
Le zinc

L'objectif de qualité esthétique pour le zinc est $\leq 5,0$ mg/L. Le zinc est un élément essentiel qui n'est généralement pas considéré comme toxique. L'apport alimentaire de zinc suffit amplement à satisfaire l'apport quotidien recommandé. Du point de vue nutritionnel, l'eau potable n'est pas considérée comme une source importante de cet élément. L'eau renfermant des teneurs en zinc supérieures à 5,0 mg/L a tendance à être opalescente, à laisser une pellicule grasseuse après ébullition et à prendre un goût indésirable à cause de son astringence.

Généralités

Le zinc est un élément abondant qui constitue à peu près 0,004 pour cent de la croûte terrestre.⁽¹⁾ La forme minérale la plus commune du zinc est la sphalérite (ZnS), qui est souvent associée aux sulfures de certains autres éléments métalliques tels que le plomb, le cuivre, le cadmium et le fer.⁽²⁾ Le zinc se rencontre aussi sous forme de calamine (ZnCO₃) dans les sédiments carbonatés; les autres formes du zinc sont habituellement des produits d'oxydation de la sphalérite.^(2,3)

Les minerais et les concentrés produits au Canada au cours de 1984 renfermaient 1 207 098 tonnes de zinc; la consommation de zinc au pays s'élevait à 150 528 tonnes.⁽⁴⁾ Les réserves de zinc que renferment les gisements canadiens connus ont été évaluées à 20 492 700 tonnes.⁽⁴⁾ Au Canada, le zinc sert surtout à la galvanisation du fer et de l'acier; représentant en 1984, 40 pour cent de la consommation de zinc. Une autre tranche de 20 pour cent était destinée à la production d'accessoires de plomberie et de chauffage en laiton, alors qu'une proportion de 15 pour cent servait, dans l'industrie du moulage en coquille, à produire des pièces de quincaillerie utilisées en construction ainsi que des accessoires d'automobiles.⁽⁵⁾ La consommation restante de zinc est répartie entre un grand nombre d'industries. L'oxyde de zinc sert à la fabrication de peinture, de caoutchouc, de rayonne, de fils, d'encres, d'allumettes et de produits chimiques; la «poussière» de zinc est utilisée en imprimerie ou pour teindre les tissus, purifier les graisses, ou cémenter les métaux dans des procédés métallurgiques; le zinc laminé est utilisé dans les pièces ornementales et les batteries; finalement, des sels de

zinc servent à la préparation d'agents de conservation du bois et de pesticides.

Présence dans l'environnement

Les émissions industrielles et domestiques contribuent beaucoup à la quantité de zinc présente dans l'environnement tant aquatique qu'atmosphérique. Durant l'année 1972, la production primaire de fer et d'acier fut responsable de l'émission de 2 690 tonnes de zinc (sous forme d'oxyde de zinc) dans l'atmosphère canadienne. Les quantités émises par la production primaire de cuivre et de zinc étaient semblables (2 290 tonnes). L'ensemble des émissions industrielles de zinc s'élevait à 6 340 tonnes. La combustion de carburant (charbon et huiles lourdes) dans un appareil fixe y ajoutait encore 134 tonnes. Les transports, l'incinération de déchets solides et l'épandage de pesticides étaient respectivement responsables de l'émission de 794, de 124 et de 1,8 tonnes de ce métal. L'ensemble des émissions de toute origine s'élevait en 1972 à 7 400 tonnes.⁽⁵⁾

D'après des évaluations faites après une étude réalisée en 1980, la contribution respective des sources naturelles et anthropiques de zinc dans l'environnement s'élevait cette année-là à 768 000 et à 414 000 tonnes.⁽⁶⁾

Le dosage du zinc dans les matières particulaires en suspension dans l'air au-dessus des régions urbaines a montré l'existence de concentrations variant entre 0,32 mg/g à Toronto à 5,40 mg/g à Vancouver.⁽⁷⁾ Dans les poussières, le long des quais de Toronto, les teneurs atteignaient même 6 mg/g.⁽⁸⁾

Le dosage des matières particulaires totales en suspension dans l'air au-dessus d'Edmonton durant 1978 et 1979 a laissé voir une concentration moyenne de 0,085 µg/m³ qui variait peu avec la saison. Dans un cas, en novembre 1978, cette concentration atteignait 0,6 µg/m³, peut-être à cause d'émissions fugitives venant des incinérateurs.⁽⁹⁾

Une étude réalisée en 1982 dans l'ensemble de l'Ontario portait sur le contrôle des métaux (y compris le zinc) sous forme de traces dans l'air et les précipitations, de façon à en établir la distribution spatiale.⁽¹⁰⁾ La concentration atmosphérique moyenne de zinc variait de 0,019 µg/m³ dans le sud à 0,007 µg/m³ dans le nord.

De façon similaire, les retombées sèches annuelles de zinc allaient de 1,51 µg/m² dans le sud à 0,51 µg/m² dans le nord. La concentration moyenne de zinc dans les précipitations annuelles passait de 0,0083 mg/L dans le sud à 0,0055 mg/L dans le nord.⁽⁸⁾ Les concentrations de métaux sous forme de traces dans l'ensemble de l'Ontario avaient généralement tendance à diminuer dans la direction sud-nord. La quantité de zinc trouvée dans les précipitations est un indice de la présence ou de l'absence d'installations dont l'exploitation entraîne l'émission de zinc. Près de Sudbury en Ontario, la concentration moyenne de zinc dans les précipitations était de 0,028 mg/L en 1972–1973; toutefois, une pointe de 120 mg/L fut atteinte au cours d'une précipitation.⁽¹¹⁾ Aux États-Unis, la concentration moyenne de zinc dans les pluies était de 0,107 mg/L.⁽¹²⁾

Dans des échantillons de neige non polluée prélevés dans une région éloignée du nord du Manitoba, les concentrations de zinc étaient inférieures à 0,001 mg/L.⁽¹¹⁾

La concentration moyenne de zinc dans le sol est de 90 mg/kg au Canada.⁽⁷⁾ Une valeur analogue a été trouvée dans des sols du Nouveau-Brunswick ne renfermant pas de minerais sulfurés.⁽¹³⁾ Dans des sols représentatifs d'endroits industrialisés du Canada, la teneur en zinc variait de 106 à 2 095 mg/kg (la valeur maximale ayant été observée à Toronto).⁽⁸⁾ Des échantillons de sols urbains recueillis à Vancouver et à Toronto renfermaient des teneurs respectives en zinc de 395 et de 220 mg/kg.⁽⁷⁾

Les carbonates, les oxydes et les sulfures de zinc sont peu solubles dans l'eau; par conséquent, les concentrations de zinc présentes dans les eaux naturelles sont faibles. Les chlorures et les sulfates, qui sont très solubles, y sont hydrolysés en hydroxydes et en carbonates. Les teneurs en zinc dissous sont encore diminuées par adsorption sur les hydrolysats sédimentaires.⁽³⁾

Au cours de la période allant de 1980 à 1985, la concentration de zinc des eaux de surface canadiennes variait de 0,001 mg/L à un maximum de 1,17 mg/L.⁽¹⁴⁾ L'analyse des eaux de plusieurs lacs de l'Ontario (servant à l'approvisionnement en eau potable) a révélé qu'elles avaient une teneur moyenne en zinc inférieure à 0,010 mg/L.⁽¹⁵⁾

Une étude des eaux fluviales du centre et de l'ouest du Canada a révélé que les teneurs en zinc variaient fortement, aussi bien selon l'endroit que selon la saison. La plage de cette variation allait de 0,001 à 0,096 mg/L, les teneurs maximales ayant été observées dans la rivière des Esclaves dans les Territoires du Nord-Ouest; normalement, les concentrations présentes dans les eaux fluviales ne dépassent pas 0,04 mg/L.⁽¹⁶⁾

L'eau du robinet peut renfermer des concentrations de zinc beaucoup plus élevées que les eaux de surface par suite de la lixiviation du zinc dans les tuyaux

galvanisés, les réservoirs à eau chaude et les garnitures en laiton.⁽¹⁷⁾

Une enquête réalisée dans l'ensemble du pays sur les réseaux de distribution en eau potable a permis de trouver que la teneur moyenne en zinc des échantillons d'eau brute, d'eau traitée et d'eau distribuée dépassait rarement 0,01 mg/L. Toutefois, l'accumulation de zinc dans l'eau était fréquente pendant sa circulation dans les réseaux de distribution. Au Nouveau-Brunswick et en Saskatchewan, ce phénomène était négligeable; par contre, en Colombie-Britannique et au Québec, on notait que plus de la moitié des réseaux de distribution favorisaient l'accumulation de zinc.⁽¹⁸⁾

Des données récentes recueillies en Ontario sont venues corroborer ces observations. En effet, la première eau tirée du robinet après avoir séjourné dans les conduites pendant la nuit renfermait des teneurs en zinc qui étaient parfois 100 fois supérieures à celles de l'eau traitée. Ainsi, à Gananoque sur le fleuve Saint-Laurent, les eaux traitées avaient une concentration en zinc inférieure à 0,01 mg/L en 1986, alors que leur teneur moyenne après stagnation pendant la nuit était 0,309 mg/L (plage de 0,03 à 1,17 mg/L) à sept postes d'échantillonnage. Après que l'eau eut coulé pendant cinq minutes, les échantillons avaient une teneur moyenne en zinc de 0,014 mg/L.⁽¹⁵⁾

Étant donné la valeur nutritive de cet élément, plusieurs études ont été entreprises afin de déterminer la teneur en zinc de certains aliments et de régimes alimentaires complets. Deux études ont été réalisées dans le but de trouver la teneur en zinc de régimes alimentaires typiques du Canada. D'après ces études, la viande, le poisson, la volaille, les céréales, les huiles et les graisses possèdent les teneurs les plus élevées; de plus, ce sont la viande, le poisson et la volaille qui contribuent le plus à l'apport alimentaire quotidien.^(19,20)

Exposition des Canadiens

On estime que l'apport quotidien moyen d'un «régime alimentaire canadien représentatif» varie de 15,2 à 19,9 mg.^(19,20) L'apport quotidien moyen signalé pour un homme «normal» est de 12 mg;⁽⁷⁾ alors que d'autres estiment que l'apport quotidien normal varie de 13,0 à 16,1 mg.⁽²¹⁾

D'après une étude portant sur les métaux présents sous forme de traces dans les réseaux de distribution d'eau potable, qui a été réalisée à l'échelle nationale en 1981, l'apport quotidien moyen de zinc d'un Canadien adulte provenant de l'eau potable a été évalué à ≤13,0 µg/jour.⁽¹⁸⁾ Par contre, au cours d'une étude effectuée en 1984, cette valeur variait de 33,8 à 97,5 µg/jour, mais on a trouvé qu'elle dépendait fortement de la méthode d'échantillonnage.⁽²²⁾

Si l'on suppose que la concentration atmosphérique de zinc au Canada est, en moyenne, de 0,035 µg/m³ et

que le volume respiratoire quotidien est de 20 m³, l'apport quotidien provenant de l'atmosphère serait de 0,7 µg.

Compte tenu de considérations exprimées ci-dessus, l'apport quotidien total de zinc tiré des aliments, de l'air et de l'eau potable est évalué à environ 16 mg, les aliments contribuant à plus de 99 pour cent de cet apport.

Effets sur la santé

Besoins essentiels

Le zinc est un élément essentiel pour tous les organismes vivants, y compris l'homme. Des protéines et des enzymes renfermant du zinc participent à tous les aspects du métabolisme, entre autres à la réplication et à la traduction du matériel génétique.⁽²³⁾ On a identifié près de 200 enzymes renfermant du zinc chez toutes les espèces.⁽²⁴⁾ Parmi les enzymes renfermant du zinc qui sont bien caractérisées, on peut citer l'anhydrase carbonique, l'aspartase, la transcarbamylyase et l'alcool-déshydrogénase.

L'apport nutritionnel recommandé (ANR) pour les Canadiens est de 2 mg/jour pour les bébés, de 3 à 7 mg/jour pour les enfants jusqu'à l'âge de 12 ans et de 9 mg/jour pour les garçons et 8 mg/jour pour les filles à partir de 13 ans.⁽²⁵⁾ Aux États-Unis, l'apport quotidien recommandé (RDA) est de 15 mg/jour pour un adulte.⁽²⁶⁾

Les carences en zinc s'observent le plus souvent dans des pays où les principales sources de protéines sont les céréales; en effet, l'absorption du zinc à partir de celles-ci peut être limitée par leur forte teneur en phosphates et en phytates.⁽²⁷⁾ Toutefois, aux États-Unis, on a aussi diagnostiqué des carences en zinc chez certains enfants.⁽²⁸⁾ C'est dans les segments de la population qui ont les plus grands besoins en zinc (p. ex., les bébés, les adolescents et les femmes enceintes) que la probabilité d'une carence en zinc est la plus élevée.⁽²⁹⁾

Parmi les symptômes généraux indiquant une carence en zinc chez les humains, on peut citer le retard de croissance, l'hypogonadisme, l'anorexie, la léthargie, les modifications cutanées et la cécité nocturne.⁽²⁷⁾ Une carence en zinc peut aussi affaiblir le système immunitaire,⁽³⁰⁻³²⁾ ralentir la guérison des blessures^(27,33) et provoquer l'eczéma⁽³⁴⁾ et l'acné.^(35,36) On a aussi insisté sur l'importance du zinc dans le développement et le fonctionnement du cerveau.⁽³⁷⁾ On a signalé récemment un certain degré de carence en zinc chez les enfants hyperactifs.⁽³⁸⁾

Absorption

Chez les humains, le zinc est absorbé dans l'intestin grêle par un mécanisme à médiation par le vecteur.⁽³⁹⁾ La fraction de zinc absorbé est difficile à déterminer, car cet élément est aussi sécrété dans l'intestin. En général,

on admet que l'absorption du zinc chez les humains est, en moyenne, de 33 pour cent,^(25,40,41) bien que sa biodisponibilité puisse être plus grande à partir de l'eau potable que des aliments.⁽⁴²⁾ L'absorption de zinc augmente en fonction des apports alimentaires jusqu'à un taux maximal indiquant une médiation jusqu'à saturation des vecteurs responsables.⁽⁴³⁾ En outre, le bilan du zinc peut influencer sur l'absorption de ce métal. Son efficacité d'absorption augmente chez les humains qui en sont privés, alors qu'elle diminue chez ceux qui ont une alimentation riche en zinc.

On a signalé quelque 20 facteurs qui influent, tant du point de vue régulation qu'alimentation, sur l'absorption du zinc⁽³⁹⁾ et dont l'un des plus importants est la teneur en phytates (hexaphosphate de myo-inositol).⁽⁴⁴⁾ La biodisponibilité du zinc des céréales et des légumineuses est fortement réduite par leur teneur en phytates,^(40,45) bien que certaines composantes des fibres alimentaires puissent aussi réduire l'absorption du zinc.^(46,47) L'ingestion de phytates, en particulier en présence de calcium,⁽⁴⁸⁾ réduit l'absorption du zinc par formation de précipités insolubles.

À fortes doses, il semble qu'il y ait antagonisme entre l'absorption du zinc et celle du fer.^(49,50) De plus, la présence dans l'alimentation de teneurs trop grandes aussi bien en étain qu'en cuivre peut diminuer l'absorption du zinc.⁽⁵¹⁻⁵⁴⁾

Répartition

Le zinc absorbé à partir de l'intestin se lie à l'albumine; il est ensuite transporté sous cette forme jusqu'au foie.⁽⁵⁵⁾ Dans l'appareil circulatoire, de 80 à 90 pour cent du zinc présent dans le sang entier se trouve dans les érythrocytes,⁽⁵⁶⁾ où il est largement fixé à l'anhydrase carbonique.⁽⁴⁹⁾ Le reste du zinc plasmatique est principalement lié à l'albumine, bien que le zinc soit aussi fixé par d'autres protéines et des acides aminés libres.⁽⁵⁷⁾ Une faible portion seulement du zinc plasmatique existe sous forme ionique.

Les tissus organiques ayant une forte teneur en zinc sont, entre autres, les os, le foie, les reins, le pancréas, la rétine et la prostate.^(58,59) Le stress peut entraîner une nouvelle répartition du zinc.⁽⁶⁰⁾

Excrétion

L'excrétion du zinc se fait principalement par le tube digestif sous forme de zinc alimentaire non absorbé, de zinc endogène sécrété dans le tube digestif et de zinc venant de la desquamation des cellules muqueuses.⁽⁶¹⁾ Les mécanismes d'excrétion contribuent à l'homéostasie du zinc; toutefois, le principal mécanisme homéostatique est la régulation de l'absorption du zinc. Dans des circonstances normales, environ 0,5 mg de zinc peut être perdu chaque jour par la sueur⁽⁶²⁾ de même que dans les urines. Bien que les

néphrons semblent capables de sécréter et de réabsorber le zinc, la teneur des urines en cet élément ne semble pas fluctuer en fonction de l'alimentation.⁽⁶³⁾ On a cependant signalé que des régimes à forte teneur en protéines provoquaient une augmentation du zinc urinaire.⁽⁶⁴⁾

Effets toxiques

Aucune toxicité n'a été signalée pour le zinc d'origine alimentaire, bien que l'exposition professionnelle⁽⁶⁵⁾ ou les interventions pharmacologiques⁽⁶⁶⁾ puissent produire des symptômes. Des effets tératogènes ont été signalés chez le mouton⁽⁶⁷⁾ ainsi qu'une rupture du métabolisme du cholestérol chez l'homme;^(68,69) ces deux manifestations seraient attribuables aux effets nocifs de fortes concentrations de zinc sur le métabolisme du cuivre. Le bilan du cuivre devrait donc être surveillé chez les personnes ayant une alimentation riche en zinc. On a signalé que les réactions immunitaires seraient altérées chez l'homme par l'absorption de trop grandes quantités de zinc.⁽⁷⁰⁾

Autres considérations

Des essais visant à déterminer le seuil gustatif ont montré que 5 pour cent de la population peut déceler au goût une concentration de zinc d'environ 5 mg/L.⁽⁷¹⁾ Lorsque sa concentration atteint 40 mg/L, le zinc donne à l'eau un aspect laiteux.⁽⁷²⁾

Justification

1. Le zinc est un élément nutritif essentiel pour l'homme. Les besoins quotidiens varient de 4 à 10 mg selon l'âge et le sexe; toutefois, les femmes enceintes et celles qui viennent d'accoucher peuvent avoir besoin d'une dose de 16 mg/jour. Les aliments constituent la source la plus importante de zinc. L'ingestion de longue durée de quantités dépassant considérablement celles mentionnées n'a entraîné aucun effet nocif. Qui plus est, à cause de la présence de mécanismes d'homéostasie efficaces, il est très peu probable que le zinc puisse engendrer une toxicité chronique. En conséquence, on n'a fixé aucune concentration maximale acceptable pour le zinc dans l'eau potable.

2. Bien que les eaux de surface renferment rarement des concentrations de zinc supérieures à 0,1 mg/L, l'eau du robinet peut renfermer une teneur beaucoup plus élevée à cause de l'utilisation du zinc en plomberie. L'eau contenant des concentrations de zinc supérieures à 5,0 mg/L prend un goût indésirable à cause de son astringence et peut devenir opalescente et former une pellicule grasseuse après ébullition.

3. L'objectif de qualité esthétique pour le zinc dans l'eau potable est donc $\leq 5,0$ mg/L.

Références bibliographiques

1. Browing, E. Toxicity of industrial metals. 2^e édition. Butterworths, Londres. p. 348 (1969).
2. U.S. Environmental Protection Agency. Quality criteria for water. Washington, DC. p. 481 (1976).
3. Hem, J.K. Zinc. Dans : Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Geological Survey Water Supply, renvoi N° 1437, Washington, DC. p. 125 (1970).
4. Gauvin, M.J. Zinc. Dans : L'Annuaire des minéraux du Canada. Direction des ressources minérales, ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (1985).
5. Environnement Canada. National inventory of sources and emissions of zinc (1972). Rapport interne de la DGAA 76-1, Direction générale de l'assainissement de l'air, juin (1976).
6. Taylor, M.C. et Demayo, A. Le zinc. Dans : Lignes directrices concernant la qualité des eaux de surface. Vol. 1. Les substances chimiques inorganiques. Direction générale des eaux intérieures, Direction de la qualité des eaux, Environnement Canada, Ottawa (1980).
7. Warren, H.V. Some trace element concentrations in various environments. Dans : Environmental medicine. G.M. Howe et J.A. Loraine (éditeurs). William Heinemann Medical Books Ltd., Londres. p. 9 (1973).
8. Van Loon, J.C. Toronto's precipitation analysed for heavy metal content. Water Pollut. Control, 111: 38 (1973).
9. Klemm, R.F. et Gray, J.M.L. A study of the chemical composition of particulate matter and aerosols over Edmonton. Rapport RMD 82/9, préparé pour la Research Management Division par l'Alberta Research Council. p. 125 (1982).
10. Chan, W.H., Tang, A.J.S., Chung, D.H.S. et Lusic, M.A. Concentrations and deposition of trace metals in Ontario — 1982. Water Air Soil Pollut., 29: 373 (1986).
11. 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).
12. Lazrus, A.L., Lorange, E. et Lodge, J.P. Lead and other metal ions in United States precipitation. Environ. Sci. Technol., 4: 55 (1970).
13. Presant, E.W. et Tupper, W.M. Trace elements in some New Brunswick soils. Can. J. Soil Sci. 45: 305 (1965).
14. Banque nationale de données sur la qualité des eaux (NAQUADAT). Direction de la qualité des eaux, Direction générale de la qualité des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa (1985).
15. Ministère de l'Environnement de l'Ontario. Survey of water quality in the distribution systems, Ontario 1981–1986. Données non publiées (1987).
16. Environnement Canada. Detailed surface water quality data, Northwest Territories 1980–1981, Alberta 1980–1981, Saskatchewan 1980–1981, Manitoba 1980–1981. Direction générale des eaux intérieures (1984).
17. National Academy of Sciences. Water quality criteria. Vol. 93. Washington, DC (1972).
18. Méranger, J.C., Subramanian, K.S. et Chalifoux, C. Metals and other elements. Int. J. Assoc. Anal. Chem., 64: 44 (1981).
19. Kirkpatrick, D.C. et Coffin, D.E. The trace metal content of representative Canadian diets in 1970 and 1971. J. Inst. Can. Sci. Technol. Aliment., 7: 56 (1974).

20. Méranger, J.C. et Smith, D.C. The heavy metal content of a typical Canadian diet. *Can. J. Public Health*, 62: 53 (1972).
21. Hamilton, E.I. Relations between metal elements in man's diet and environmental factors. *Trace Subst. Environ. Health*, 13: 3 (1979).
22. Méranger, J.C., Subramanian, K.S., Langford, C.H. et Umbrasas, R. Use of an on-site integrated pump sampler for estimation of total daily intake of some metals from tap water. *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 17: 307 (1984).
23. Galdes, A. et Vallée, B.L. Categories of zinc metalloenzymes. *Metal Ions Biol. Syst.*, 15: 2 (1983).
24. O'Dell, B.L. History and status of zinc in nutrition. *Fed. Proc.*, 43: 2821 (1984).
25. Ministère de la Santé nationale et du Bien-être social. Apports nutritionnels recommandés pour les Canadiens. Ottawa (1983).
26. National Academy of Sciences. Recommended daily allowances. 8^e édition. Washington, DC (1974).
27. Prasad, A.S. Clinical biochemical and nutritional spectrum of zinc deficiency in human subjects: an update. *Nutr. Rev.*, 41: 197 (1983).
28. Hambridge, K.M. et Walraevens, P.A. Dans : Trace elements in human health and disease. Vol. 1. A.S. Prasad (éditeur). Academic Press, New York, NY. p. 21 (1976).
29. Pleban, P.A., Numerof, B.S. et Wirth, F.H. Trace element metabolism in the fetus and neonate. *Clin. Endocrinol. Metab.*, 14: 545 (1985).
30. Fraker, P.S., Haas, S.M. et Luecke, R.W. Effect of zinc deficiency on the immune response of young adult A/J mouse. *J. Nutr.*, 107: 1889 (1977).
31. De Pasquale-Jardieu, P. et Fraker, P.J. Interference in the development of a secondary immune response in mice by zinc deprivation: persistence of effects. *J. Nutr.*, 114: 1762 (1984).
32. Baer, M.T., King, J.C., Tamura, T., Morgen, S., Bradfield, R.B., Weston, W.L. et Daugherty, N.A. Nitrogen utilization, enzyme activity, glucose intolerance and leukocyte chemotaxis in human zinc depletion. *Am. J. Clin. Nutr.*, 41: 1220 (1985).
33. Senapati, A. et Thompson, R.P.H. Zinc deficiency and the prolonged accumulation of zinc in wounds. *Br. J. Surg.*, 72: 583 (1985).
34. David, T.J., Wells, F.E., Sharpe, T.C. et Gibbs, A.C.C. Low serum zinc in children with atopic eczema. *Br. J. Dermatol.*, 111: 597 (1984).
35. Fritzherbert, J.C. Acne vulgaris — zinc deficiency? *Med. J. Aust.*, 1: 848 (1976).
36. Pohit, J., Saha, K.C. et Pal, B. Zinc status of acne vulgaris patients. *J. Appl. Nutr.*, 37: 18 (1985).
37. Sandstead, H.H. Zinc: essential for brain development and function. *Nutr. Rev.*, 43: 129 (1985).
38. Barlow, P.J. et Sidani, S.A. Metal imbalance and hyperactivity. *Acta Pharmacol. Toxicol.*, 59: 458 (1986).
39. Cousins, R.J. Absorption, transport and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionein and ceruloplasmin. *Physiol. Rev.*, 65: 238 (1985).
40. Turnland, J.R., King, J.C., Keyes, W.R., Gong, B. et Michel, M.C. A stable isotope study of zinc absorption in young men: effects of phytate and α -cellulose. *Am. J. Clin. Nutr.*, 40: 1071 (1984).
41. Honstead, J.F. et Brady, D.N. The uptake and retention of ^{32}P and ^{65}Zn from the consumption of Columbia River fish. *Health Phys.*, 13: 455 (1967).
42. Van Barneveld, A.A. et Van Den Hamer, C.J.A. Influence of isotope administration mode and of food consumption on absorption and retention of ^{65}Zn in mice. *Trace Subst. Environ. Health*, 16: 196 (1983).
43. Steel, L. et Cousins, R.J. Kinetics of zinc absorption by luminally and vascularly perfused rat intestine. *Am. J. Physiol.*, 248: G46 (1985).
44. House, W.A., Welch, R.M. et Van Campen, D.R. Effect of phytic acid on the absorption, distribution and endogenous excretions of zinc in rats. *J. Nutr.*, 112: 941 (1982).
45. O'Dell, B.L. et Savage, J.E. Effect of phytate on zinc availability. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 103: 304 (1960).
46. Reinhold, J.G., Faradji, B., Abade, P. et Ismail-Beigi, F. Decreased absorption of calcium, magnesium, zinc and phosphorus by humans due to increased fiber and phosphorus consumption as wheat bread. *J. Nutr.*, 106: 493 (1976).
47. Kelsay, J.L., Jacob, R.A. et Prather, E.S. Effect of fiber from fruits and vegetables on metabolic responses of human subjects: III — Zinc, copper and phosphorus balances. *Am. J. Clin. Nutr.*, 32: 2307 (1979).
48. Sandstead, J.J., Dintzis, F. et Johnson, L. Influence of diet fiber, phytate and calcium on human zinc absorption. *Fed. Proc.*, 43: 851 (1984).
49. Crofton, R.W., Gvozdanovic, D. et Agget, P.J. A study of the effect of zinc on iron absorption in Man. *Proc. Nutr. Soc.*, 41: 17 (extr.) (1962).
50. Solomons, N.W. et Jacob, R.A. Studies on the bioavailability of zinc in humans: effect of heme and non-heme iron on absorption of zinc. *Am. J. Clin. Nutr.*, 34: 475 (1981).
51. Valberg, L.S., Flanagan, P.R. et Chamberlain, M.J. Effects of iron, tin and copper on zinc absorption in humans. *Am. J. Clin. Nutr.*, 40: 536 (1984).
52. Johnson, M.A., Baier, J.M. et Greger, J.L. Effect of dietary tin on zinc, copper, iron, manganese and magnesium metabolism of adult males. *Am. J. Clin. Nutr.*, 35: 1332 (1982).
53. Van Campen, D.R. Copper interference with the intestinal absorption of zinc-65 by rats. *J. Nutr.*, 97: 104 (1969).
54. Van Campen, D.R. et Scaife, P.U. Zinc interference with coffee absorption in rats. *J. Nutr.*, 91: 473 (1967).
55. Smith, K.T., Failla, M.L. et Cousins, R.J. Identification of albumin as the plasma carriers for zinc absorption by perfused rat intestine. *Biochem. J.*, 184: 627 (1979).
56. Scott, K.T. et Bradwell, A.R. Identification of the serum binding proteins for iron, zinc, cadmium, nickel and calcium. *Clin. Chem.*, 29: 629 (1983).
57. Vallée, B.L., Lewis, H.D., Attschule, M.P. et Gibson, J.G. The relationship between carbonic anhydrase activity and zinc content of erythrocytes in normal, in anemic and other pathological conditions. *Blood*, 4: 467 (1949).
58. Underwood, E.J. Dans : Trace elements in human and animal nutrition. 4^e édition. E. Underwood (éditeur). Academic Press, New York, NY. p. 196 (1977).
59. Halsted, J.A., Smith, J.C. et Irwin, M.I. Conspectus of research on zinc requirements of man. *J. Nutr.*, 104: 345 (1974).
60. Beisel, W.R., Pekarek, R.S. et Wannemacher, R.W., Jr. Dans : Trace elements in human health and disease. Vol. 1. A.S. Prasad (éditeur). Academic Press, New York, NY. p. 87 (1976).
61. Kirchgessner, M. et Weigand, E. Zinc absorption and excretion in nutrition. *Metal Ions Biol. Syst.*, 15: 319 (1983).

62. Prasad, A.S. Clinical, biochemical and nutritional spectrum of zinc deficiency in human subjects: an update. *Nutr. Rev.*, 41: 197 (1983).
63. Abu-Hamdan, D.K., Migdal, S.O., Whitehorse, R., Rabbani, P., Prasad, A.S. et McDonald, F.D. Renal handling of zinc: effect of cysteine infusion. *Am. J. Physiol.*, 241(F): 487 (1981).
64. Greger, J.L. et Snedeker, S.M. Effect of dietary protein and phosphorus levels on the utilization of zinc, copper and manganese by adult males. *J. Nutr.*, 110: 243 (1980).
65. Papp, J.P. Metal fume fever. *Postgrad. Med.*, 43: 160 (1968).
66. Prasad, A.S., Brewer, G.J., Schoemaker, E.B. et Rabbani, P. Hypocupremia induced by zinc therapy in adults. *J. Am. Med. Assoc.*, 240: 2166 (1978).
67. Campbell, J.K. et Mills, C.F. Toxicity of zinc to pregnant sheep. *Environ. Res.*, 20: 1 (1979).
68. Klevay, L.M. Interactions of copper and zinc in cardiovascular disease. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 355: 140 (1980).
69. Katya-Katya, M., Ensminger, A., Mejean, L. et Derley, G. The effect of zinc supplementation on plasma cholesterol levels. *Nutr. Res.*, 4: 663 (1984).
70. Chandra, R.K. Excessive intake of zinc impairs immune responses. *J. Am. Med. Assoc.*, 252: 1443 (1984).
71. Cohen, J.M., Kamphake, 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).
72. Anderson, E., Reinhard, C. et Hammel, W. The corrosion of zinc in various waters. *J. Am. Water Works Assoc.*, 26: 49 (1934).