
Le fer

Pour des raisons de qualité esthétique ou organoleptique, l'objectif fixé pour la proportion du fer dans l'eau potable est de $\leq 0,3 \text{ mg/L}$ ($\leq 300 \text{ }\mu\text{g/L}$).

Généralités

En abondance, le fer est le quatrième élément dans l'écorce terrestre et le premier parmi les métaux lourds. On le trouve surtout sous forme de Fe (II) ou de Fe (III).

Les principaux minerais de fer d'importance commerciale sont la magnétite, la sidérite, la limonite et l'hématite. Les plus grands gisements de minerai de fer au Canada sont situés en Ontario, au Québec et à Terre-Neuve. En 1984, plus de 40 millions de tonnes de minerai ont été extraites, cinq millions ont été importées et près de 31 millions ont été exportées.⁽¹⁾

Au Canada, le minerai de fer sert principalement à la production de l'acier. Ce secteur a consommé plus de 14 millions de tonnes de matières premières en 1984, la moitié étant obtenue à partir de ferraille d'acier et de fer.⁽²⁾ Au Canada, la majorité des fours de fusion et des installations de recyclage de la ferraille sont situés à Hamilton et à Sault-Sainte-Marie, en Ontario, ainsi qu'à Sydney, en Nouvelle-Écosse.⁽²⁾ Le fer est aussi utilisé dans la production de pigments pour la peinture, d'agents de polissage et de produits électriques.

Présence dans l'environnement

On trouve généralement le fer dans les eaux de surface sous forme de sels contenant du Fe(III) lorsque le pH est supérieur à 7. La plupart de ces sels sont insolubles et sont précipités ou adsorbés sur différentes surfaces. Par conséquent, la concentration de fer dans les eaux bien aérées est rarement élevée. En milieu réducteur, comme dans certaines eaux souterraines, certains lacs ou certains réservoirs, et en l'absence de sulfure et de carbonate, on peut trouver du Fe(II) soluble en concentration élevée.⁽³⁾ La présence du fer dans des sources naturelles d'approvisionnement en eau est attribuable à la décomposition de la roche et des minéraux, aux eaux acides de drainage des mines,⁽⁴⁾ aux eaux de lessivage de décharges contrôlées,⁽⁵⁾ aux effluents d'égouts⁽⁶⁾ ainsi qu'aux rejets des secteurs industriels qui traitent le fer.⁽⁷⁾

Au Canada, la concentration de fer dans les eaux de surface est généralement inférieure à 10 mg/L. Les

données obtenues aux stations NAQUADAT entre 1980 et 1985 indiquent que la concentration varie entre moins de 0,001 mg/L et 90,0 mg/L.⁽⁸⁾ Dans le «secteur des lacs expérimentaux», dans le Nord-Ouest de l'Ontario, une concentration moyenne en fer de 0,081 mg/L a été enregistrée en septembre 1973, alors qu'elle était de 0,035 mg/L dans un petit lac acide situé à proximité de Sudbury, en Ontario.⁽⁹⁾ On rapporte une concentration moyenne de 0,12 mg/L en 1976 dans les Grands Lacs; près d'effluents industriels, la concentration variait entre 0,3 et 0,7 mg/L.⁽⁷⁾ En septembre 1985, on a enregistré des concentrations de fer de 0,723 mg/L et de 0,055 mg/L dans le lac Huron (à hauteur de Goderich, Ontario) et dans le lac Supérieur (à hauteur de Thunder Bay, Ontario), respectivement.⁽¹⁰⁾

Des données provenant d'un nombre limité de stations d'eau potable au Canada montrent que la concentration de fer dans l'eau potable est ordinairement inférieure à 1 mg/L et est souvent de moins de 0,3 mg/L.⁽³⁾ La plupart des procédés de traitement de l'eau permettent d'éliminer le fer insoluble, c'est-à-dire la forme principale de fer trouvée dans les systèmes aquatiques. C'est ainsi qu'en Ontario la concentration moyenne de fer dans l'eau brute, échantillonnée à 17 stations au cours de 1985, a été établie à 0,339 mg/L, alors que la concentration moyenne dans l'eau traitée était de 0,046 mg/L.⁽¹⁰⁾

Le fer trouvé en suspension dans l'atmosphère y est généralement entraîné avec les émissions des installations de l'industrie du fer et de l'acier, des centrales thermiques et des incinérateurs.⁽¹¹⁾ Au cours d'une étude sur la qualité de l'air à travers l'Ontario, on a vérifié en 1982 la répartition géographique des métaux à l'état de traces, y compris le fer, dans les précipitations et dans l'air.⁽¹²⁾ On a observé, du Sud au Nord de la province, une tendance générale à la baisse de la concentration de fer dans l'air et dans les précipitations ainsi que dans les dépôts secs et humides. La concentration moyenne dans l'air variait entre 0,110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans le Sud et 0,091 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans le Nord. De façon similaire, la moyenne annuelle des dépôts secs de fer variait entre 36,22 mg/m² dans le Sud et 29,91 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ dans le Nord. La moyenne annuelle des dépôts humides (associés aux précipitations) a varié entre 44,8 mg/m² dans le Sud et 28,1 mg/m² dans le

Nord.⁽¹²⁾ Aux termes d'un relevé étalé sur dix ans, on a observé que la concentration moyenne de fer dans l'air de l'Ontario est restée stable, entre 1981 et 1985, à 0,7 ou 0,8 µg/m³.⁽¹³⁾ L'analyse des particules totales en suspension dans l'air au-dessus d'Edmonton a montré que la concentration moyenne dans l'air avait varié, de novembre 1978 à juillet-août 1979, de 1,66 µg/m³ à 4,10 µg/m³.⁽¹⁴⁾

La teneur en fer des aliments varie considérablement. Les céréales (moyenne : 0,0295 mg/g) et la viande (moyenne : 0,0262 mg/g) sont les principales sources alimentaires de cet élément.⁽¹⁵⁾ La teneur en fer de la plupart des autres aliments naturels est inférieure à 0,020 mg/g.^(16,17) Elle peut être quelque peu supérieure dans les aliments enrichis de fer ou dans ceux qui sont cuits dans des ustensiles en fer.⁽¹⁸⁾ Il semble que la teneur en fer des produits alimentaires diminue à l'ébullition.⁽¹⁹⁾

Exposition des Canadiens

On a pu estimer que l'apport journalier de fer dans un régime alimentaire typique est de 15,4 mg à Halifax,⁽²⁰⁾ de 19,4 mg dans la région de Ottawa-Hull,⁽¹⁵⁾ de 17,6 mg à Winnipeg⁽²¹⁾ et de 17,8 mg à Vancouver.⁽²⁰⁾ La moyenne de ces valeurs est de 17,6 mg; elle est comparable à des estimations (pour les aliments et l'eau) faites aux États-Unis (15 mg)⁽²²⁾ et en Europe (22 mg).⁽¹⁹⁾

Si, par hypothèse, la consommation quotidienne d'eau d'un adulte moyen, au Canada, est de 1,5 L et que la teneur moyenne en fer de l'eau potable est de 0,046 mg/L (la concentration moyenne notée en Ontario en 1985),⁽¹⁰⁾ l'apport de fer contenu dans l'eau potable peut être chiffré pour l'adulte moyen à 0,07 mg environ par jour. On estime qu'en Europe cette valeur est de 0,9 mg.⁽¹⁹⁾ On voit donc que l'apport de fer alimentaire est beaucoup plus important que celui du fer contenu dans l'eau.

À supposer que la concentration moyenne de fer dans l'air soit au Canada de 0,0018 mg/m³ (c'est la moyenne des valeurs enregistrées en Alberta et en Ontario)^(13,14) et que le volume respiratoire quotidien d'un adulte moyen est de 20 m³, l'apport quotidien du fer contenu dans l'air serait chez un adulte de 0,036 mg. Aux États-Unis, cette valeur serait de 0,084 mg.⁽²²⁾

Compte tenu de ce qui précède, on peut estimer que l'absorption quotidienne totale du fer contenu dans les aliments, l'air et l'eau serait de 18 mg pour un adulte moyen.

Méthodes d'analyse et techniques de traitement

Il est possible de déterminer la concentration du fer dans l'eau par spectrométrie d'absorption atomique ou

par colorimétrie. Avec ces méthodes, la limite de détection la plus basse est de 10 µg/L.⁽²³⁾

Il est assez courant d'extraire le fer contenu dans l'eau provenant de sources souterraines d'approvisionnement; on extrait souvent le manganèse en même temps. L'extraction du fer consiste le plus souvent en l'oxydation du Fe(II), soluble, à la forme Fe(III), insoluble, au moyen du chlore, du permanganate de potassium ou de l'ozone, employés comme oxydants.^(24,25) Cette opération est suivie d'une séparation liquide/solide, qui consiste ordinairement en une simple filtration; on pratique parfois une décantation avant la filtration.⁽²⁶⁾ Les stations de purification de l'eau de surface équipées pour extraire les matières qui sont à l'origine de la turbidité de l'eau vont généralement réduire la concentration de fer jusqu'à un niveau acceptable tant et aussi longtemps que le fer n'est pas complexé avec des matières organiques ou des silices naturelles.⁽²⁶⁾

Effets sur la santé

Besoins essentiels

Le fer est un élément essentiel à la nutrition; il entre dans la composition des cytochromes, des porphyrines et des métalloenzymes. Les besoins nutritionnels en fer varient selon le sexe et l'âge des personnes; les enfants en bas âge ou plus âgés et les femmes en âge de procréer sont les plus exposés à des carences en fer. Les apports nutritionnels recommandés pour les Canadiens indiquent que, chez les adultes, les hommes ont besoin de huit mg de fer par jour, les femmes en âge de procréer, de quatorze et les femmes post-ménopausées, de sept.^{(27)*}

Les carences en fer peuvent avoir certains effets, notamment une insuffisance du développement mental et de l'activité chez l'enfant,⁽²⁸⁾ un taux élevé de catécholamines et une tendance à l'agitation chez l'enfant,⁽²⁹⁾ une perte de rendement au travail chez l'adulte et, dans les cas graves, l'anémie et une oxygénation compromise.⁽³⁰⁾

Absorption, distribution et excrétion

L'absorption du fer est très variable et dépend de la quantité et de la forme chimique du fer dans le régime, des réserves en fer de l'organisme et de la présence d'autres substances dans le régime, notamment le calcium, la phytine et les phosphates. En outre, on observe d'importants écarts selon l'âge et le sexe. L'absorption varie entre 1 et 70 % durant la première

* Un rapport du ministère de la Santé nationale et du Bien-être social (*Recommandations sur la nutrition. Rapport du comité de révision scientifique*), publié en 1990, fixe à 9,0, 13 et 8,0 mg par jour, pour les hommes, les femmes en âge de procréer et les femmes

post-ménopausées, respectivement, les apports alimentaires recommandés au Canada pour ce qui est du fer.

année de vie et se stabilise vers 10 % chez les jeunes enfants. En moyenne, les adultes absorbent 6,5 % du fer (soit entre 3 et 10 %) et les femmes en absorbent jusqu'à quatre fois plus que les hommes.^(26,31)

Dans le sang, le fer se fixe à la transferrine, qui le transporte jusqu'à la rate, à la moelle osseuse et au foie, qui sont les principaux sites d'entreposage du fer endogène. Dans les cellules réticuloendothéliales du foie, le fer est fixé à l'hémossidérine; dans les cellules parenchymateuses, il est fixé à la ferritine.⁽³²⁾

Puisque le pourcentage d'absorption est bas et que le fer est recyclé par l'organisme, la quantité de fer dans les fèces correspond sensiblement à l'apport de fer dans le régime alimentaire. Moins de 1 mg par jour de fer endogène est perdu par la peau, les fèces et l'urine.⁽³³⁾

Effets toxiques

L'ingestion de grandes quantités de fer produit une hématochromatose; dans cette affection, les mécanismes normaux de régulation n'agissent plus efficacement et il se produit des lésions de tissus par suite de l'accumulation du fer. Cette affection apparaît rarement par suite d'une simple surcharge alimentaire.^(17,34,35) On a toutefois observé, dans certains cas d'alcoolisme, des lésions tissulaires associées à des apports excessifs de fer provenant des boissons alcoolisées. La consommation soutenue d'aliments acides cuits dans des plats en fer a aussi causé, dans certains cas, des lésions tissulaires.⁽³⁵⁾

L'ingestion de grandes quantités de comprimés de fer a déjà provoqué des intoxications chez de jeunes enfants.⁽³⁶⁾ Puisque les comprimés de fer pour adultes contiennent parfois beaucoup plus de fer élémentaire que les comprimés pour enfants, l'ingestion accidentelle, par des enfants, de suppléments de fer destinés aux adultes peut provoquer une intoxication.⁽³⁷⁾ On considère que trois grammes de sulfate de Fe(II) constituent la dose létale pour un enfant de deux ans. La dose létale pour un homme adulte est comprise entre 14 et 17,5 g.⁽³⁸⁾ Il se fait une bonne consommation de suppléments de fer (une étude cite le chiffre de 14 % des femmes préménopausées) sans qu'on rapporte d'effets toxiques, sinon des troubles gastro-intestinaux.⁽³⁹⁾

Il semble que l'on n'a observé aucun signe de toxicité par le fer d'origine alimentaire dans la population en général. Puisque l'absorption est régulée, les organes ne sont généralement pas exposés au fer en forte concentration. Les sources pharmaceutiques de fer et certains états pathologiques tels que l'hématochromatose essentielle⁽⁴⁰⁾ ainsi que la thalassémie majeure (laquelle nécessite bon nombre de transfusions sanguines) conduisent à des concentrations élevées en fer. On a signalé que les personnes souffrant d'une surcharge en fer sont davantage exposées à des néoplasmes.⁽⁴¹⁾

Autres considérations

La présence du fer dans les sources d'approvisionnement en eau pour usage domestique n'est pas souhaitable pour un certain nombre de raisons qui ne sont pas liées directement à la santé.^(26,42,43) Dans les conditions de pH généralement observées dans les sources d'approvisionnement d'eau potable, les sels de Fe(II) sont instables; ils réagissent avec l'eau pour former des hydroxydes insolubles qui séparent sous la forme d'un limon de couleur rouille. Il arrive souvent que l'eau prenne alors un goût désagréable et paraisse impropre à la consommation; elle peut tacher la lessive et les accessoires de plomberie. Dans le réseau d'aqueduc, le fer peut sédimenter dans les conduites principales et abaisser graduellement le débit. Il peut aussi promouvoir la croissance des ferrobactéries; ce sont des microorganismes qui tirent leur énergie de l'oxydation du Fe(II) en Fe(III). Ce phénomène conduit au dépôt d'une pellicule biologique sur la paroi des conduites d'aqueduc. Ces problèmes apparaissent ordinairement lorsque la concentration du fer dépasse 0,3 mg/L.

Les tentatives faites pour établir un seuil de gustation du fer dans l'eau potable ont conduit à des résultats variables, attribuables au caractère subjectif de la perception sensorielle chez l'être humain. Cependant, dans une étude fréquemment citée, Cohen *et al.* signalent que 5 % d'un jury de dégustateurs composé de 15 à 20 membres pouvaient détecter la présence de sulfate ferreux dans l'eau distillée en concentration de 0,04 mg/L, qu'environ 20 % la détectaient en concentration de 0,3 mg/L et que 50 % la détectaient en concentration de 3,4 mg/L.⁽⁴³⁾

Justification

1. Le fer est un élément essentiel à la nutrition. Au Canada, les aliments en contiennent généralement plus qu'il n'en faut pour satisfaire les besoins quotidiens minimaux. L'ingestion de grandes quantités de fer a des effets toxiques, mais rien n'indique que la concentration de fer communément observée dans les aliments et l'eau potable constitue un danger pour la santé. Par conséquent, une concentration maximale acceptable n'a pas été déterminée.

2. En concentration supérieure à 0,3 mg/L, le fer peut tacher la lessive et les appareils de plomberie et donner un goût déplaisant aux boissons. La précipitation du fer en excès donne à l'eau une couleur rouge brun désagréable. Le fer peut aussi stimuler la multiplication de certains microorganismes qui finissent par former une pellicule biologique dans les conduites d'aqueduc.

3. En général, une petite partie de la population seulement pourra déceler le goût du fer dans l'eau potable en concentration inférieure à 0,3 mg/L.

4. Au plan de la qualité esthétique ou organoleptique, l'objectif fixé pour le fer dans l'eau potable est de $\leq 0,3$ mg/L.

Références bibliographiques

- Boyd, B.W. Iron ore. Dans : Annuaire des minéraux du Canada 1983-84. Aperçu et perspectives. Direction des ressources minérales, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa (1985).
- McInnis, R. Iron and steel. Dans : Annuaire des minéraux du Canada 1985. Direction des ressources minérales, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa (1986).
- Hem, J.D. Chemical factors that influence the availability of iron and manganese in aqueous systems. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 140 : 17 (1972).
- Bell, A.V. Base metal mine waste management in Canada. Dans : Minerals and the environment. Institute of Mining and Metallurgy, Londres, R.-U. (1975).
- James, S.C. Metals in municipal landfill leachate and their health effects. Am. J. Public Health, 67 : 429 (1977).
- Oliver, B.G. et Cosgrove, E.G. Metal concentrations in the sewage, effluents and sludges of some southern Ontario wastewater treatment plants. Environ. Lett., 9 : 75 (1975).
- Conseil de la qualité de l'eau des Grands Lacs. Fourth annual report, p. 45 (1976).
- Base nationale de données sur la qualité des eaux (NAQUADAT). Direction de la qualité des eaux, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada (1985).
- Beamish, R.J. et Van Loon, J.C. Precipitation loading of acid and heavy metals to a small acid lake near Sudbury, Ontario. J. Fish. Res. Board Can., 34 : 649 (1977).
- Ministère de l'Environnement de l'Ontario. Drinking water monitoring data. Inédit (1987).
- Sullivan, R.J. Air pollution aspects of iron and its compounds. Contract prepared by Litton Systems, Bethesda, MD, for the National Air Pollution Control Administration, U.S. Department of Health, Education and Welfare. Contract No. PH-22-68-25. National Technical Information Service, publ. n° 188088 (1969).
- Chan, W.H., Tang, A.J.S., Chung, D.H.S. et Lusic, M.A. Concentration and deposition of trace metals in Ontario — 1982. Water Air Soil Pollut., 29 : 373 (1986).
- Ministère de l'Environnement de l'Ontario. Annual report on air quality in Ontario (Appendix). Air Quality Assessment Unit, Etobicoke (1987).
- Klemm, R.F. et Gray, J.M.L. A study of the chemical composition of particulate matter and aerosols over Edmonton. Rep. RMD 82/9, prepared for the Research Management Division by the Alberta Research Council. 125 pp. (1982).
- Méranger, J.C. et Smith, D.C. The heavy metal content of a typical Canadian diet. Can. J. Public Health, 63 : 53 (1972).
- Gormican, A. Inorganic elements in foods used in hospital menus. J. Am. Diet Assoc., 56 : 397 (1976).
- Watt, B.K. et Merrill, A.L. Composition of foods — raw, processed, prepared. Revised Agriculture Handbook 8, U.S. Department of Agriculture (1963).
- Bowering, J. et Macpherson Sanchez, A. A conspectus of research on iron requirements of man. J. Nutr., 106 : 985 (1976).

19. Zoeteman, B.C.J. et Brinckman, F.J.S. Intake of minerals by man. Dans : Hardness of drinking water and public health. Proceedings of the European Scientific Colloquium, Luxembourg, 1975. Pergamon Press, Oxford, U.K. (1976).
20. Kirkpatrick, D.C. et Coffin, D.E. The trace metal content of representative Canadian diets in 1970 and 1971. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.*, 7(1) : 56 (1974).
21. Kirkpatrick, D.C. et Coffin, D.E. The trace metal content of a representative Canadian diet in 1972. *Can. J. Public Health*, 68 : 162 (1977).
22. Heavy metals in the environment. Oregon State University Seminar, janvier (1973).
23. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16^e édition. American Public Health Association, Washington, DC (1985).
24. Clark, J.W., Viessman, W., Jr. et Hammer, M.J. Water supply and pollution control. 3^e édition. Harper & Row Publishers, New York, NY, 857 pp. (1977).
25. Walker, R. Water supply, treatment and distribution. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 420 pp. (1978).
26. Conseil canadien des ministres des ressources et de l'environnement. Recommandations pour la qualité des eaux au Canada. Environnement Canada, Ottawa (1987).
27. Santé et Bien-être social Canada Apports nutritionnels recommandés pour les Canadiens, Committee for Revision of the Canadian Dietary Standard, Ottawa, (1983).
28. Anonyme. Iron deficiency and mental development. *Nutr. Rev.*, 41 : 235 (1983).
29. Voorhess, M.L., Stuart, M.J., Stockman, J.A. et Oski, F.A. Iron deficiency anemia and increased urinary iron epinephrine excretion. *J. Pediatr.*, 86 : 542 (1975).
30. Sproule, B.J., Mitchell, J.H. et Miller, W.F. Cardiopulmonary physiological response to heavy exercise in patients with anemia. *J. Clin. Invest.*, 39 : 378 (1960).
31. International Commission on Radiological Protection. Report No. 23: Report of the Task Group on Reference Man. Pergamon Press, Oxford, U.K., 411 pp. (1984).
32. Hershko, C. Storage iron regulation. Dans : Progress in haematology. Vol. 10, E. B. Brown (dir. de publ.). Grune and Stratton, New York, NY. p. 105 (1977).
33. Green, R., Charlton, R., Seftel, H., Bothwell, T., Mayet, F., Adams, B., Finch, C. et Layrisse, M. Body iron excretion in man. A collaborative study. *Am. J. Med.*, 45 : 336 (1968).
34. Hopps, H. C. Ecology of disease in relation to environmental trace elements — particularly iron. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 340 : 1 (1972).
35. Jacobs, A. Iron overload — clinical and pathologic aspects. *Semin. Haematol.*, 14 : 89 (1977).
36. Stein, M., Blayney, D., Feit, T., Goegen, T. G., Micik, S. et Nyhan, W. L. Acute iron poisoning in children. *West. J. Med.*, 125 : 289 (1976).
37. Steinhardt-Bour, N.J., Soullier, B.A. et Zemel, M.B. Effect of level and form of phosphorus and level of calcium intake on zinc, iron and copper bioavailability in man. *Nutr. Res.*, 4 : 371 (1984).
38. National Academy of Sciences. Recommended dietary allowances. 9^e édition. National Academy Press, Washington, DC (1980).
39. Gibson, R.S., Martinez, O., et MacDonald, A.C. Available dietary iron intakes of a selected sample of pre- and post-menopausal Canadian women. *Nutr. Res.*, 4 : 315 (1984).
40. Powell, L.W., Bassett, M.L. et Halliday, J.W. Hemochromatosis update. *Gastroenterology*, 78 : 374 (1980).
41. Weinberg, E.D. Iron and neoplasia. *Biol. Trace Elem. Res.*, 3 : 55 (1981).
42. Dillman, E., Gale C., Green, W.E., Johnson, D.G. Mackler B. et Finch, C. Hypothermia in iron deficiency due to altered tricodthyronine metabolism. *Am. J. Physiol.*, 239(R) : 377 (1980).
43. Cohen, J.M., Lamphake, L.J., Harris, E.K. et Woodward, R.L. Taste threshold concentrations of metals in drinking water. *J. Am. Water Works Assoc.*, 52 : 660 (1960).