

Mots-clefs « *Élaboration* », « *Vieillessement* », « *Recyclage* » et « *Corrosion* ».

1 La production de l'acier

Vu ses très intéressantes propriétés mécaniques, le fer, pur ou sous forme d'alliages, est le métal le plus utilisé dans l'industrie et le bâtiment. Élaboré à partir de minerais principalement constitués d'oxyde de fer, il s'oxyde naturellement à l'air s'il n'est pas protégé.

Document 1 – Élaboration du fer, de la fonte et de l'acier

En Europe, la fabrication du fer date de 1700 ans av. J.C. : on superposait plusieurs couches successives de minerai de fer et de bois et on chauffait ces empilements, c'est l'invention du haut-fourneau ; le métal fondu était travaillé sur place.

Actuellement coexistent deux filières d'élaboration de l'acier : la filière fonte et la filière ferraille.

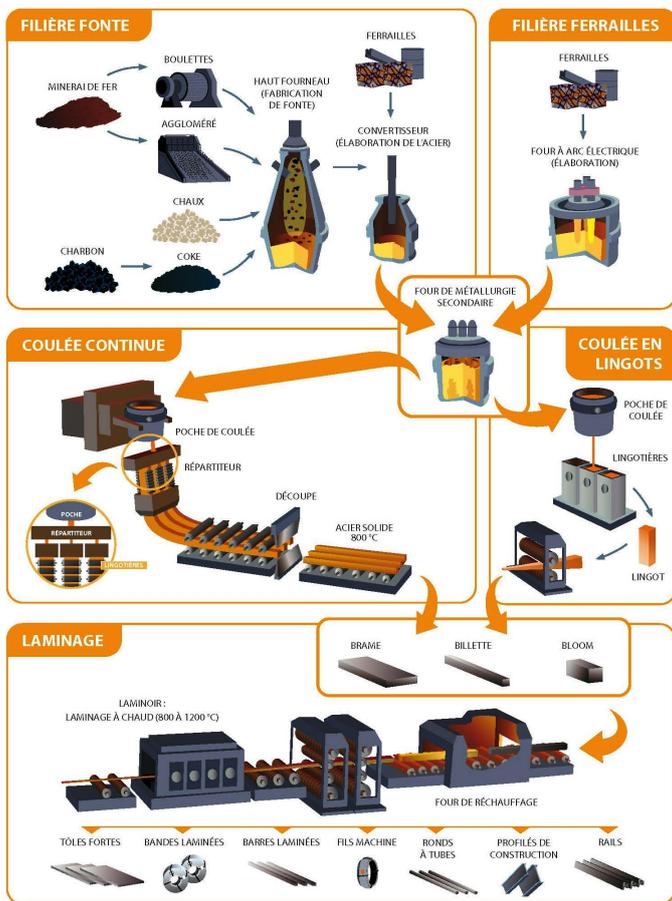


FIG. 1 – La fabrication de l'acier.

Dans la filière fonte, après broyage, le minerai est introduit dans le haut fourneau avec du coke (constitué essentiellement de carbone). Le coke brûle : la chaleur dégagée fait fondre le minerai ; le monoxyde de carbone $\text{CO}_{(g)}$, formé par la combustion, **réduit** en fer les oxydes de fer constituant

le minerai. On obtient alors de la fonte en fusion. Elle est ensuite acheminée vers un convertisseur où elle est versée sur de la ferraille. Du dioxygène est introduit : il brûle une partie du carbone et les résidus ; on obtient de l'acier.

Dans la filière ferraille, la ferraille, triée et broyée ou à l'état brut, est introduite dans un four électrique : de l'acier en fusion est obtenu. Du dioxygène est éventuellement introduit.

La production d'une tonne d'acier par la filière fonte s'accompagne du dégagement de deux tonnes de dioxyde de carbone, gaz à effet de serre (GES).

Document 2 – Fer, fonte et acier : ne pas confondre !

Ces trois produits diffèrent par leur teneur en carbone.

Le fer est un matériau mou et malléable, dont la teneur en carbone est infime.

L'acier a une teneur en carbone pouvant varier de 0,03 % à 2 % maximum ; il est à la fois malléable et résistant. L'inox est un acier composé de 75 % de fer, de 8 % de nickel, de 17 % de chrome et d'un peu de carbone.

La fonte a une teneur élevée de carbone (de 2 % jusqu'à 6 %), et existe en plusieurs qualités : de malléable et ductile(*), à très dure et résistante.

(*) ductile : qui peut être étiré, étendu, sans se rompre.

Document 3 – Protection de l'acier

La corrosion a des conséquences importantes au niveau économique. La lutte contre la corrosion permet de rallonger la durée de vie des objets en acier. On peut :

- incorporer du chrome et du nickel à l'acier pour obtenir un acier inoxydable ;
- recouvrir l'acier d'une couche protectrice imperméable (peinture, vernis, plastique) ;
- recouvrir l'acier d'un autre métal : en plongeant la pièce d'acier dans un bain de zinc fondu (galvanisation) ou par électrozingage (électrolyse) ;

- relier un bloc de zinc à l'objet en acier à protéger : le zinc est alors oxydé et le dioxygène est réduit à la surface du fer ou de l'acier, qui n'est alors pas corrodé (anode sacrificielle sur la coque des navires).

Document 4 – Recyclage des aciers

Même protégés, les aciers se corrodent lentement. Les objets en acier corrodé peuvent ensuite être recyclés.

Les exigences en matière de taux de recyclage des véhicules automobiles sont élevées : actuellement 54 % de l'acier présent dans une voiture est de l'acier recyclé.

Avec un taux de recyclage qui dépasse les 62 %, l'acier est le matériau le plus recyclé en Europe. Le recyclage de l'acier permet de préserver les ressources naturelles, de réduire l'utilisation d'énergie et de diminuer l'émission de gaz à effet de serre (GES).

D'après <http://www.acier.org/lacier/comment-fabriquer-t-on-lacier.html>

- Justifier l'utilisation du bois par les premiers métallurgistes.
- Comment obtient-on de la fonte ? Comment est-elle transformée en acier ?
- Justifier la dernière phrase du document n° 4.

2 La corrosion

Document 1 – Corrosion de l'acier

Selon la définition d'un dictionnaire de corrosion, « action et effet de ce qui est corrosif, de ce qui ronge », et de corroder, « ronger progressivement », du latin *cum*, avec, pour, et *rodere*, ronger.

Le phénomène de corrosion correspond à la dégradation d'un métal, ou d'un alliage métallique, par des réactifs gazeux ou en solution. À l'échelle de la planète, chaque seconde, cinq tonnes d'acier sont oxydées en rouille, mélange complexe d'oxydes et d'hydroxydes de fer plus ou moins hydratés.

La corrosion est un fléau industriel. On estime en effet que 20 % de la production mondiale d'acier sont perdus chaque année sous forme de rouille.

La corrosion de l'acier est favorisée lorsque l'atmosphère est *humide* et contient des espèces ioniques dissoutes. La corrosion est dite **uniforme** lorsque toute la surface du métal en contact avec cette solution est attaquée de la même façon, **différentielle** si ce n'est que partiellement.



FIG. 2 – Le cargo « Galant Lady », échoué sur la côte des Bahamas.

- Quel environnement favorise la corrosion de l'acier ?

2.1 Document 2 – La corrosion est une réaction d'oxydoréduction

La corrosion correspond à l'**oxydation** d'un métal (ou d'un alliage), en particulier (mais ce n'est pas général) par le dioxygène. Cela constitue donc un retour à l'état naturel : les métaux sont généralement extraits de minerais formés principalement d'oxydes ou de sulfures (bauxite pour l'aluminium, hématite pour le fer, pyrolusite pour le manganèse, etc.).

La corrosion est dite « **sèche** » quand le milieu corrosif est un gaz, mais elle est plus souvent « **humide** », due soit à l'oxygène *dissous* dans une solution « agressive », soit aux ions H_3O^+ présents dans l'atmosphère à la suite d'une pollution ou d'une éruption volcanique.

Elle concerne des métaux ou des alliages tels que :

- L'argent** Couteaux et fourchettes qui noircissent par formation d'oxyde d'argent $\text{Ag}_2\text{O}_{(s)}$;
- Le cuivre** Couche de « vert-de-gris » ou hydroxycarbonate de cuivre, qui recouvre les ustensiles et les statues en cuivre ;
- L'aluminium** Couche d'oxyde d'aluminium ou alumine $\text{Al}_2\text{O}_{3(s)}$;
- Le bronze** Couche de vert-de-gris pour lui aussi, le bronze étant un alliage de cuivre et d'étain ;
- Le fer** La « rouille », dont la composition très variable sera précisée.

Si, dans le cas des premiers exemples listés, la couche d'oxyde formée est uniforme et constitue une barrière qui protège le cœur du métal, il n'en est pas de même dans le cas du fer ; la couche de « rouille » formée est poreuse et la corrosion peut gagner l'ensemble de la masse de fer.

Cela peut être considéré comme un avantage si l'on admet que cela constitue une sorte de biodégradation, mais c'est le plus souvent un inconvénient, car cela amène une

plus grande fragilité d'une pièce, par exemple les piles de ponts, les coques de navires, les canalisations d'adduction d'eau...

L'expérience montre que la corrosion est aussi liée à l'« histoire » du matériau. Par exemple, un clou écroui(★) a subi des contraintes au niveau de la tête et de la pointe qui les fragilisent.

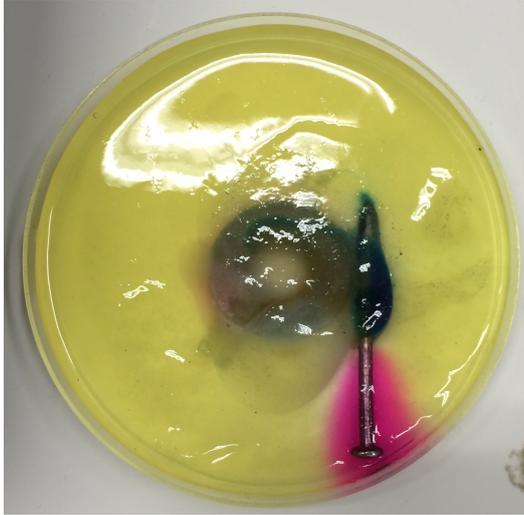


FIG. 3 – À droite, clou écroui, anode et cathode. Au centre, rondelle galvanisée. Solution saline et agar-agar, contenant deux indicateurs colorés (ferricyanure de potassium et phénolphthaléine).

C'est à ces niveaux-là que se produit l'**oxydation** (visualisée dans l'expérience par la coloration bleu caractéristique des ions hexacyanoferrate (III)). Oxydation donc ces parties sont des **anodes**. Dans la partie intermédiaire se produit la **réduction** de l'eau (visualisée par la coloration rose caractéristique de la phénolphthaléine en présence d'ions hydroxyde OH^-). Réduction donc **cathode**.

La corrosion correspond à la formation d'une pile au sein du matériau.

3 Modélisation de la corrosion en milieu maritime

On peut mettre en évidence la corrosion *humide* d'une pièce d'acier brute (un clou *écroui*), et montrer que la couche de zinc protège l'autre pièce (la rondelle recouverte de zinc par galvanostégie lors du TP n° 22).

3.1 Tests préliminaires

- Dans un tube à essai contenant 1 mL de solution d'hydroxyde de potassium $\text{Na}_{(\text{aq})}^+ + \text{OH}_{(\text{aq})}^-$ à $0,05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, ajouter une ou deux gouttes de phénolphthaléine. Noter la coloration obtenue. Schéma légendé.
- Dans un tube à essai contenant 1 mL de solution de sulfate de fer (II) à $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, ajouter une ou deux gouttes d'une solution d'hexacyanoferrate (III) de potassium $3 \text{K}_{(\text{aq})}^+ + [\text{Fe}(\text{CN}_6)]_{(\text{aq})}^{3-}$ à $0,03 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ et observer. Schéma légendé.

Conséquence pratique : il faut *recuire* une pièce après l'avoir travaillée afin d'éliminer les tensions nées du martelage, du sciage, etc.

Finalement, on constate que les points importants dans ces expériences de corrosion sont :

- la concentration en dioxygène dissous dans la solution ;
- la concentration en ions, assurant le transport des charges dans la solution ;
- la conduction électrique entre l'anode et la cathode au sein du matériau.

(★) Écrouir : Traiter (en frappant et en étirant) à une température inférieure à la température de recuit. *Écrouir un alliage pour augmenter sa résistance.*

Document 4 – La « rouille »

Le fer, métal ductile, se travaille aisément, à chaud et à froid, mais s'oxyde facilement à l'air humide (milieu humide et oxydant) ; il se couvre alors d'oxyhydroxyde poreux, $\text{FeO}(\text{OH})_{(\text{s})}$, la « rouille », à travers laquelle la corrosion peut se poursuivre. On doit donc le protéger du l'*dioxygène* atmosphérique.

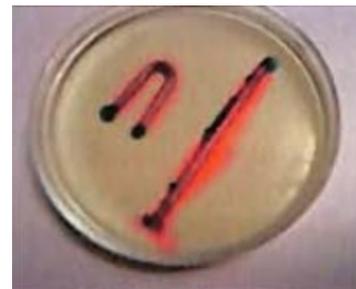


FIG. 4 – Clou écroui. Mise en évidence des contraintes. Solution saline et agar-agar.

D'après D. CACHAU-HERREILLAT, Des expériences de la famille Réd-Ox, De Boeck éditeur.

e. Expliquer la coloration observée dans le premier tube.

f. Écrire l'équation de la formation du précipité caractéristique de la présence d'ions fer (II) Fe^{2+} dans le deuxième tube.

3.2 Corrosion

- La solution électrolytique utilisée, notée S par la suite, a été préparée en dissolvant à chaud 3 g d'agar-agar (un gélifiant) dans 100 mL de solution de chlorure de sodium $\text{Na}_{(\text{aq})}^+ + \text{Cl}_{(\text{aq})}^-$ à $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, solution à la-

quelle on a ajouté 5 mL d'hexacyanoferrate (III) de potassium $3\text{K}_{(\text{aq})}^+ + [\text{Fe}(\text{CN}_6)]_{(\text{aq})}^{3-}$ à $0,03 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ et 1 mL de phénolphtaléine.

- À toutes fins utiles, on a aussi préparé la même solution, mais uniquement avec de l'eau distillée à la place des 100 mL de solution de chlorure de sodium.
- Décaper au papier abrasif un gros clou, afin d'ôter la rouille ou un éventuel étamage.
- Disposer le clou et la pièce d'acier zinguée dans une boîte de Pétri, identifiée avec vos noms et prénoms. Recouvrir alors prudemment ces deux pièces avec la solution S tiède et observer.

3.3 Une seule petite goutte suffit

La corrosion des métaux fait ainsi intervenir des réactions rédox entre différents points d'une même pièce ou entre métaux différents en contact électrique l'un avec l'autre. Une partie de la pièce métallique agit comme agent réducteur, et l'autre apporte la surface conductrice sur laquelle intervient la réduction.

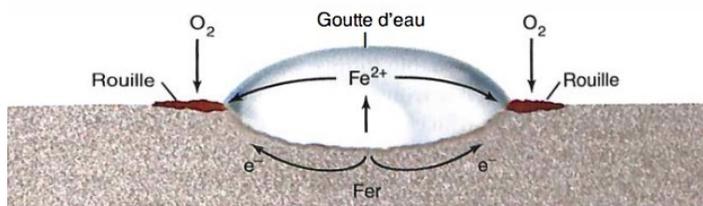


FIG. 5 – Corrosion du fer.

Ainsi, une goutte d'eau sur une surface de fer peut être un site de corrosion. Le fer est oxydé par le dioxygène de l'air. Des traces d'eau sont nécessaires à la corrosion *humide* puisque le mécanisme implique la formation d'ions fer (II) $\text{Fe}_{(\text{aq})}^{2+}$ dissous. La présence de sels favorise la corrosion, car permettant que s'établisse un plus fort courant de corrosion entre les régions actives.

3.4 Exploitation

g. Comment expliquer que certaines parties du clou se colorent en bleu? Que traduit cette coloration pour le clou? Écrire l'équation électrochimique correspondante.

h. D'autres parties du clou se colorent en rose. Interpréter cette coloration après avoir cherché la zone de virage de la phénolphtaléine et écrire l'équation électrochimique mise en jeu, sachant que le dioxygène est réduit en eau.

i. La pièce de métal zinguée présente-t-elle des zones de coloration bleutées? Quelle conclusion en tirer pour l'oxydation du fer en présence de zinc? Quel peut-être le rôle du zinc?

Couples d'oxydoréduction : $(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe})$, (H^+/H_2) et $(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})$.

4 Des combustions

4.1 Combustion dans l'air

- Enrouler un fil de fer en spirale et le fixer l'une de ses extrémités à un bouchon. Porter à chaud, dans la flamme d'un bec Bunsen, l'autre extrémité du fil. Dans l'air, le fil de fer devient incandescent, mais ne brûle pas.
- Après refroidissement, attacher à l'extrémité libre, un peu de « laine de fer » (fils de fer très fins). Avec la laine de fer, produire un court-circuit entre les deux bornes d'une pile.

On peut observer que la laine fer rougit, puis se met à brûler (pour amorcer la combustion, on peut aussi pu utiliser une allumette enflammée).



FIG. 6 – Court-circuit avec une pile et de la laine de fer.

4.2 Combustion dans le dioxygène

- Après avoir amorcé la combustion de la laine de fer, introduire le dispositif dans un flacon de dioxygène au fond duquel on a disposé une couche de sable afin de la protéger.



FIG. 7 – Combustion du fer dans le dioxygène.

- Le fil de fer brûle très vivement dans le dioxygène, sans flamme, mais en produisant beaucoup de lumière et en projetant des étincelles dans toutes les directions. Des particules en fusion se détachent et tombent sur le sable, au fond du flacon.



FIG. 8 – Particules d'oxyde de fer au fond du flacon.

- Quand la combustion est terminée, on constate qu'une grande partie du fil de fer a disparu.

Des petites boules solides, de couleur grise, sont apparues, c'est de l'oxyde de fer.

D'après http://www.icours.eu/sp/sp4_03/index2.htm

j. Écrire les équation des réactions d'oxydation menant à l'oxyde de fer $\text{FeO}_{(s)}$ et à l'oxyde magnétique $\text{Fe}_3\text{O}_{4(s)}$.

k. S'agit-il de corrosions *sèches* ou de corrosions *humides* ?

4.3 Les différents oxydes de fer

L'oxyde ferreux $\text{FeO}_{(s)}$ est noir.

L'oxyde de fer (III) $\text{Fe}_2\text{O}_3_{(s)}$ ou oxyde ferrique ou rouille brune (qui peut aussi être rouge) est le pigment utilisé dans les teintures rouges. Purifié, il est employé pour recouvrir les bandes magnétiques des magnétoscopes (un très ancien appareil se branchant sur un téléviseur) et des disques durs.

L'oxyde magnétique $\text{Fe}_3\text{O}_4_{(s)}$ ou oxyde magnétique est de couleur noire.

L'hydroxyde de fer (II) $\text{Fe}(\text{OH})_{2(s)}$ est vert.

Bon nombre de ces oxydes peuvent former des hydrures, donnant naissance à toute une gamme de couleurs.

Ainsi, il existe une large variété d'oxydes de fer.

D'après McQUARRIE-ROCK, *Chimie générale*, DeBœck éditeur.

4.4 Combustion d'autres métaux

Voici les résultats observés lors de l'oxydation d'autres métaux dans l'air :

Aluminium Combustion très vive de la poudre d'aluminium dans l'air. Il se forme une poudre blanche d'oxyde d'aluminium ou alumine $\text{Al}_2\text{O}_3_{(s)}$.

Zinc Combustion vive de la poudre de zinc dans l'air. Formation d'une fumée blanche d'oxyde de zinc $\text{ZnO}_{(s)}$.

Cuivre On observe une flamme verte et il se forme une poudre noire : c'est de l'oxyde cuivrique $\text{CuO}_{(s)}$.

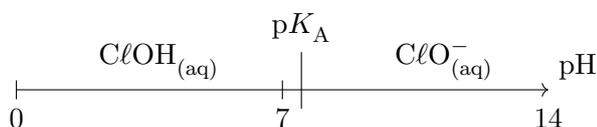
D'après http://www.college-podensac.fr/IMG/pdf/Chapitre_8-combustion.pdf

l. Écrire les équations des oxydations dans chaque cas.

5 Correction des exercices de la séance n° 22

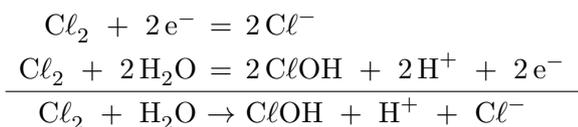
21.1 N° 4 p. 33 – Traitement des eaux

1. a. Adsorption : rétention d'un liquide ou d'un gaz. À ne pas confondre avec « absorption » : action d'absorber, donc pénétration d'un liquide ou d'un gaz.
Le charbon actif dont il est question dans le document 2 est aussi capable d'adsorber des particules solides de très petite taille.
- b. La filtration « sur membrane » permet de retenir des molécules chimiques polluantes, comme les pesticides.
2. a. Le pK_A du couple acide hypochloreux/ion hypochlorite ($ClOH/ClO^-$) vaut $pK_A = 7,5$. Diagramme de prédominance associé au couple :



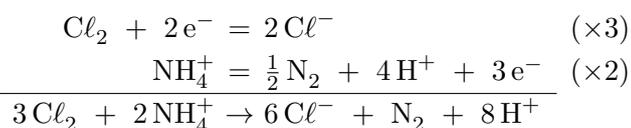
On constate que l'acide hypochloreux est prédominant dans le domaine acide ($pH < 7$). Plus précisément, pour un pH inférieur à $pK_A - 1$, l'acide hypochloreux est majoritaire $[ClOH] \gg [ClO^-]$. Donc si on se place en milieu acide, on dispose majoritairement de l'acide hypochloreux, qui est plus efficace.

- b. Les couples d'oxydoréduction en jeu sont (Cl_2/Cl^-) et ($ClOH/Cl_2$) :



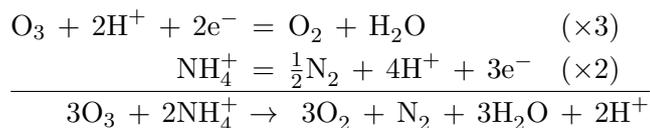
On remarquera que le dichlore joue à la fois le rôle d'oxydant et de réducteur dans les deux demi-équations.

3. Écrivons la réaction d'élimination des ions ammonium par le dichlore. Les ions ammonium NH_4^+ sont les réducteurs du couple (N_2/NH_4^+), il faut trouver un couple qui fasse intervenir le dichlore Cl_2 en tant qu'oxydant, donc le couple (Cl_2/Cl^-) :



Écrivons la réaction d'élimination des ions ammonium par l'ozone. Les ions ammonium NH_4^+ sont les réducteurs du couple (N_2/NH_4^+), il faut trouver un couple

qui fasse intervenir l'ozone O_3 en tant qu'oxydant, donc le couple (O_3/O_2) :



4. a. Voici la liste des traitements subis par l'eau : dégrillage ; tamisage ; floculation ; décantation ; filtration ; ozonation ; chloration.
- b. Les analyses des eaux potables sont accessibles en ligne sur <http://social-sante.gouv.fr>. Voici la dernière analyse, datant de début mars 2016 :

Informations générales			
Date du prélèvement	03/03/2016 11h05		
Commune de prélèvement	CHAMALIÈRES		
Installation	CHAMALIÈRES		
Service public de distribution	CHAMALIÈRES - SAUR		
Responsable de distribution	SAUR FRANCE ANNONAY		
Maître d'ouvrage	MAIRIE DE CHAMALIÈRES		

Conformité	
Conclusions sanitaires	Eau d'alimentation conforme aux exigences de qualité en vigueur pour l'ensemble des paramètres mesurés.
Conformité bactériologique	oui
Conformité physico-chimique	oui
Respect des références de qualité	oui

Paramètres analytiques			
Paramètre	Valeur	Limite de qualité	Référence de qualité
Ammonium (en NH4)	<0,05 mg/L		≤ 0,1 mg/L
Aspect (qualitatif)	0		
Bact. aér. revivifiables à 22°-68h	<1 n/mL		
Bact. aér. revivifiables à 36°-44h	<1 n/mL		
Bactéries coliformes /100ml-MS	<1 n/100mL		≤ 0 n/100mL
Chlore libre *	0,10 mg/LCl2		
Chlore total *	0,14 mg/LCl2		
Coloration	<5 mg/L Pt		≤ 15 mg/L Pt
Conductivité à 25°C *	238 µS/cm		≥200 et ≤ 1100 µS/cm
Couleur (qualitatif)	0		
Entérocoques /100ml-MS	<1 n/100mL	≤ 0 n/100mL	
Escherichia coli /100ml -MF	<1 n/100mL	≤ 0 n/100mL	
Odeur (qualitatif)	0		
Saveur (qualitatif)	0		
Température de l'eau *	10,5 °C		≤ 25 °C
Turbidité néphélométrique NFU	0,28 NFU		≤ 2 NFU
pH *	7,60 unitépH		≥6,5 et ≤ 9 unitépH

* Analyse réalisée sur le terrain

FIG. 9 – Analyse de l'eau potable à Chamalières.

Les normes de potabilité en elles-mêmes constituent un document d'une longueur et d'une précision patentes. De telles normes sont accessibles en ligne sur <https://www.legifrance.gouv.fr>. On peut retenir qu'elles consistent en des paramètres microbiologiques et chimiques. Parmi les paramètres chimiques, on note les limites pour les métaux lourds et polluants courants, telles que montrées dans le tableau ci-dessous.

Espèces chimiques	Limites
Mercure	1,0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Nitrate	50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Pesticides	0,50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Plomb	10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

FIG. 10 – Limites de potabilité pour quelques polluants courants.

1. a. La pollution aux métaux lourds provient essentiellement des déchets non traités (autant dans les égouts que dans les décharges), de l'industrie lourde (les fonderies) et des mines.

Il faut néanmoins se méfier de cette notion de « métaux lourds ». La notion d'éléments-traces métalliques, ou ETM en abrégé, tend à remplacer celle de métaux lourds qui a été et qui reste un concept mal défini, car associant des métaux toxiques réellement lourds à d'autres l'étant moins. Une partie des ETM est toxique, ou toxique au-delà d'un certain seuil. Selon les éléments et le contexte, ils sont plus ou moins bioassimilables, et pouvant être bioconcentrés par la chaîne alimentaire.

- b. Cette recherche a été effectuée dans l'exercice précédent pour l'eau potable. On peut rajouter quelques chiffres pour la forme :

Espèces chimiques	Limites
Cadmium	5,0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Chrome	50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Cuivre	2,0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Nickel	20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

FIG. 11 – Limites de potabilité pour quelques ETM.

Pour les eaux de surface, les limites sont différentes, ce qui peut être difficile à comprendre en toute logique.

Si on compare ces limites de potabilité avec les indications du document 1, on constate que les concentrations d'ions métalliques dissous dans l'eau de mer sont (fort heureusement) systématiquement inférieures. En revanche, ce sont les concentrations d'éléments en suspension qui interroge.

2. a. Il s'agit d'un « simple » calcul de pourcentage à partir des indications du document 3. Les masses que l'on peut recueillir sont donc de 0,44 Mt pour Mn, 0,09 t pour Fe, 0,020 Mt pour Ni, 0,019 Mt pour Cu, 0,0038 Mt pour Co, 0,0090 Mt pour Ti et 0,0435 Mt pour Al.

L'intérêt économique est patent, surtout pour des métaux plus chers que l'or comme le titane. En revanche, l'exploitation promet d'être difficile à de telles profondeurs.

- b. Il n'est pas forcément nécessaire d'aller sur le site de l'Ifremer pour comprendre que dès que l'on va commencer à ramasser des nodules au fond des océans, cela va foutre une sacrée merde. Pas sûr que la destinée des poissons ou du plancton soit à même de dissuader une nouvelle ruée vers l'or.

3. Les nodules représentent des ressources en métaux très importantes.

1. Clathrate provient du grec *klathron* qui signifie *fermeture*.

2. Les molécules d'eau sont liées par des liaisons faibles particulières, appelées liaisons hydrogène.

De telles liaisons hydrogène ne sont pas possibles entre l'eau et le méthane. Ce sont d'autres liaisons faibles qui sont en jeu, sans nom particulier, autre que celui de liaisons de Van der Waals, qui est un autre nom pour désigner toutes ces liaisons faibles, qui se font sans échange ni partage d'électrons.

3. a. La métastabilité est la propriété pour un état stable *cinétiquement* mais pas *thermodynamiquement*. La réaction de décomposition est la réaction naturelle, mais la vitesse de cette réaction, menant à l'état stable, est relativement lente, voire quasi nulle.

- b. Une baisse du niveau marin pourrait conduire à une décomposition des hydrates de gaz, car il influerait sur la pression et aussi sur la température à laquelle ces hydrates sont placés. Ils se décomposeraient alors spontanément.

- c. Le réchauffement climatique a deux effets : d'une part, il implique une fonte des glaces présentes sur le plateau continental, ce qui libère de l'eau qui retourne dans les océans. Et d'autre part, il provoque une dilatation de l'eau de mer, ce qui contribue aussi à une augmentation du niveau des océans.

Actuellement, le niveau marin augmente en moyenne de 3 mm par an, mais cette augmentation pourrait nettement s'accélérer, la réponse du système climatique étant non linéaire et chaotique.

- d. Le méthane est un gaz à effet de serre quinze fois plus puissant que le dioxyde de carbone. La libération de grandes quantités de méthane pourrait accroître l'effet de serre. Une éventuelle réaction exponentielle du système climatique n'est pas à exclure.

4. Les hydrates de gaz constituent une ressource de méthane énorme : 20 millions de km^3 d'hydrates, donc $160 \times 20 = 3,2$ milliards de km^3 de méthane. Avec 3 000 milliards de km^3 de consommation annuelle mondiale, on peut calculer le nombre d'années de consommation assurée, avec l'hypothèse de conserver le niveau de consommation actuel :

$$\frac{3,2 \times 10^9}{3\,000} = 1,1 \times 10^6 \text{ années}$$

21.4 N° 6 p. 46 – Hydrates de méthane

Calculons le nombre de cages $5^{12}6^4$ dans la structure II.

Le document 3 compare la surface des bandes relatives aux cages 5^{12} et $5^{12}6^4$: la surface de la bande à 2910 cm^{-1} est deux fois plus grande que celle à 2905 cm^{-1} , ce qui

signifie que la structure II renferme deux fois plus de cages 5^{12} que de cages $5^{12}6^4$.

La structure II comportant 16 cages 5^{12} , elle contient donc 8 cages $5^{12}6^4$.

6 Exercices pour la séance n° 24

23.1 N° 2 p. 142 – Du minerai au métal

23.2 N° 5 p. 144 – De la bauxite à l'alumine

23.3 N° 6 p. 144 – Un haut-fourneau

23.4 N° 7 p. 145 – Recyclage des laitons