

CHIMIE ET ALIMENTATION

Les métaux dans l'alimentation humaine

Éric Bausson

Partie des programmes de physique-chimie associées

- ▶ Programmes de physique-chimie et de mathématiques de première STL : Partie « Chimie et développement durable »
- ▶ Programme de la spécialité physique-chimie de terminale générale : Partie « Constitution et transformations de la matière »
- ▶ Programmes de première et de terminale ST2S : Parties « Prévenir et sécuriser » et « Analyser et diagnostiquer »

Mots-clés : alimentation, métaux, oxydoréduction, fer, cuivre, plomb, mercure, toxicité, carence

INTRODUCTION

Depuis l'Antiquité, les métaux ont joué un rôle essentiel dans l'alimentation humaine, tant par leur présence naturelle dans les aliments que par leur utilisation dans la conservation et la préparation des repas. Les civilisations anciennes utilisaient déjà des ustensiles en cuivre et en étain.

Aujourd'hui, certains métaux sont indispensables à notre santé : le fer, présent dans la viande rouge et les légumes verts, est crucial pour le transport du dioxygène dans le sang ; le zinc, que l'on trouve dans les fruits de mer, soutient le système immunitaire ; le magnésium, abondant dans les noix et les céréales complètes, joue un rôle clé dans la relaxation musculaire. Cependant, d'autres métaux, comme le mercure dans certains poissons ou le cadmium dans les légumes cultivés sur des sols pollués, peuvent être nocifs suivant la dose absorbée. Il en est de même pour le plomb, autrefois employé pour fabriquer des conduites d'eau, qui s'est révélé toxique depuis. Ainsi, la présence des métaux dans notre alimentation soulève à la fois des enjeux nutritionnels et sanitaires nécessitant un contrôle rigoureux pour éviter les contaminations tout en garantissant un apport suffisant en oligo-éléments essentiels. Tous ces points seront abordés dans ce dossier.

L'ALIMENTATION, APPORT D'ÉLÉMENTS CHIMIQUES ESSENTIELS À LA VIE

En plus de l'hydratation et l'apport de macronutriments (protides, glucides, lipides), notre alimentation doit nous apporter des micronutriments (vitamines et oligoéléments). Parmi les oligoéléments, nous avons besoin de métaux comme le fer (Fe), le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et le sélénium (Se). Mais tout n'est pas si simple : en effet, si une carence est bien sûr néfaste, un excès de consommation de ces métaux peut être tout aussi dévastateur ! Les apports journaliers recommandés (AJR) pour des adultes et les limites supérieures de sécurité (LSS) sont des repères pour éviter l'apparition de carences ou d'excès. Voir [tableau 1](#) pour les valeurs des quatre métaux cités.

Tableau 1. Besoin en oligoéléments : exemple de quatre métaux. Source : ANSES.

	AJR	LSS
Fer	Homme adulte ou femme ménopausée : 7 à 11 mg Femme adulte (18 → 50 ans) : 16 à 18 mg Femme enceinte : environ 27 mg	40 mg par jour
Cuivre	1 à 2 mg	5 mg / jour
Zinc	8 à 12 mg	25 mg / jour
Sélénium	70 µg	255 µg / jour

Plus généralement, les éléments chimiques essentiels pour la vie sont présentés en figure 1 [leur absence entraîne une altération biologique ou une maladie, mais ces effets sont réversibles si l'élément est réintroduit].

Ils sont donc uniquement au nombre de 26, dont 14 sont des métaux ! Nous les retrouvons dans notre corps avec des quantités très faibles comme le montre la figure 2.

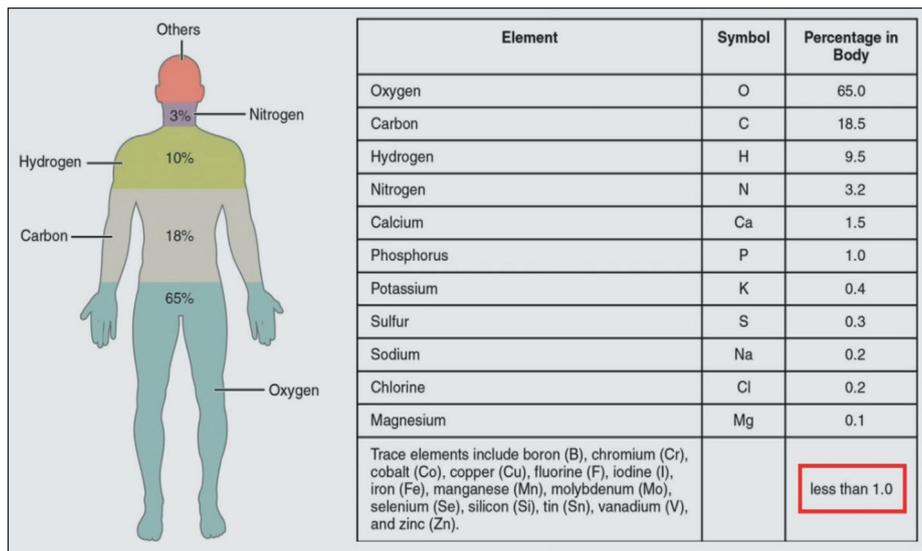
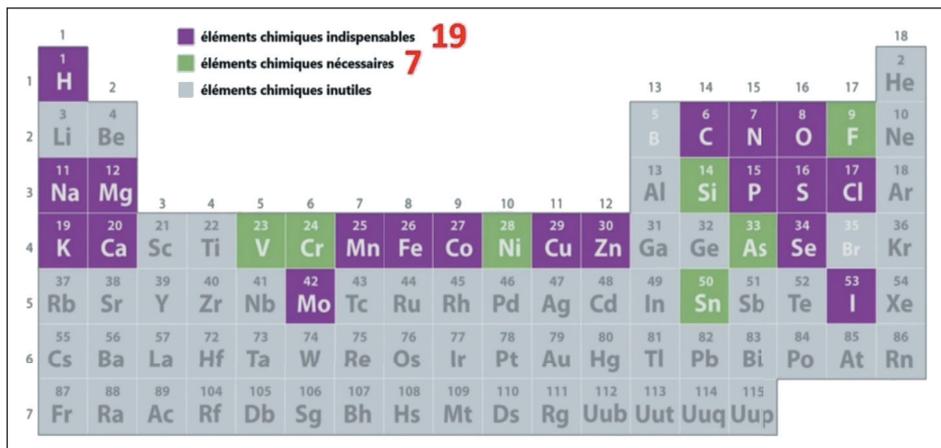


Figure 2. Nature et pourcentages des ions métalliques dans le corps humain – source : illustration modifiée d'une copie d'écran de la conférence de Bernard. Meunier, <https://vimeopro.com/maisondelachimie/colloque-chimie-et-alimentation-12-fevrier-2025/video/1057094984>.

Les ions métalliques présents dans notre corps sont par exemple les cations Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Cu^{+} , etc. Les cations X^{n+} , ici monoatomiques, sont formés à partir d'un atome X ayant perdu n électron(s).

ALIMENTATION ET RÔLE DE L'ÉLÉMENT FER DANS NOTRE CORPS

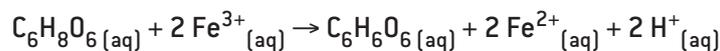
Comme nous venons de le voir, les besoins en fer diffèrent. Pour les femmes réglées, les pertes de sang demandent une alimentation plus riche en fer. Cela montre que son action est réelle principalement au niveau du sang, et plus précisément au niveau de l'hémoglobine.

L'apport du fer peut se faire sous deux formes alimentaires principales :

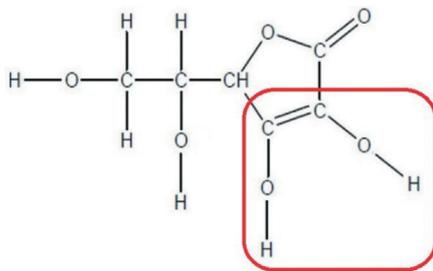
- ▶ fer héminique (Fe^{2+}), en consommant exclusivement des aliments d'origine animale car il est associé à des protéines comme l'hémoglobine ;
- ▶ fer non-héminique (Fe^{3+}), présent dans la plupart des aliments d'origine animale ou végétale.

Le taux d'absorption du fer héminique est supérieur à celui du fer non héminique. Notre capacité à absorber le fer alimentaire dépend de nos réserves, de la proportion de fer héminique dans notre alimentation et de la présence de composés qui augmentent l'absorption comme la vitamine C ou qui la diminuent tels que les tanins du thé. Lors d'un régime végétarien, consommer de la vitamine C est donc fortement recommandé.

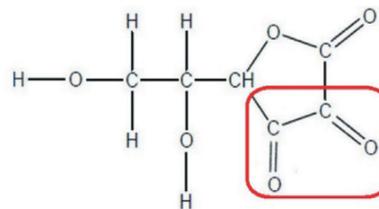
Une réduction de Fe^{3+} en Fe^{2+} est possible, par exemple avec la vitamine C, de formule brute $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, suivant l'équation :



Les formules chimiques de la vitamine C et de l'acide déshydroascorbique, son espèce oxydante conjuguée sont décrites ci-dessous :



acide ascorbique (vitamine C)



acide déshydroascorbique

Dans la vitamine C, deux fonctions *énol* (groupe-ment $-\text{O}-\text{H}$ sur $\text{C}=\text{C}$) sont oxydées en fonction *céton*e (groupement $\text{C}=\text{O}$) avec la transformation de la liaison $\text{C}=\text{C}$ en $\text{C}-\text{C}$.

Une fois dans les cellules intestinales, l'acide déshydroascorbique peut être converti à nouveau en vitamine C par la réduction enzymatique. Si l'acide déshydroascorbique n'est pas rapidement reconverti en vitamine C, il peut être excrété dans les urines. Par ailleurs, une partie de la vitamine C est utilisée directement par l'organisme dans diverses fonctions biologiques, et le reste est éliminé via les reins.

L'ion ferreux (Fe^{2+}) joue un rôle crucial dans plusieurs fonctions biologiques importantes du corps humain, principalement liées au transport du dioxygène et au métabolisme cellulaire.

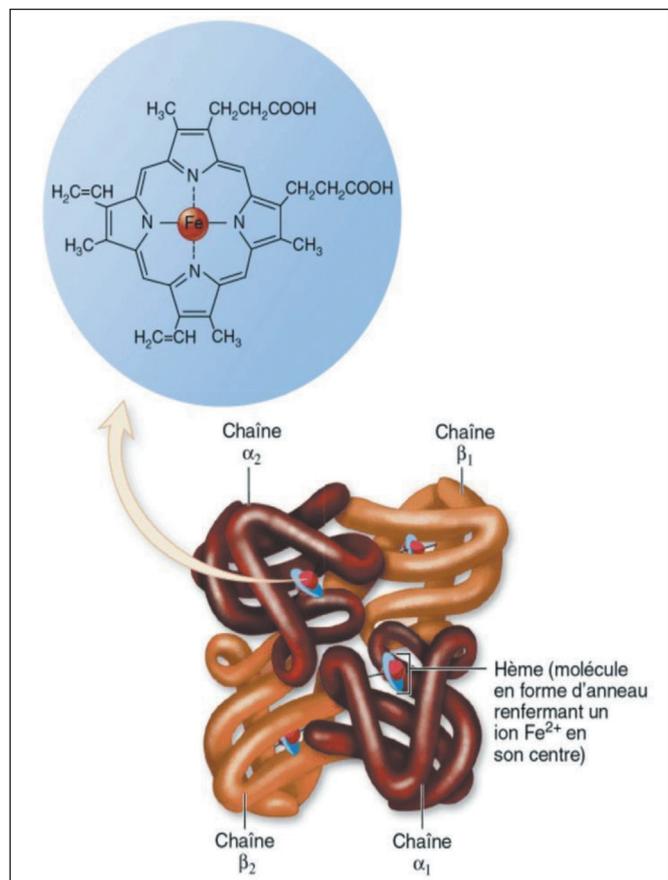


Figure 3. Composition d'un hème dans l'hémoglobine – source : Futura Sciences [DR], kr.pinterest.com/pin/597641813068364892/

L'hémoglobine se compose d'une partie protéique, la globine. Elle est formée de quatre chaînes polypeptidiques (α_1 , α_2 , β_1 et β_2) chacune contenant un groupement hémique lié à un ion ferreux (Fe^{2+}).

L'hémoglobine transporte quatre molécules de dioxygène O_2 , une sur chaque hème, et elle permet aussi d'évacuer le dioxyde de carbone CO_2 .

L'action des ions ferreux ne se résume pas au transport du dioxygène et du dioxyde de carbone grâce à l'hémoglobine.

Dans certaines réactions enzymatiques, l'ion ferreux intervient en tant que cofacteur (composé chimique non protéique nécessaire à l'activité biologique d'une protéine, le plus souvent une enzyme) pour faciliter la réduction du dioxygène, ce qui est essentiel dans des processus biochimiques comme la respiration cellulaire.

La myoglobine, une protéine similaire à l'hémoglobine mais présente dans les muscles, contient également des ions ferreux et est responsable du stockage et de la libération du dioxygène dans les muscles lors de leur activité.

Tableau 2. Normes de valeurs d'hémoglobine moyennes, variables selon les femmes, les enfants et les hommes. Le taux d'hématocrite correspond au volume occupé par les globules rouges circulant dans le sang exprimé en pourcentage par rapport au volume total du sang.

Normes	Femme	Homme
Taux d'hémoglobine	de 11,5 à 15 g/dL	de 13 à 18 g/dL
Nombre de globules rouges	de 3,5 à 6 millions/mm ³	
Taux d'hématocrite	40 %	46 %

Si l'alimentation n'est pas assez riche en fer, cela peut donc avoir des effets néfastes sur la santé humaine. Voici les principales conséquences d'une carence en fer :

- ▶ Anémie ferriprive : c'est la conséquence la plus courante. L'anémie se traduit par une diminution du nombre de globules rouges et de la capacité du sang à transporter le dioxygène. Cela peut entraîner de la fatigue, des vertiges, un essoufflement, des palpitations cardiaques et une pâleur.
- ▶ Fatigue et faiblesse : le manque d'oxygène dans les tissus du corps peut provoquer une sensation de fatigue intense et un manque d'énergie.
- ▶ Diminution des performances cognitives : une carence en fer peut affecter la concentration, la mémoire et les capacités d'apprentissage. Elle peut également provoquer des troubles de l'humeur, comme la dépression ou l'irritabilité.
- ▶ Problèmes immunitaires : le fer joue un rôle clé dans le système immunitaire. Une carence peut rendre le corps plus vulnérable aux infections.
- ▶ Problèmes de peau, cheveux et ongles : une carence en fer peut rendre la peau pâle, les cheveux fragiles et provoquer la chute de cheveux, ainsi que des ongles cassants.
- ▶ Problèmes cardiaques : dans les cas graves, la carence en fer peut entraîner une hypertrophie du cœur, car il doit travailler plus fort pour compenser le manque de dioxygène dans les tissus. Cela peut augmenter le risque d'insuffisance cardiaque.

ALIMENTATION ET RÔLE DE L'ÉLÉMENT CUIVRE DANS NOTRE CORPS

Le cuivre alimentaire est généralement sous forme Cu^{2+} . Il est réduit en Cu^+ par des enzymes ou des agents réducteurs comme le glutathion ou à nouveau la vitamine C. Le glutathion est un tripeptide composé des acides aminés suivants : glutamine, cystéine et glycine.

Il a pour formule brute $C_{10}H_{17}N_3O_6S$, où les atomes sont visibles en **figure 4** (C en gris, H en blanc, N en bleu, O en rouge et S en jaune).

Le glutathion est un réducteur puissant. Après réduction de Cu^{2+} en Cu^+ , il se forme un complexe Cu^+ -glutathion, qui fournit du cuivre à de nombreuses protéines fonctionnant avec ce métal.

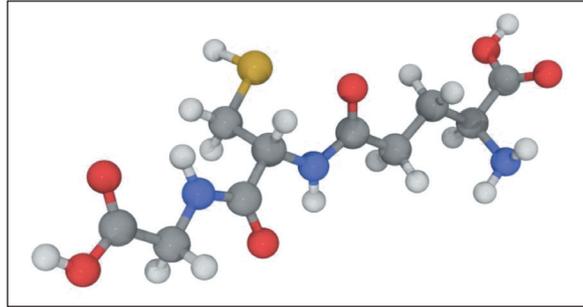


Figure 4. Le glutathion – Source : Science Photo, <https://www.sciencephoto.fr/image/11766826-Glutathione-molecule>

Le corps humain a besoin de l'élément cuivre pour de multiples raisons :

- ▶ Il est nécessaire à la production de l'hémoglobine et de la myéline (substance entourant les nerfs).
- ▶ Il est utile pour la production de collagène, une protéine clé dans la formation des os, des vaisseaux sanguins, et de la peau. Il participe donc à la réparation et à la croissance des tissus.
- ▶ Il est un cofacteur de certaines enzymes antioxydantes qui protège les cellules contre les dommages causés par les radicaux libres, espèces chimiques possédant au moins un électron non apparié.
- ▶ Il joue également un rôle dans la production d'énergie au niveau cellulaire, en aidant à la fonction des mitochondries.
- ▶ Il aide à renforcer le système immunitaire, en jouant un rôle dans la production de cellules immunitaires et en aidant à lutter contre les infections.

En règle générale, le corps humain régule efficacement le cuivre grâce à l'absorption intestinale et l'excrétion de l'excès dans les selles via la bile, limitant son accumulation. Dans le cas de la maladie de Wilson, touchant une personne sur 30 000, le cuivre s'accumule dans le foie et l'endommage, causant une cirrhose et une insuffisance hépatique. Sur le long terme, le cerveau est aussi touché par cet excès de cuivre, et des troubles neurologiques sont observés.

Des résultats de recherche très récents montreraient que l'élément cuivre est concerné dans la maladie d'Alzheimer. Des plaques liées au vieillissement, dénommées plaques amyloïdes, concentreraient cinq fois plus de cuivre dans le cerveau par rapport à un cerveau sain. Des études, pour le moment sur des souris, sont encourageantes car une molécule (TDMQ20) est capable d'arracher cet excès de cuivre pour le remettre normalement dans le métabolisme du cerveau.

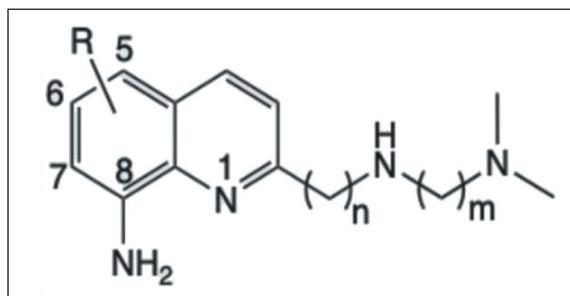


Figure 5. Formule générale pour TDMQ20 avec R : 5,7-dichloro et $n = m = 2$.

ALIMENTATION ET LES MÉTAUX TOXIQUES

Depuis la catastrophe de Minamata au Japon (voir encadré), les résidus de métaux lourds sont strictement surveillés dans l'alimentation et les médicaments.

Les métaux toxiques présents dans l'alimentation peuvent avoir des effets nocifs sur la santé humaine, souvent en raison de leur accumulation dans l'organisme au fil du temps. Leurs limites supérieures de sécurité (LSS) sont de l'ordre de quelques microgrammes par kilogramme d'aliment. Les aliments sont analysés et retirés si la limite est dépassée.

La catastrophe de Minamata (Japon)

Dès 1932, une usine pétrochimique fabriquant du plastique, installée en 1907, rejette de nombreux résidus de métaux lourds dans la baie de Minamata. L'oxyde de mercure sert de catalyseur dans la synthèse de l'éthanal. Bien que l'oxyde de mercure rejeté agît très peu sur les organismes vivants, la salinité de l'eau et l'activité bactérienne des micro-organismes marins transforment l'oxyde de mercure en méthylmercure, très toxique au contraire de l'oxyde de mercure. Vingt ans plus tard, les premiers symptômes apparaissent plus particulièrement dans les familles de pêcheurs. Suite à la consommation de poissons, 111 victimes et 400 cas de problèmes neurologiques sont recensés entre 1953 et 1965. Même si en 1959, un médecin de la firme acquiert la certitude que les troubles observés sont liés à la pollution mercurielle, les déversements continueront jusqu'en 1968, date à laquelle un procédé plus moderne, moins coûteux et accessoirement moins polluant est mis au point. Entre 1932 et 1968, pas moins de 81 tonnes de mercure sont rejetées dans l'eau. Des analyses révèlent des concentrations en mercure dans les sédiments pouvant atteindre plus de 2 g/kg et 0,15 g/kg de méthylmercure dans les vases. Les principaux symptômes sont des dysfonctionnements du système nerveux : restriction du champ visuel, altération de la parole, de l'audition et de la marche, tremblements, modifications du comportement, malformations des nouveau-nés. 39 ans plus tard, la « maladie de Minamata », intoxication par des composés mercuriels, est officiellement diagnostiquée chez 2 252 patients, plus de 1 000 personnes sont mortes. En 1996, les victimes sont indemnisées. En 2004, la Cour Suprême du Japon rend responsable de cette contamination le gouvernement central et celui de la préfecture de Kumamoto.

Source : ARIA – Contamination chronique par le mercure.

Voici les principaux métaux toxiques et leurs effets :

- ▶ **Le mercure (Hg).** Le mercure est un neurotoxique puissant qui peut affecter le cerveau, les reins et le système nerveux. L'exposition à des niveaux élevés de mercure peut entraîner des tremblements, des troubles de la mémoire, de la coordination et des problèmes d'audition.
- ▶ **Le plomb (Pb).** Le plomb peut affecter presque tous les organes du corps, mais il est particulièrement nocif pour le système nerveux, en particulier chez les enfants (maladie du saturnisme). Il peut causer des troubles du développement, des déficits cognitifs, des troubles de la mémoire et des douleurs abdominales.

Chez les adultes, il est lié à l'hypertension artérielle, des problèmes rénaux et des troubles cardiovasculaires. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande de réduire autant que possible l'exposition au plomb.



Figure 6. Le saturnisme – source : <https://www.bretagne.ars.sante.fr/le-saturnisme>.

- ▶ **L'arsenic (As).** L'arsenic peut causer des cancers de la peau, du poumon, de la vessie et du foie. Il peut également affecter la fonction cardiovasculaire et les organes internes, y compris les reins. L'exposition à long terme peut provoquer des troubles neurologiques et endommager l'ADN.
- ▶ **Le cadmium (Cd).** Le cadmium est principalement toxique pour les reins car il peut causer des maladies rénales chroniques. Il est également associé à des effets sur les os et à un risque accru de cancer, en particulier du poumon. L'exposition prolongée peut affecter la fertilité.
- ▶ **Le nickel (Ni).** Bien que la fonction biologique du nickel ne soit pas bien connue chez l'Homme, le nickel est un oligo-élément nécessaire en petites quantités. Il peut être toxique à des concentrations plus élevées. Il peut causer des réactions allergiques cutanées, des troubles respiratoires et affecter le foie et les reins.

CONCLUSION

Les ions métalliques jouent un rôle crucial dans notre alimentation, car ils sont indispensables au bon fonctionnement de nombreuses fonctions biologiques. Des éléments tels que le fer, le calcium, le magnésium, le zinc et le cuivre sont présents dans nos aliments et sont essentiels pour des processus comme la production d'énergie, la formation de l'ADN, le transport du dioxygène et le soutien du système immunitaire. Toutefois, leur quantité doit être régulée avec précision : des carences peuvent entraîner des troubles de santé graves, comme l'anémie ou des troubles osseux, tandis qu'un excès peut devenir toxique, affectant des organes vitaux tels que les reins ou le foie. L'alimentation équilibrée est donc essentielle pour maintenir des niveaux appropriés de ces ions métalliques, à travers une variété d'aliments, y compris les légumes, les fruits, les céréales, les légumineuses, ainsi que les produits d'origine animale. Une prise en compte des apports journaliers recommandés permet ainsi de prévenir des risques nutritionnels. Les pratiques agricoles, le type de sol, les méthodes de traitement et la gestion des ressources en eau peuvent tous influencer la quantité de métaux présents dans nos aliments. Il est donc important de surveiller ces facteurs pour limiter l'exposition aux métaux lourds. La recherche médicale sur les maladies pouvant surgir en raison d'un excès de métaux dans notre corps permettant de créer des médicaments abaissant ces taux est très prometteuse.

POUR EN SAVOIR PLUS

La lecture des diverses vidéos des conférences du colloque « Chimie et alimentation » du 12 février 2025 est une source d'information très importante sur ce thème.

- ▶ sur la vitamine C (sur Mediachimie) : Pourquoi la vitamine C est-elle indispensable ?
- ▶ sur le cuivre et la maladie d'Alzheimer : article du CNRS
- ▶ sur le saturnisme : Agence Régionale de Santé - Bretagne
- ▶ sur les sources d'exposition au plomb : ministère de la Santé

Éric Bausson est professeur de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen