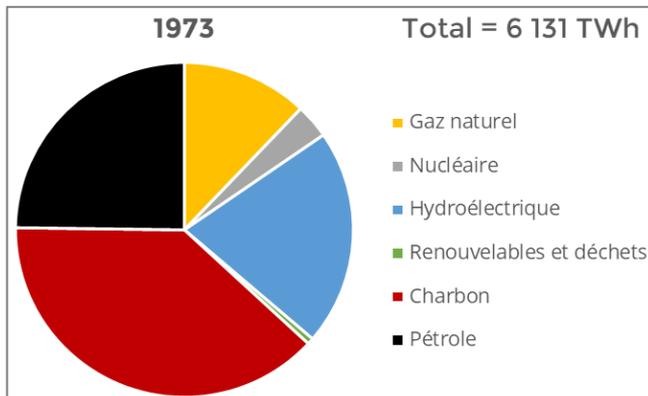


La quantité de charbon extraite mondialement en 2015 était estimée à 7,7 milliards de tonnes, le producteur principal étant la Chine (avec 3,5 milliards de tonnes). En 2017, le charbon permettait de produire **38,5 % de l'électricité mondiale**. Le graphique ci-dessous indique la part de chaque type d'énergie dans la production électrique mondiale en 1973 et en 2017. En près de 50 ans, bien que la quantité totale d'électricité produite ait été multipliée par 4, la part du charbon n'a pas diminué (de 38,3 % en 1973 à 38,5 % en 2017).

Dans cet outil, on considère une **mine de charbon « moyenne »**, typique de celles que l'on peut trouver en Europe. En 2014, 80 % de l'énergie électrique y était fournie par ce combustible. On s'intéresse à l'exemple de la Pologne. En 2014, la production annuelle de charbon de ce pays était de 70 millions de tonnes, fournies par 31 mines. On fait donc ici l'hypothèse que **la mine « moyenne » produit 2,26 millions de tonnes de charbon par an**. À titre d'illustration, la mine de Turów en Pologne (voir ci-dessous) produit 27,7 millions de tonnes de charbon par an.



Le produit fini de la mine étudiée ici est un **charbon traité, c'est-à-dire lavé et duquel on a retiré les impuretés**.



Le tableau suivant présente la quantité totale d'intrants et d'extrants de cette mine « moyenne » pendant une année de fonctionnement, en nombre d'unités équivalentes (nombre de cubes).

Eau	1
Électricité	20
Énergies fossiles	6
Gaz à effet de serre	677
Déchets miniers	37

Création : SystExt, Mai 2020. Données tirées de : Key world energy statistics, IEA (2019). [Lien](#).

Sur le plan industriel, le charbon sert principalement à la fabrication de l'acier.

## ÉTAPE 1 : EXPLOITATION

Comme pour toute production de matières premières minérales, la première étape consiste à récupérer les couches contenant le charbon valorisable (que l'on appelle le « minerai »), emprisonnées dans la roche en profondeur. Pour cela, on décape les premières dizaines de mètres de sols et roches, appelées « morts-terrains ». Puis, lorsque l'on arrive à la roche dure, on décape les premières dizaines à centaines de mètres qui sont « stériles », c'est-à-dire qui ne contiennent pas (ou trop peu) de charbon. Les stériles correspondent à 43 % de la quantité totale de déchets miniers générés par le site. Pour briser et arracher la roche, on utilise des explosifs ou des machines (haveuses ou excavatrices à godets comme ci-dessous).



Le minerai est quant à lui transporté jusqu'à l'usine de traitement ; le plus souvent, par des tapis roulants appelés « convoyeurs ». L'extraction des couches de charbon, ainsi que le transport du minerai jusqu'à l'usine représentent 65 % de l'électricité utilisée sur l'ensemble du site. Cela comprend l'électricité utilisée pour la ventilation des galeries souterraines (voir explications ci-après), le chauffage, l'air comprimé, ou encore les équipements mécaniques.

Le méthane (CH<sub>4</sub>) est un gaz qui se crée lors de la formation du charbon. Les activités d'exploitation entraînent donc son dégagement. Or, le méthane est un puissant gaz à effet de serre, avec un pouvoir de réchauffement global 25 fois plus élevé que le dioxyde de carbone. On estime que le méthane contribue pour 18 % au réchauffement climatique lié aux activités humaines (la part du CO<sub>2</sub> est, quant à elle, estimée à 50 %).

Le méthane s'avère être très explosif et doit être évacué durant l'extraction du charbon pour assurer la sécurité des travailleurs. Dans les mines souterraines en activité, des systèmes d'aération font circuler d'importantes quantités d'air à travers la mine pour rejeter le méthane dans l'atmosphère. Dans certains gisements de charbon non exploités, on peut récupérer le méthane, on l'appelle « gaz de charbon (CBM) ». Parallèlement, on appelle « gaz de mine (CMM) » le méthane nocif et inutilisé qui se dégage des gisements de charbon pendant et après leur exploitation.

Ces émanations massives de méthane, en particulier dans le cas des mines à ciel ouvert, sont à l'origine de la très grande majorité des émissions de gaz à effet de serre sur le site minier (94,4 %), le reste étant associé aux usages d'énergies fossiles au moment de l'étape du traitement.

## ÉTAPE 2 : TRAITEMENT

Arrivé à l'usine de traitement, le minerai doit subir plusieurs transformations avant d'obtenir le charbon final. En effet, il contient encore de la roche stérile. Il faut tout d'abord le concasser et le broyer pour obtenir de fines particules.



S'ensuivent des opérations de tri et de lavage. Le lavage met à profit la différence de densité entre le charbon et les particules de roche stérile. Le minerai est plongé dans un liquide de densité intermédiaire, appelé « liqueur dense ». Les particules stériles tombent au fond des cuves et les particules de charbon flottent. Ces dernières sont ensuite rincées pour retirer les restes de liqueur dense.

On obtient ainsi du charbon pur et une autre phase, appauvrie en cette substance (les « résidus ») qui sont transportés hors de l'usine et sont stockés pour former d'immenses montagnes de déchets (voir ci-dessous). Ces résidus représentent 57 % de la quantité totale de déchets miniers générés par le site.



Cette étape de traitement demande de grandes quantités d'eau et d'électricité afin d'assurer une alimentation en continue des machines (24h/24, 365 jours par an). Elle correspond à 35 % de l'énergie électrique consommée sur l'ensemble du site minier. L'eau, indispensable pour le tri et le lavage du minerai, est considérée comme étant utilisée dans son intégralité à cette étape de la production.

Ainsi traité, le charbon peut être vendu et alimenter des centrales thermiques. Les énergies fossiles (diesel, fuel, etc.) sont utilisées principalement pour le transport du personnel et les équipements ; on répartira cet intrant à parts égales entre l'étape d'exploitation et celle de traitement.

Le schéma ci-dessous présente les intrants et extrants d'une mine de charbon.

#### BIBLIOGRAPHIE

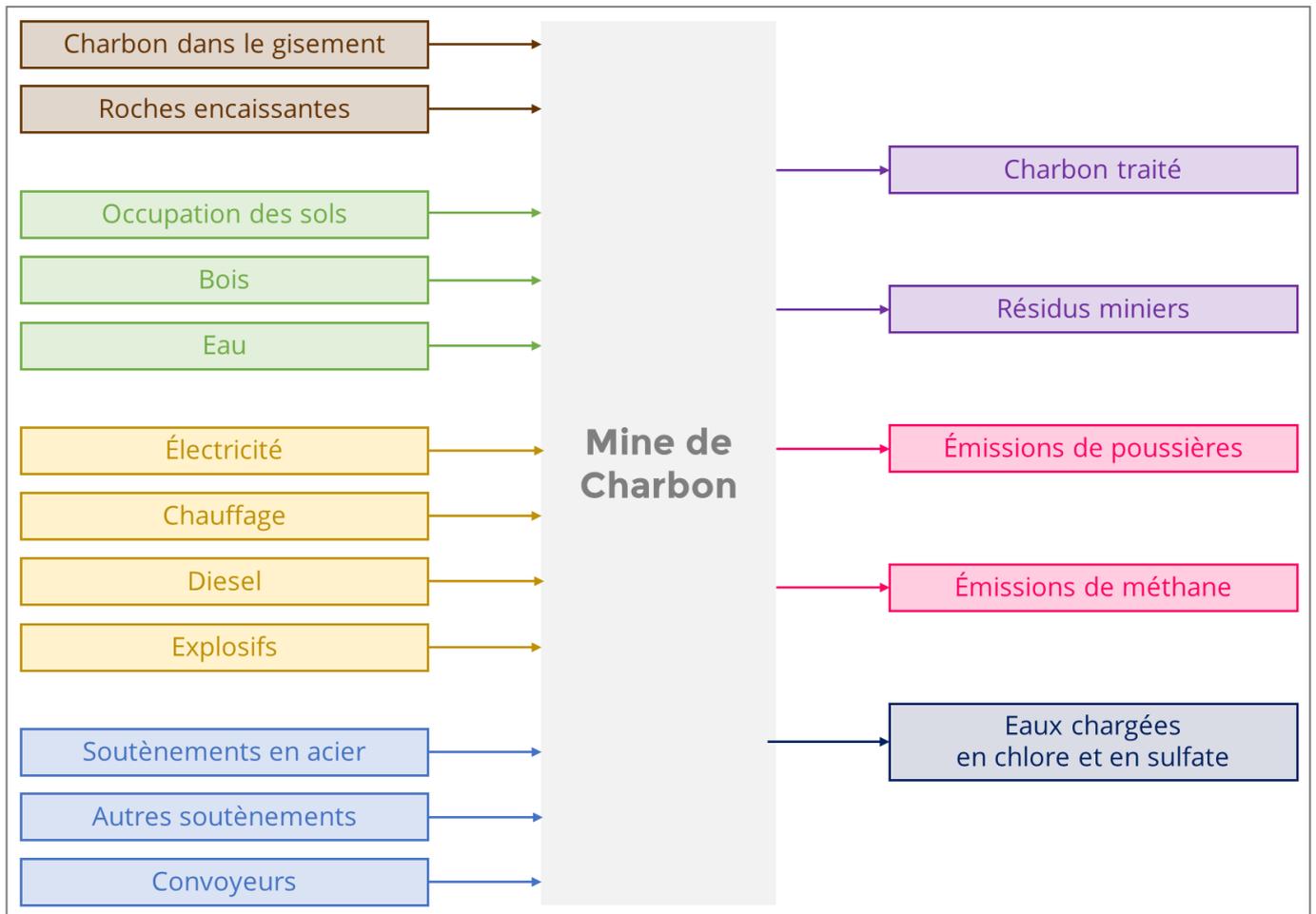
Model of environmental life cycle assessment for coal mining operations | Burchart-Korol et al., Science of the Total Environment (2016)

Statistical Review of World Energy | Site internet de BP (2015), consulté le 07/05/2020. [Lien](#).

Quels sont les gaz à effet de serre ? | Site internet de Jean-Marc Jancovici, mis à jour le 1er août 2007, consulté le 07/05/2020.

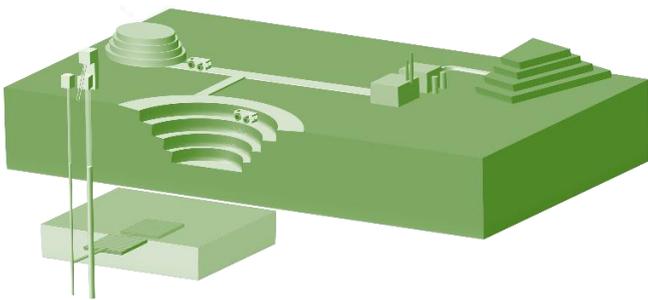
Western Macedonia Lignite Centre : le charbon à tout prix | SystExt (19/03/2020). [Lien](#).

On le surnomme la "vallée des larmes", le bassin charbonnier de Jiu | SystExt (04/10/2016). [Lien](#).



Intrants et extrants d'une mine de charbon ; modifié et traduit d'après (Burchart-Korol, et al., 2016)

FILIÈRE PHOSPHATE



Dans cet outil, on considère une mine de phosphate « moyenne ». En 2018, la production mondiale de phosphate s'élevait à 270 millions de tonnes (contre 223 millions de tonnes en 2015). Les États-Unis (3<sup>ème</sup> producteur mondial après la Chine et le Maroc), en produisaient à eux seuls 10 %, soit 27 millions de tonnes. En considérant le nombre de mines de phosphate en exploitation aux États-Unis en 2018 (10), on fait donc ici l'hypothèse que la mine « moyenne » produit 2,7 millions de tonnes de phosphate par an. À titre d'illustration, la mine togolaise ci-dessous produit 1,2 million de tonnes par an.

On ne prend en compte ici que trois étapes : l'exploitation (mine), la concentration du minerai phosphaté et enfin son transport jusqu'à l'usine de fabrication de SPP. Le produit fini de cette mine est donc un concentré de phosphates, prêt à être utilisé dans les usines de transformation.



Mine de phosphate abandonnée sur l'île de Nauru, Océanie (Department of Foreign Affairs and Trade, Australia · 2007 · cc by)

Le tableau suivant présente la quantité totale d'intrants et d'extrants de cette mine pendant une année de fonctionnement, en nombre d'unités équivalentes (nombre de cubes).



L'une des deux principales mines de la Société Nouvelle de Phosphate du Togo (Alexandra Pugachevsky · 2007 · cc by-sa 3.0)

Eau	42
Électricité	52
Énergies fossiles	25
Gaz à effet de serre	70
Déchets miniers	544

85 % de la filière phosphate alimente le secteur de l'agriculture industrielle, notamment pour la fabrication d'engrais. En 2015, la production de phosphate était principalement destinée à la fabrication de 44 millions de tonnes d'acide phosphorique, indispensable à la fabrication des engrais et en particulier des superphosphates simples (SPP) et des superphosphates triples (TSP) (voir la description de la filière des engrais phosphatés ci-après).

ÉTAPE 1 : EXPLOITATION

Comme pour toute production de matières premières minérales, la première étape consiste à récupérer les couches de roches qui contiennent le phosphate. L'exploitation de phosphate se fait le plus souvent à ciel ouvert. Pour cela, on décape les premières dizaines de mètres de sols et de roches, appelées « morts-terrains ». Puis, lorsque l'on arrive à la roche dure, l'exploitation se fait banc après banc. Les matériaux rocheux sont extraits à l'aide de pelles mécaniques et des explosifs sont parfois utilisés pour briser les roches les plus dures. Au fur et à mesure de l'avancement, les roches stériles sont transportées hors des chantiers d'exploitation (quantité de déchets que l'on négligera à cette étape), tandis que le minerai est transporté à l'usine de traitement.

Des proportions mineures d'eau et d'électricité sont requises pour le fonctionnement des équipements et les opérations de maintenance sur le site d'exploitation, soit 10 % de l'électricité totale et 7 % de la quantité totale d'eau.



Exploitation par dragline - Mine de phosphate de Benguéir, Maroc (SystExt · 2019 · cc by-sa-nc 3.0 fr)



Zone de stockage intermédiaire du minerai - Mine de phosphate de Benguéir, Maroc (SystExt · 2019 · cc by-sa-nc 3.0 fr)

Prenons l'exemple de la mine de Benguéir (Maroc) visitée par SystExt en 2019<sup>1</sup> (voir ci-dessus). Le phosphate extrait se présente sous la forme d'un sable phosphaté plus ou moins friable, présent dans plusieurs couches séparées par des interbanco « stériles » (banc entre deux couches de phosphate). La technique d'extraction suivante est mise en œuvre : la couche de recouvrement dure est dynamitée (environ 20 tonnes d'explosifs sont utilisées par jour) puis décapée à l'aide de draglines ou de bulldozers. La première couche de phosphate friable qui apparaît alors, est extraite à l'aide de chargeuses puis transportée jusqu'à l'unité de traitement par camion (d'une capacité de 190 tonnes).

<sup>1</sup> Il existe deux types de gisements de phosphate : le type sédimentaire, et le type magmatique. L'exemple de Benguéir correspond au type sédimentaire, qui compte pour 88 % de la production mondiale de phosphate. Les données utilisées pour

On passe ensuite au premier interbanc stérile qui est également dynamité et décapé, et le même principe d'extraction est répété pour les autres couches de phosphate et les autres couches stériles.

## ÉTAPE 2 : TRAITEMENT

### Concentration

Arrivé à l'usine de traitement, le minerai doit être transformé car il ne contient pas uniquement du phosphate (il reste en effet des impuretés). Le minerai est broyé pour obtenir un sable fin. Au terme de nombreuses étapes, on obtient ainsi une boue enrichie en phosphate, le « concentré », et une autre boue, appauvrie en phosphate, les « résidus ». Ceux-ci sont transportés hors de l'usine et sont stockés pour former d'immenses montagnes de déchets (voir ci-dessous).



Stockage de déchets miniers - Mine de phosphate de Benguéir, Maroc (SystExt · 2019 · cc by-sa-nc 3.0 fr)

**Les résidus sont considérés ici comme représentant la quantité totale de déchets générés sur le site minier.** Dans le cas présent, cette quantité intègre également les effluents liquides (c'est-à-dire les liquides provenant du traitement du minerai et qui sont « souillés » par des solides en solution). Ces derniers représentent les deux tiers de la quantité totale de déchets et sont regroupés avec les déchets solides pour des raisons de simplification.

les calculs réalisés par SystExt (G. Anderi Silva et L. Alexandre Kulay, 2003) sont valables pour les gisements de type magmatique (qui compte donc pour 12 % de la production mondiale).

L'étape de concentration nécessite beaucoup d'eau, soit 93 % de la quantité totale en eau nécessaire au fonctionnement du site minier. De plus, elle requiert 90 % de l'électricité consommée sur le site, afin d'assurer une alimentation en continu des machines (24h/24, 365 jours par an).

La consommation en énergies fossiles et les émissions de gaz à effet de serre sont attribuées en totalité à cette étape<sup>2</sup>.

### Valorisation et étapes ultérieures

L'étape suivante permet d'extraire le phosphate des concentrés et de fabriquer les produits phosphatés (acide phosphorique, superphosphates (SPP), superphosphates triples (TSP), etc.). La plupart des grandes exploitations de phosphate possèdent leurs propres installations de transformation, généralement situées loin des sites miniers. On considère ici une usine de production de produits phosphatés située à 1100 km du lieu d'exploitation.



Usine de production de produits phosphatés à Safi, Maroc  
(mhobl · 2011 · cc by-nc-nd 2.0)

Ces installations utilisent différents réactifs chimiques pour la fabrication des produits phosphatés, comme par exemple l'acide sulfurique. Ces étapes supplémentaires ont d'ailleurs le plus haut taux de nocivité. L'utilisation d'énergie électrique est massive, non seulement pour alimenter les machines, mais aussi pour réaliser les procédés d'extraction. Ces intrants et extrants ne sont pas considérés puisque le présent outil s'arrête à la production des concentrés de phosphate.



Granulés de superphosphate triple  
(Rashbak · 2007 · cc by-sa 3.0)

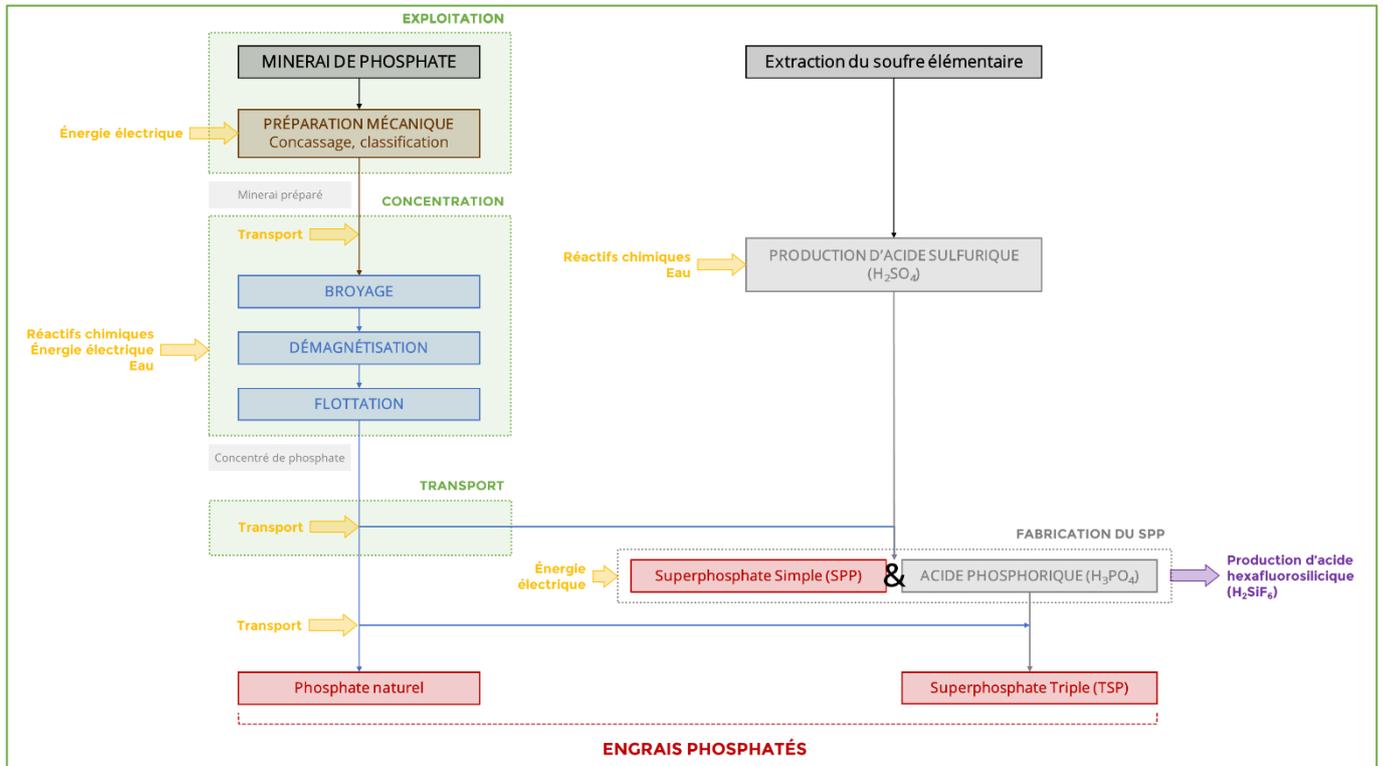
Le schéma suivant présente les différentes étapes qui permettent l'obtention d'un concentré de phosphate puis la fabrication de l'acide phosphorique et des engrais phosphatés (phosphate naturel, superphosphates (SPP), superphosphates triples (TSP)). Il met en évidence (en vert) les étapes prises en compte par SystExt pour réaliser les calculs (exploitation, concentration, transport) (G. Anderi Silva et L. Alexandre Kulay, 2003).

### BIBLIOGRAPHIE

- Application of life cycle assessment to the LCA case studies single superphosphate production | G. Anderi Silva et L. Alexandre Kulay, *The International Journal of Life Cycle Assessment* (2003)
- Environmental performance comparison of wet and thermal routes for phosphate fertilizer production using LCA - A Brazilian experience | G. Anderi Silva et L. Alexandre Kulay, *Journal of Cleaner Production* (2005)
- Phosphate Rock Statistics and Information | Site internet de US Geological Survey, consulté le 07/05/2020. [Lien.](#)
- Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries | US Geological Survey (2019). [Lien.](#)
- Mineral Resource of the Month: Phosphate Rock | Site internet de Earth Magazine, mis à jour en 2013, consulté le 07/05/2020. [Lien.](#)
- Les Phosphates | Fiches détaillées de la SIM (2011). [Lien.](#)

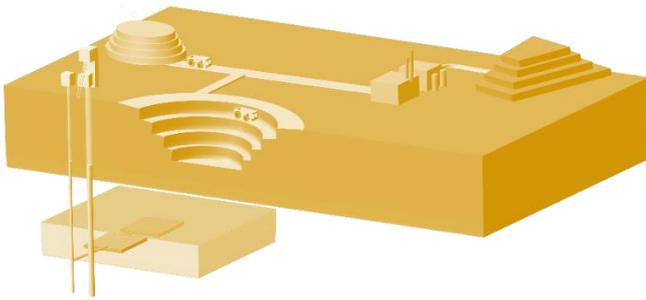
<sup>2</sup> En effet, la publication utilisée par SystExt (G. Anderi Silva et L. Alexandre Kulay, 2003) détaille les émissions de GES et les énergies fossiles pour le transport du minerai phosphaté à l'usine

(0,5 %), puis du concentré de phosphate à l'usine de production de SPP (99,5 %).



Étapes de traitement qui peuvent être subies par un minéral de phosphate, jusqu'à l'obtention des produits phosphatés (SystExt, mai 2020)

FILIÈRE OR



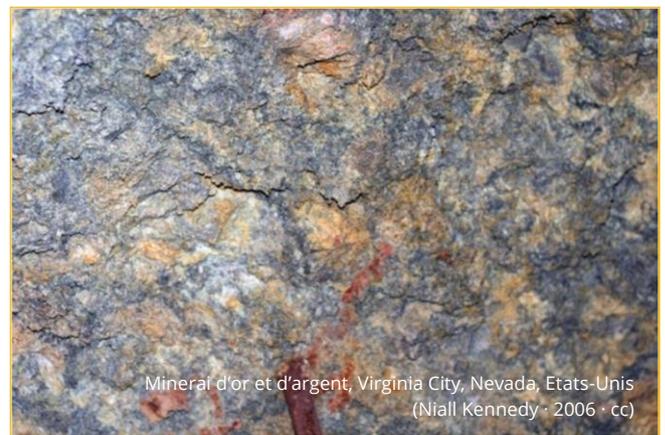
Dans cet outil, on considère une **mine d'or « moyenne »**. En 2015, 3 165 tonnes d'or ont été produites par l'industrie minière dans le monde. En considérant le nombre total de gisements alors en exploitation (199), on fait donc ici l'hypothèse que la **mine « moyenne » produit 15,9 tonnes d'or métal par an**. À titre d'illustration, la mine de Kalgoorlie en Australie (voir ci-dessous) produit 20 tonnes d'or par an.



Mine d'or de Kalgoorlie, Australie  
(Matthew Perkins · 2004 · cc by-nc-nd 2.0)

En 2015, la quantité d'or présente en moyenne dans les gisements exploités était de 1,18 gramme par tonne (g/t) de roche. Ici, on considère un gisement « riche », contenant **3,5 grammes d'or et 0,6 gramme d'argent<sup>1</sup> par tonne de roche**. L'or y est le principal métal exploité et non un sous-produit de l'exploitation d'une autre substance, comme il peut l'être dans certaines mines de cuivre, par exemple.

L'exploitation de la mine étudiée ici se fait à ciel ouvert. On se place dans des conditions « favorables » de récupération de l'or dans la roche, c'est-à-dire dans le cas d'un minerai d'or non réfractaire<sup>2</sup>. **Le produit fini de cette mine est un lingot contenant 90 % d'or et 10 % d'argent**, sans prendre en compte les autres impuretés.



Minéral d'or et d'argent, Virginia City, Nevada, Etats-Unis  
(Niall Kennedy · 2006 · cc)

Le tableau suivant présente la quantité totale d'intrants et d'extrants de cette mine « moyenne » pendant une année de fonctionnement, en nombre d'unités équivalentes (nombre de cubes).

Eau	8
Électricité	31
Énergies fossiles	3
Gaz à effet de serre	190
Déchets miniers	354

<sup>1</sup> L'argent est très souvent associé à l'or. 12 % de la production mondiale d'argent provient d'ailleurs des mines d'or.

<sup>2</sup> Un minerai d'or « réfractaire » est un minerai naturellement résistant à la récupération de l'or par des processus standards de cyanuration et d'adsorption par du charbon. Un minerai réfractaire contient généralement des minéraux sulfurés, du carbone organique, ou les deux. Les minéraux sulfurés piègent

ou englobent des particules d'or, ce qui rend difficile la cyanuration. Le carbone organique présent dans le minerai d'or peut aussi adsorber des complexes or-cyanure dissous (de la même manière que le charbon actif). Ces minerais réfractaires nécessitent donc un prétraitement afin que la cyanuration soit efficace pour récupérer l'or.

## ÉTAPE 1 : EXPLOITATION

Comme pour toute production de matières premières minérales, la première étape est l'extraction des minéraux qui contiennent l'or ou le « minerai ». Pour cela, on décape les premières dizaines de mètres de sols et de roches, appelées « morts-terrains ». Puis, lorsque l'on arrive à la roche dure, l'exploitation en mine à ciel ouvert se fait par niveaux descendants avec l'usage d'explosifs.

Le mélange de roches récupérées est constitué de minerai et de roches dites « stériles », c'est-à-dire qui ne contiennent pas (ou trop peu) d'or. Au fur et à mesure de l'avancement, les stériles sont transportés hors des chantiers d'exploitation (le plus souvent en bordure immédiate du site minier, dans ce qu'on appelle des « haldes à stériles ») et le minerai est transporté à l'usine de traitement. Des dizaines de camions s'affairent ainsi à transporter ces millions de tonnes de roches. On considère que toutes les énergies fossiles sont consommées à cette étape et que 34 % des gaz à effet de serre y sont émis. De plus, les installations d'exploitation (besoins du personnel, déplacements de matériel, entretien des équipements, etc.) nécessitent un approvisionnement régulier en électricité, correspondant à 26 % de l'électricité consommée par la mine.



## ÉTAPE 2 : TRAITEMENT

Remarque préliminaire : Les pourcentages chiffrés ou les proportions globales d'intrants et d'extrants sont introduits tout au long des trois sous-étapes de traitement détaillées ci-après (conditionnement, extraction chimique, raffinage).

Il n'a pas été possible de calculer des chiffres propres à chaque sous-étape, c'est pourquoi les chiffres fournis concernent l'étape de traitement dans sa globalité. Par ailleurs, ce qui est expliqué pour l'or est également valable pour l'argent contenu dans le minerai.

### Conditionnement

Arrivé à l'usine, le minerai doit être transformé car l'or est lié, sous forme d'infimes particules, à d'autres minéraux. La roche est concassée puis broyée jusqu'à l'obtention d'un sable voire d'une boue très fine. Cette opération permet de libérer plus facilement les grains d'or ou les minéraux qui les contiennent.

### Extraction chimique

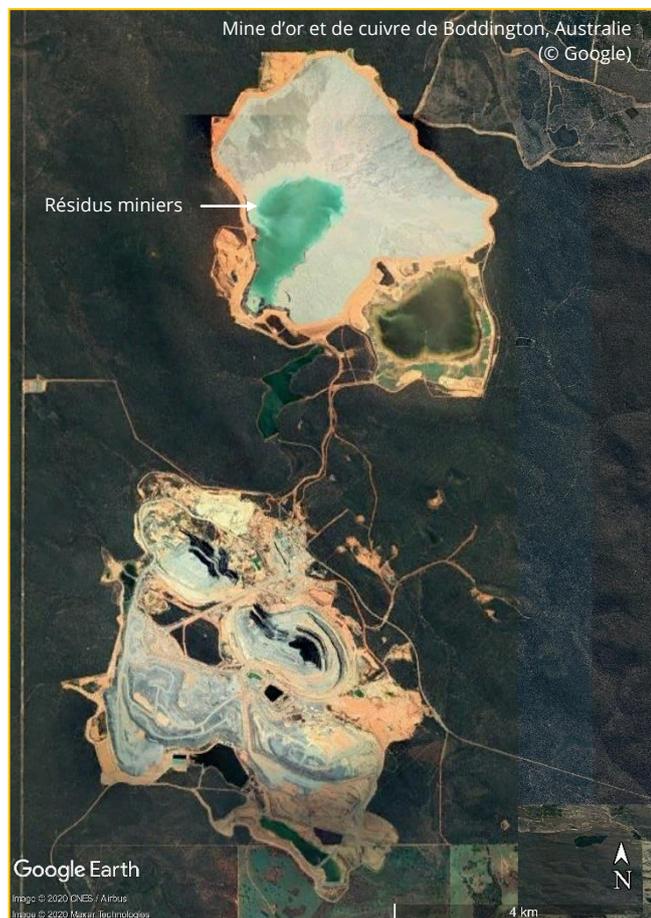
L'étape suivante permet d'extraire l'or du minerai broyé. De nouvelles opérations de traitement sont nécessaires, celles qui ont d'ailleurs le plus haut taux de nocivité sur le site. En effet, de nombreux produits chimiques y sont utilisés, en particulier des solutions cyanurées, seules capables d'isoler les fines particules d'or du reste de la boue. Au terme de cette étape, on obtient ainsi, d'une part, une solution enrichie en or, et, d'autre part, une pulpe appauvrie en cette substance : les résidus.

Les résidus sont transportés hors de l'usine et sont stockés pour former d'immenses montagnes de déchets, appelés parc à résidus.



En reprenant les chiffres fournis en introduction, une mine « moyenne » produisant 15,9 tonnes d'or métal avec une teneur moyenne de 3,5 g/t d'or, produit environ 4,5 millions de tonnes de déchets miniers (« stériles » ou « résidus ») chaque année.

À titre d'illustration, la vue satellitaire ci-dessous situe les résidus miniers de la mine d'or et de cuivre de Boddington, en Australie-Occidentale (qui fait partie des 10 plus grandes mines d'or du monde en termes de réserves).



Une quantité importante d'électricité est également nécessaire à ce stade, non seulement pour alimenter en continu les machines (24h/24, 365 jours par an), mais aussi pour réaliser les procédés d'extraction qui, pour la plupart, sont de nature électrochimique. Ce processus correspond à 74 % de l'énergie électrique consommée sur le site minier.

On associe à l'ensemble du site minier la quantité totale d'eau utilisée et la quantité totale de déchets miniers générés (stériles et résidus). Pour cet intrant et cet extrant, il n'y a pas de répartition proposée entre l'étape d' « Exploitation » et celle de « Traitement ».

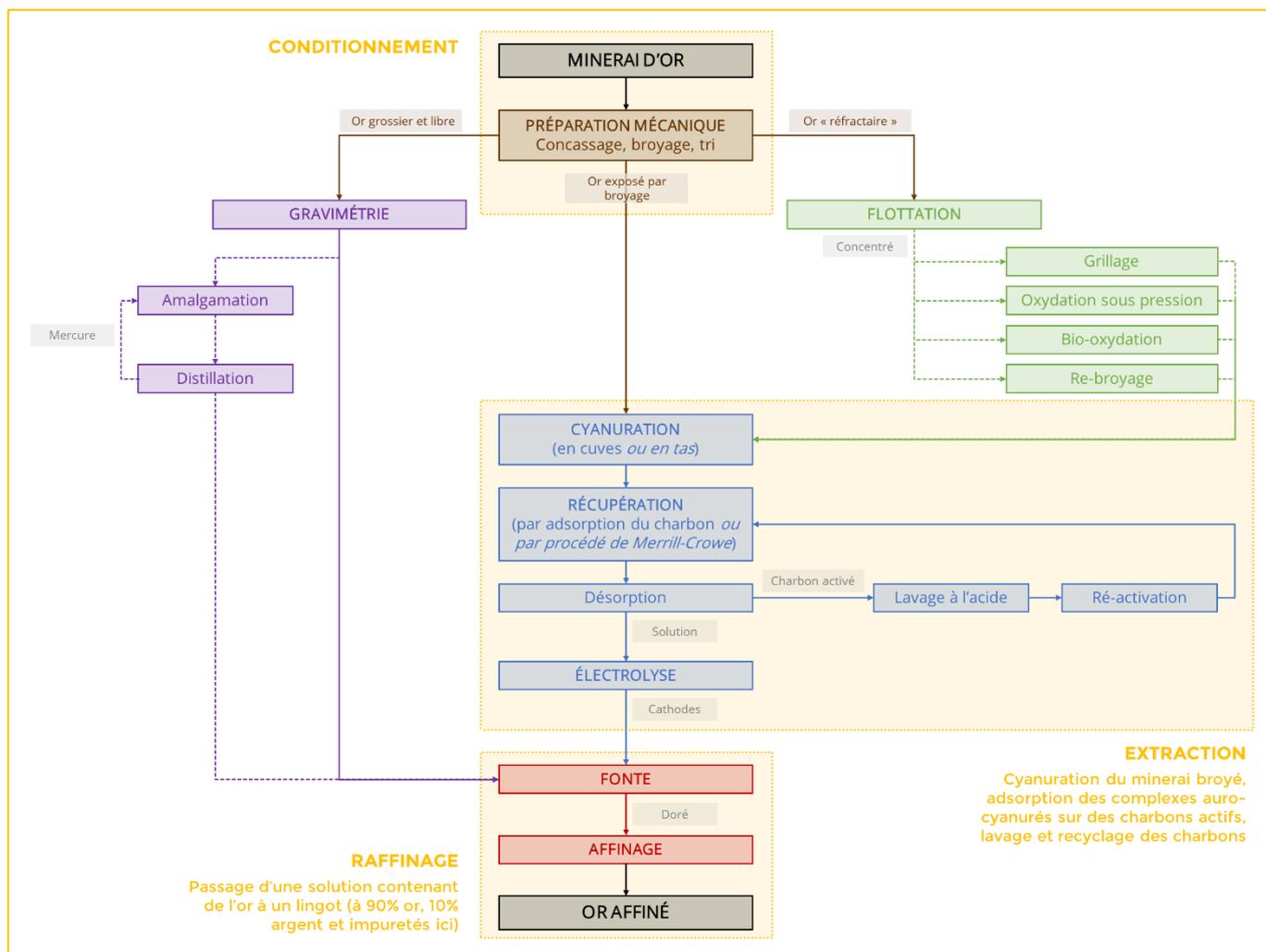
Le schéma ci-dessous présente les différentes étapes que peut subir un minerai d'or. Il met en évidence (en jaune) les étapes prises en compte par SystExt pour réaliser les calculs.

### Raffinage

À l'issue de l'étape d'extraction chimique, la solution liquide obtenue contient de l'or « dissous ». Pour le récupérer et le concentrer, on utilise la méthode de l'électrolyse, qui permet d'attirer tout cet or dissous pour en faire une boue métallique. Cette boue d'or est ensuite « fondue ». L'or obtenu sous forme de lingots est prêt à être expédié vers d'autres installations qui le purifieront de nouveau. On associe schématiquement à cette sous-étape 66 % des émissions de gaz à effet de serre du site minier.

### BIBLIOGRAPHIE

- Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production | T. Norgate et N. Haque, *The Journal of Cleaner Production* (2012)
- État de production et de la demande d'or en 2016 ou vers une pénurie d'or physique et une hausse record des cours de l'or ? | Pierre Croharé, AuPlata (2016)
- Top ten biggest gold mines in the world | MINING Technology (30/01/2020). [Lien.](#)
- La Chalcidique, entre mines antiques et résistance contemporaine | SystExt (19/03/2020). [Lien.](#)
- La mine d'or de Salsigne : Panorama d'un échec environnemental | SystExt (31/07/2019). [Lien.](#)
- Une lutte sans fin, les nouveaux conquérants du quadrilatère d'or | SystExt (12/10/2016). [Lien.](#)



Étapes de traitement qui peuvent être subies par un minerai d'or ; modifié et traduit d'après (Norgate et Haque, 2012)