

Fiche Matériau : ACIER

Analyse des impacts potentiels et recommandations

Ces fiches ont été réalisées dans le cadre d'un stage au sein du Centre de ressources Génie écologique de l'Office français de la biodiversité (OFB) intitulé « ÉCOCONCEPTION DES SOLUTIONS UTILISÉES DANS LE CADRE DU GÉNIE ÉCOLOGIQUE » (Camille Kuntz, 2019)

Elles s'adressent à l'ensemble des acteurs impliqués dans la conception, le pilotage, le financement, la mise en œuvre et la réalisation de projets de génie écologique. Ce premier travail a vocation à être enrichi et alimenté.

I. Enjeux

L'acier est un alliage de **fer** et de **carbone**, le taux de carbone étant compris entre 0,2 et 2 %. Il est utilisé pour ses propriétés de **résistance mécanique** et **chimique**. On le retrouve dans le génie écologique au niveau des agrafes du géotextile ou des gabions dans le cadre d'opérations mixte génie écologique/génie civil par exemple mais aussi dans le béton armé pouvant être utilisé pour différents ouvrages tels les récifs artificiels.

II. Matière première

L'acier est composé à plus de 98 % de fer. Le fer est extrait de minerais d'oxyde de fer comme l'hématite, la magnétite ou la limonite. Les principaux producteurs de fer sont en **Australie**, au **Brésil**, en **Chine**, en **Inde** et en **Russie**.

Les conséquences de l'extraction du fer sur l'environnement sont nombreuses :

- L'extraction du fer peut conduire à **l'émission de produits de combustion** comme du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, de l'oxyde d'azote et du dioxyde de soufre. Ces émissions proviennent des phases de construction et d'opération et sont dues aux générateurs diesel, aux chaudières et aux transports sur le site. De la poussière diffuse peut aussi être émise tout au long de l'exploitation, la quantité variant en fonction de la taille du site d'exploitation, des conditions climatiques, et de l'activité. Cette pollution de l'air a des conséquences néfastes sur la faune et la flore et peut occasionner un stress physiologique, et provoquer des maladies pouvant aller jusqu'à la mortalité de l'individu.¹
- L'extraction du fer peut permettre la formation **d'acide sulfurique** lors du contact de l'eau avec les minéraux et composés chimiques présents dans les roches contenant du soufre. En effet, le procédé d'extraction implique de dissoudre les minéraux entourant le minerai ce qui conduit à la **libération de composés chimiques** emprisonnés dans la roche. On parle ici de Drainage Minier Acide (DMA).² L'acide peut être généré dans des conditions naturelles, mais les activités minières accentuent sa production ce qui cause un déséquilibre dans l'environnement. Ce produit acide peut se retrouver alors dans **l'eau** et causer des dommages aux organismes aquatiques et à la faune terrestre qui s'abreuve dans les cours d'eau contaminés. De plus, cet acide peut conduire à la dissolution des métaux. Certaines mines requièrent aussi le drainage de sources d'eau à proximité ce qui affecte la qualité et la quantité d'eau et donc la flore et la faune.³

- Les mines de fer impliquent une **pollution auditive** ce qui peut avoir des conséquences sur le comportement des animaux.
- Les déchets générés lors de l'extraction sont déposés à proximité de la mine. Si ces déchets ne sont pas correctement gérés, de **l'érosion** peut avoir lieu ce qui implique des concentrations importantes de **métaux toxiques** dans les sédiments transportés. Cela peut avoir des conséquences graves sur le sol, surtout si le métal est dans une forme où il peut passer facilement des sédiments à l'eau. Ces métaux peuvent ensuite être absorbés par les végétaux et les animaux.⁴

Le carbone utilisé dans l'acier est directement extrait du charbon. Les mines de charbon présentent les mêmes risques environnementaux que les mines de fer. Il est aussi à noter que certains charbons contiennent des éléments radioactifs qui sont donc libérés lors de son extraction.⁵

Les pays les plus exportateurs de charbons sont **l'Australie**, **l'Indonésie**, la **Russie**, la **Colombie** et **l'Afrique du Sud**.

Enfin, les **aciers inoxydables** présentent une concentration de plus de 10 % de chrome pour lutter contre la corrosion. Le **chrome** est extrait de minerais à base de chromite. La moitié du minerai de chromite est produit en **Afrique du Sud**, les autres pays exploitants sont la **Russie**, la **Turquie**, **l'Inde** et le **Kazakhstan**.

III. Fabrication

Il existe actuellement deux manières de fabriquer l'acier en fonction de la nature des matières premières. Ainsi, si les matières premières sont le minerai de fer et le charbon, l'acier sera fabriqué dans un **haut fourneau** avec réduction du carbone dans un convertisseur. Si la matière première est l'acier de récupération, la transformation se fera dans un **four électrique**.

Dans le cas de l'utilisation de haut fourneau, le minerai est broyé et cuit sous une hotte à 1300°C puis le mélange est ensuite concassé et calibré avant d'être chargé dans le haut fourneau avec le carbone. L'air chaud présent dans l'appareil va convertir le carbone en monoxyde de carbone qui va lui réduire les oxydes de fer pour transformer le minerai en fer pur. Le fer se chargera en carbone et se transformera en fonte. La fonte passe ensuite dans le convertisseur qui permet la transformation de la fonte en acier. Pour cela, la fonte est versée sur un lit de ferrailles. Les impuretés sont brûlées en insufflant de l'oxygène pur. On obtient alors de l'acier.

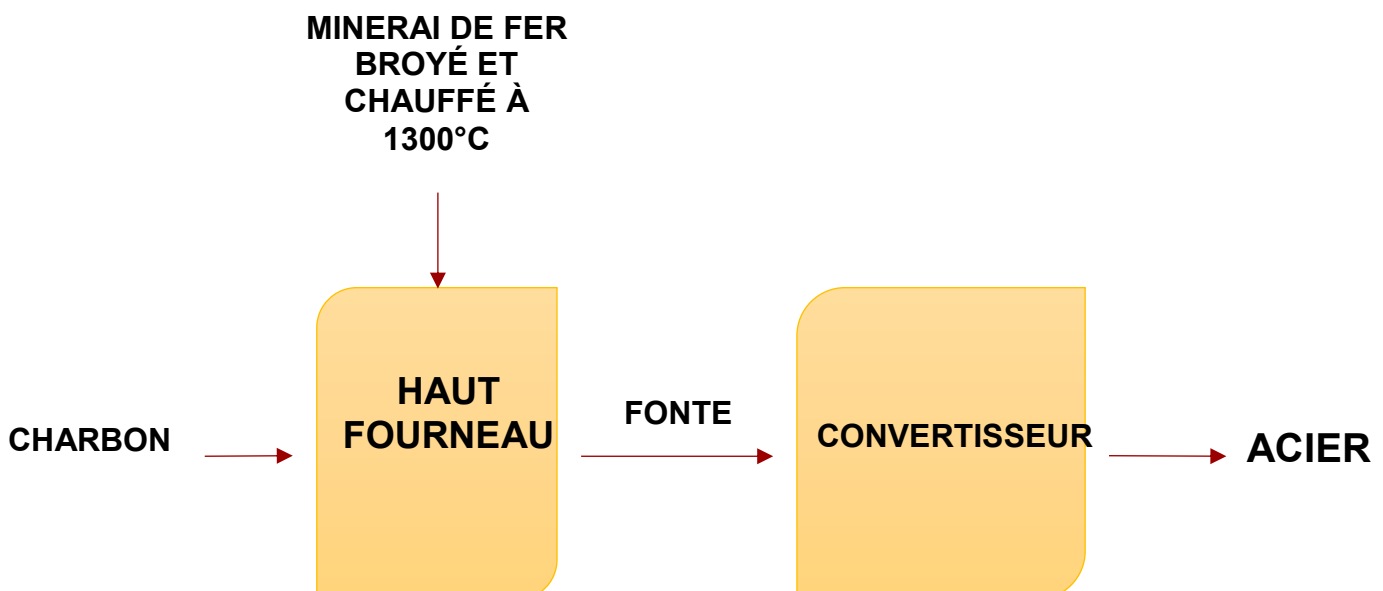


Schéma 1 - Fabrication simplifiée de l'acier

Dans le cas du recyclage de l'acier, une forte tension électrique est appliquée entre des électrodes et l'acier à faire fondre. La température engendrée varie entre 1800 °C et 3600°C ce qui permet la fusion de l'alliage. Une tonne d'acier implique une consommation d'énergie de 440 kWh.⁶ Cela équivaut à utiliser un réacteur nucléaire de 900 MW pendant deux secondes.⁷ Fabriquer de l'acier avec un arc électrique n'est donc économique que là où il y a abondance d'énergie électrique, avec un réseau électrique stable et bien développé.

Concernant les gaz à effet de serre produit lors de la fabrication, une **tonne d'acier recyclé** représente **0.9 tonnes équivalent CO₂**, pour **2 tonnes** pour la production par **hauts fourneaux**.⁸ En 2017, **1,83 tonnes de CO₂** étaient émises pour chaque tonne d'acier produite. L'industrie de l'acier représente entre 7 et 9% des émissions directes dues à l'utilisation d'hydrocarbures.⁹

Un des principaux inconvénients de l'acier est la corrosion. Ce problème peut être amoindri avec des traitements de surface ou un ajout de chrome pour rendre l'acier inoxydable.

Les traitements anticorrosion peuvent être :

- Une protection par revêtements non métalliques : la peinture, les vernis ou les laques.
- Une protection par revêtements métalliques : **l'immersion** dans un bain de métal en fusion, la **métallisation** (le métal protecteur (Zn, Al) est fondu à l'aide d'un pistolet métalliseur à gaz. Un jet d'air comprimé pulvérise le métal fondu. Les gouttelettes sont ainsi projetées sur la pièce permettant leur soudure en donnant un dépôt très adhérent), ou **l'électrolyse** (on fait passer un courant électrique dans un bain électrolytique par l'intermédiaire d'une cathode constituée de la pièce à protéger (pôle -) et l'anode du métal à déposer. Le métal d'apport se dissout dans l'électrolyte et vient se déposer sur la cathode.).
- L'alliage de l'acier avec le chrome pour former de l'acier inoxydable.



ACREUSER :

Quel est la répartition des différents traitements de surface de l'acier ?

IV. Utilisation

Le contact de l'acier avec des chlorures, du dioxyde de carbone, de l'eau, de l'oxygène et d'autres agents corrosifs marque le début de la **corrosion**. Ces agents corrosifs peuvent être déposés sur l'acier soit par échange gazeux avec l'atmosphère, soit par les eaux pluviales, ou encore en cas d'immersion d'une pièce métallique dans l'eau.

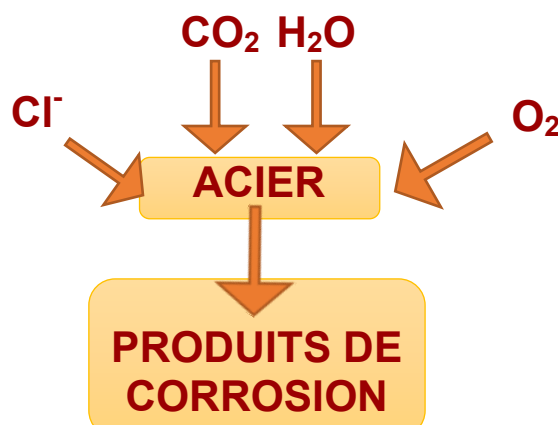


Schéma 2 - Corrosion de l'acier

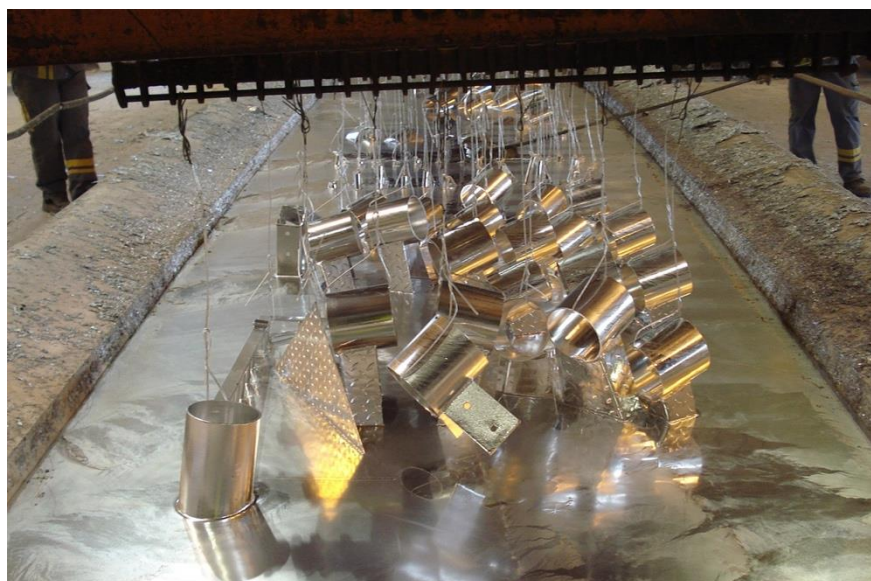
Cette corrosion va entraîner la formation de produits de corrosion comme la rouille. Les caractéristiques environnementales du milieu (présence de polluants par exemple) et les paramètres physico-chimiques des eaux de pluie vont influencer la nature de ces produits. Ces derniers vont aussi permettre de ralentir la corrosion. En effet, ils vont former une couche à la surface de l'alliage ce qui va réduire l'accès aux agents corrosifs. La forme de la structure joue aussi un rôle dans la corrosion.

Quand l'acier s'oxyde au contact des eaux de surface, il libère ses éléments sous la forme oxydée la plus haute : du **carbonate** (CO_3^{2-}) et du **fer (III)**. Ce fer (III) se complexe ensuite sous forme **d'oxyde ferreux** ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) autrement dit de la **rouille**. L'oxyde ferreux étant un sel, il peut se dissoudre dans le milieu aqueux et donc libérer à nouveau du Fe (III) qui va se complexer avec des molécules d'eau pour former du **$\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$** . Il a tendance à se complexer plus facilement quand la salinité augmente réduisant ainsi sa bio-accessibilité dans le milieu marin.

Dans le sol, l'adsorption du fer dépend de la nature et de la quantité de **matière organique** présente et du **pH** du sol. L'**adsorption** est un phénomène de surface par lequel des atomes, des ions ou des molécules se fixent sur une surface solide depuis une phase gazeuse, liquide ou une solution solide.

Aucun groupe taxonomique ne semble bio-accumuler le fer à l'exception de certaines espèces d'algues. Le fer est un **micronutriment essentiel** qui existe sous de nombreuses formes chimiques et dont la concentration interne est étroitement régulée par les organismes (homéostasie du Fe). Certaines de ces formes sont **vitales** pour les organismes alors que d'autres sont **toxiques**. Les formes toxiques sont difficiles à déterminer mais il semblerait que le Fe (II) le soit plus toxique que le Fer (III). Cependant, les **précipités de fer (III)** peuvent également induire des **effets biologiques néfastes** par un effet d'étouffement provoqué par la congestion des branchies par des flocculats d'oxyde de fer. En eau douce et en eau salée, les organismes les plus sensibles au fer sont les poissons et les crustacés. Différentes études ont été réalisées sur la toxicité aiguë et chronique du fer sur différentes espèces d'eau douce et d'eau salée, elles sont résumées dans le rapport de l'Agence environnementale du Royaume-Uni.¹⁰

La toxicité du fer dans l'environnement aquatique peut être due : à la **toxicité** du Fer (II) et du fer (III) en phase aqueuse, aux **effets du pH** dus à la grande acidité de certains sels de fer (ex. : FeCl_3), à la **déstabilisation du substrat** par les hydroxydes de fer et aux possibles **obstructions** dues aux particules de précipités de fer.



© EHI

Figure 1 - Galvanisation

Lorsque la galvanisation est utilisée pour lutter contre la corrosion, un dépôt de zinc est réalisé à la surface de l'acier. Le zinc joue alors le rôle d'anode sacrificielle, il se corrodera rapidement alors que l'acier sera préservé. Les produits de corrosion du zinc sont les carbonates de zinc, l'oxyde de zinc, l'hydroxyde de zinc ou encore l'hydrochlorure de zinc, suivant le milieu environnant.¹¹ Selon le système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques, l'oxyde de zinc porte la mention de danger : « **Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme** »¹² Il est d'ailleurs utilisé comme biocide pour les actions d'antifouling notamment.

La **toxicité** du zinc augmente avec sa **concentration**. Dans l'étude de Heijerick et al., différents échantillons d'eaux de ruissellement, prélevés sur des matériaux avec une surface en zinc, ont été analysées. **94,3 à 99,9%** du zinc se trouvait sous sa forme **Zn²⁺** qui est biodisponible. D'après les données de toxicologie, cette forme est la forme toxique du zinc.¹³ La complexation de ces ions avec la **matière organique** du sol réduit ensuite sa biodisponibilité. La matière organique du sol retient le zinc sous des formes stables (formation de complexes avec les substances humiques et fulviques). Relativement peu de sols présentent du zinc sous forme soluble et la mobilité du zinc est donc limitée par un faible taux de dissolution. Par conséquent, le déplacement

du zinc vers l'eau souterraine est très lent. Même s'il a été apporté au sol sous forme soluble (irrigation avec de l'eau usée), il est rapidement converti dans ses formes chimiques les moins actives (complexes organiques et surtout précipités minéraux). Le zinc est un métal essentiel, c'est à dire nécessaire en

quantité généralement faible, à la vie d'un grand nombre d'organismes. L'accumulation du zinc dans l'organisme est régulée chez de nombreuses espèces, par exemple chez les mollusques, les crustacés, les poissons et les mammifères. Le potentiel de **bioaccumulation** est donc **faible**. Parmi les facteurs qui affectent la disponibilité du zinc dans les sols, les paramètres du sol, tels que la quantité totale de zinc, le pH, la matière organique, les sites d'adsorption, l'activité microbienne, l'humidité, jouent un rôle important.¹⁴ Les valeurs de PNEC dans l'eau et le sol sont les suivantes :

- $PNEC_{add_eaux\ douces} = 7,8 \mu g/L$
- $PNEC_{add_sol} = 26 \text{ mg/kg sol sec.}$ ¹⁵

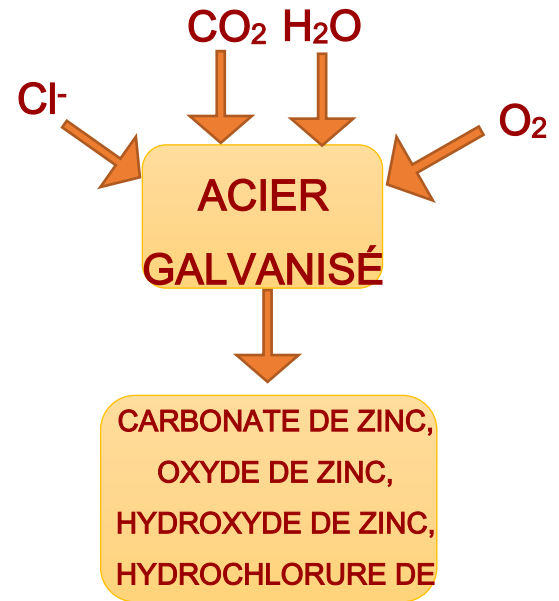
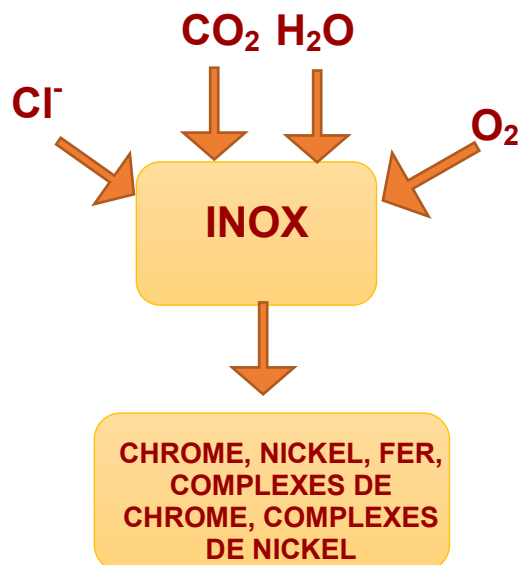


Schéma 3 - Corrosion de l'acier galvanisé

QU'EST-CE QUE C'EST ? :

La PNEC (*predicted no-effect concentration*) est la valeur de la concentration d'une substance chimique sous laquelle une exposition à cette substance n'est pas susceptible d'entraîner un effet néfaste. Elle permet de déterminer le potentiel toxique (i.e. dangerosité) de la substance pour l'environnement

?



La PNEC_{add} est la PNEC déterminée selon l'approche du risque ajouté (*added risk approach*).

Schéma 4 - Corrosion de l'inox

Les **aciers inoxydables** sont utilisés pour diminuer les effets de la corrosion. Ils sont obtenus en ajoutant du **chrome** au sein de l'alliage et d'autres éléments peuvent aussi être ajoutés comme du cuivre, du zinc ou du nickel pour lui donner d'autres propriétés. Le chrome viendra former une couche protectrice à la surface de l'acier, plus ou moins épaisse en fonction de la quantité initiale, ce qui ralentira la corrosion. Cette couche fera barrage aux oxydants pendant un certain temps. Un film supplémentaire de Ni et de Mo peut se former pour renforcer ce film passif de chrome. Malgré tout, la corrosion aura lieu. De plus, l'utilisation de ces éléments dans l'alliage impliquera la formation d'autres complexes comme l'**oxyde de chrome** ou l'**oxyde de nickel**. On observe un **relargage** dans les eaux de ruissellement de **chrome**, de **nickel** et de **fer** ce dernier en plus grande quantité. Des complexes ont aussi été identifiés comme le Cr(OH)^{2+} et le NiSO_4 .¹⁶ Le NiSO_4 a les mentions de danger suivantes :

- Susceptible d'induire des anomalies génétiques.
- Peut provoquer le cancer par inhalation.
- Peut nuire au fœtus.
- Risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée
- Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme.¹⁷

Les taux de ruissellement sur le long terme après quatre ans d'exposition aux précipitations, sont de l'ordre de $0.23-0.30 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le chrome, $0.28-0.52 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le nickel et $65-85 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le fer. Ce qui correspond à des concentrations dans les eaux de ruissellement : en chrome est de **0.5 à 2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$** et en nickel de **0.1 à 11 $\mu\text{g.L}^{-1}$** .

Le nickel et le chrome sont des métaux suivis au titre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) comme substance prioritaire contribuant à l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau (Ni) et comme polluant spécifique de l'état écologique contribuant à l'évaluation de l'état écologique (Cr). Les valeurs des NQE de référence sont les suivantes :

- Ni : NQE biodisponible applicable dans les eaux douces égale à $4 \mu\text{g/L}$.
- Cr : NQE applicable dans les eaux douces égale à $3,4 \mu\text{g/L}$

Dans le sol, le chrome est présent sous la forme de **Cr(III)** ou de **Cr(VI)**. Le Cr(III) est préférentiellement observé car il est relativement **immobile** dans le sol puisqu'il se complexifie avec la matière organique et est aussi adsorbé dans les argiles. De plus, le Cr(III) se substitue au Fe(III) dans les structures minérales et précipite sous forme de Cr(OH)_3 . A des valeurs de **pH élevées**, une faible fraction du Cr(III) peut être oxydée en Cr(VI), la forme la plus **toxique**. Cette forme est plus **mobile** et **bio-accessible** dans le sol. Cependant, les polluants contenant du Cr(VI) sont spontanément réduits en Cr(III).

Le **nickel** divalent est la forme la plus stable dans le sol, elle forme des complexes avec la matière organique. Le Ni(II) co-précipite avec le Fe et le Mn.

Entre **88-99 %** du chrome et du nickel sont retenus dans les sols.¹⁶ Ainsi, peu de métaux sont transportés jusqu'aux rivières ou nappes phréatiques.



A CREUSER :

Si le nickel et le chrome sont retenus dans le sol, sont-ils accessibles aux organismes vivants du sol et aux végétaux ?

Il ne semble pas avoir de risque de relargage d'autres molécules. Il est possible que les impuretés présentes dans l'acier soient libérées mais cela impliquerait que la matrice soit endommagée.¹⁶

V. Fin de vie

L'acier est l'un des matériaux les mieux recyclés. Il peut être presque entièrement recyclé. Cependant, seulement **62 %** de l'acier est recyclé en Europe. Le taux de recyclage dépend aussi du secteur dans lequel l'acier est utilisé.



A CREUSER :

Que devient l'acier non recyclé ?

Le recyclage permet de valoriser **90% des produits récupérés**. Pour 1 tonne produite par hauts fourneaux, c'est 10 tonnes qui seront en fait réutilisées. L'économie d'énergie pour le recyclage de l'acier par rapport à sa création est de 60 à 75%, elle est de 68% pour l'inox.¹⁸

Relue et corrigée par Olivier Perceval, chargé de mission écotoxicologie au sein de la direction de la recherche, de l'expertise et des données à l'Agence française pour la biodiversité.

Relue et corrigée par certains membres du Comité scientifique et technique du centre de ressources Génie écologique de l'Office français de la biodiversité.

VI. Bibliographie

1. Wang, K. et al. *A comprehensive emission inventory of multiple air pollutants from iron and steel industry in China: Temporal trends and spatial variation characteristics*. *Sci. Total Environ.* **559**, 7–14 (2016).
2. Rapport BRGM/RP-50829-FR, Itard et Bosc 2001. *Traitements et préventions des drainages acides provenant des résidus miniers*.
3. Allan, R. J. *Impact of mining activities on the terrestrial and aquatic environment with emphasis on mitigation and remedial measures*. *Environ. Sci.* 119–140 (1995).
4. Hudson, T. L., Fox, F. D. & Plumlee, G. S. *Metal Mining and the Environment*. *Am. Geol. Inst. Environ. Aware. Ser. 3*, (1999).
5. Agence fédérale de contrôle nucléaire Belge. *Matériaux naturellement radioactifs*. (2019). Available at: <https://www.afcn.fgov.be/fr/dossiers-dinformation/radioactivite-dans-lenvironnement/materiaux-naturellement-radioactifs-norm>.
6. Industrial Efficiency Technology Database. *Electric Arc Furnace*. (2019). Available at: <http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace>.
7. EDF. *Le nucléaire en chiffres*. (2019). Available at: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres>.
8. ADEME. *Analyse de cycle de vie - Acier*. (2019). Available at: http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?acier.htm.
9. World Steel Association. *Steel Facts*. (2019). Available at: <https://www.worldsteel.org/about-steel/steel-facts.html>.
10. Environment Agency, U. K. *Proposed EQS for Water Framework Directive Annex VIII substances: iron (total dissolved)*. (2007).
11. Lefevre, B. *Corrosion des aciers revetus de zinc dans les zones confinées des carrosseries automobiles*. (Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2007).
12. SigmaAldrich. *Fiche de données de sécurité - Oxyde de zinc*. (2019).
13. Heijerick, D. G., Janssen, C. R., Karlèn, C., Odnevall Wallinder, I. & Leygraf, C. *Bioavailability of zinc in runoff water from roofing materials*. *Chemosphere* **47**, 1073–1080 (2002).
14. Alloway, B. *Zinc. Heavy metals in soils*. *Blackie Acad. Professional* 284–305 (1995).
15. *Risk Assessment Report EU (European Union) (2010)*. European Union risk assessment report on zinc metal . Prepared by The Netherlands, RIVM, on behalf of the European Union. EUR 24587 EN – 2010.
16. Bertling, S. *Corrosion-induced metal runoff from external constructions and its environmental interaction. - A combined field and laboratory investigation of Zn, Cu, Cr and Ni for risk assessment*. (Royal institute of technology, 2005).
17. SigmaAldrich. *Fiche de données de sécurité - Nickel (II) sulfate*. (2018).
18. CNRS. *Le recyclage des métaux*. (2019). Available at: <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/09/03/3-le-recyclage-des-metaux/>.