

## LES SELS MINÉRAUX CHEZ LES POISSONS : LA SOURCE A-T-ELLE DE L'IMPORTANCE ?

par Antony Jesu Prabhu<sup>1</sup>

Muriel Mambrini-Doudet<sup>(\*)</sup> – Étudier la nutrition minérale des poissons revient à démêler des problématiques particulièrement complexes et imbriquées. Peu d'équipe dans le monde s'y attellent. i) On s'adresse à un nombre d'espèces considérable avec des besoins divers eu égard non seulement aux variations des capacités de stockage liées aux particularités du squelette (proportion et composition) ou aux particularités métaboliques (variabilité des rôles respectifs du foie, du tube digestif), mais aussi aux variations des capacités digestives (présence ou non d'estomac, longueur variable de l'intestin) qui peuvent affecter la disponibilité des sels minéraux alimentaires. ii) Comme pour les autres vertébrés, les minéraux sont un vaste groupe d'éléments, ayant chacun des particularités métaboliques et fonctionnelles, présents en faible concentration voire à l'état de traces. iii) La mesure du besoin, réalisée classiquement par des expériences de dose/réponse, doit tenir compte des capacités de stockage. Pour les poissons, l'eau –milieu d'élevage-, peut-être un réservoir presque inépuisable, à tel point qu'il est communément admis que les espèces d'eau de mer n'ont pas besoin d'apports nutritionnels en minéraux. Se lancer dans l'étude de la nutrition minérale des poissons demande donc d'être particulièrement concerné par la question du développement aquacole, d'être curieux et d'avoir le sens de l'aventure scientifique, de savoir développer des stratégies et se saisir d'opportunités. Toutes ces compétences, Antony Jesu Prabhu a su les démontrer. Ses résultats de thèse font déjà l'objet de 4 publications où il est 1<sup>er</sup> auteur et de deux co-publications dans des revues internationales particulièrement exigeantes. La stratégie a été a) de réaliser un état des lieux exhaustif et mesuré des savoir-faire et connaissances sur les besoins nutritionnels en minéraux des poissons, b) de mettre ces connaissances à l'épreuve tendances actuelles en pisciculture pouvant affecter l'apport en minéraux (évolution des formules alimentaires et perspective de d'élevages en circuits fermés )et c) de moderniser les approches en investiguant pour la première fois, d'une part les besoins d'entretien et d'autre part la régulation alimentaire des voies métaboliques en jeu aux niveaux des activités enzymatique et de l'expression génique. Que cet ensemble, ambitieux, d'avant-garde et cohérent, ait pu être réalisé dans la durée impartie d'une

---

<sup>1</sup> *Minerals in fish: does the source matter?* Thèse réalisée en co-tutelle entre AgroParisTech et l'Université de Wageningen aux Pays-Bas, sous la direction de Catherine Mariojous et Johan Verreth, soutenue le 15 octobre 2015. Le travail de recherche a été majoritairement réalisé à l'unité de recherche Nutrition, Métabolisme, Aquaculture (NuMea) de l'INRA de Saint Pée sur Nivelle et en partie à la Chaire d'Aquaculture et Pisciculture de l'université de Wageningen, Pays-Bas, dans le cadre du programme de recherche de la plateforme aquaculture co-financée par l'INRA et Wageningen University and Research centers (WUR).

<sup>(\*)</sup> Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Conseillère PDG INRA. Présidente centre INRA de Jouy.

thèse est aussi à mettre au crédit de la qualité scientifique et humaine de l'encadrement et de la dynamique d'investigation des équipes d'accueil<sup>2</sup>.

Le manuscrit de thèse est organisé en 10 chapitres, les 1<sup>ers</sup> et dernier étant respectivement les introduction et conclusion, les 8 autres sont chacun sous forme de publication. Le chapitre 2<sup>3</sup> est une méta-analyse des besoins alimentaires en phosphore basée sur 64 publications qui rend compte des sources potentielles de variations. Elle donne des arguments pour améliorer les études ultérieures (considérer le P corporel plutôt que le gain de poids dans les études dose-réponse, exprimer le besoin par rapport à l'énergie digestible de l'aliment...) et pour justifier la stratégie. On peut y anticiper les effets du remplacement des sources protéiques animales, l'importance à mesurer le P disponible et l'intérêt à reconsidérer la supplémentation en minéraux des espèces élevées en circuits fermés. Le chapitre 3<sup>4</sup> s'attache à décrire les besoins en macro et micro-éléments des différentes espèces sur la base d'une revue des revues. On y constate la diversité des approches entre les auteurs et on prend la mesure des variations associées aux espèces, aux particularités de leur physiologie digestive, au type d'aliment expérimental choisi, aux interactions alimentaires, à la source de supplémentation minérale et à la concentration en minéraux de l'eau. Cet ensemble est un support de choix pour concevoir des dispositifs ambitieux où les besoins alimentaires en minéraux et leurs interactions peuvent être étudiés au cours d'une même expérimentation.

Ce support guide les démarches expérimentales. La première question posée est « *doit-on supplémenter des régimes à haute concentration en lipides distribués aux salmonidés ?* ». En effet, depuis plus de 15 ans, la matière de base des aliments piscicoles qu'est la farine de poissons est remplacée par un apport supplémentaire en lipides. Ainsi les protéines alimentaires sont-elles moins utilisées à des fins énergétiques. Or, diminuer la farine de poissons revient aussi à modifier la quantité et la source minérale de l'aliment. En outre, le taux de déformations vertébrales serait plus élevé avec des régimes à fort taux lipidique. L'étude rapportée au chapitre 4, menée sur les truites arc-en-ciel, a testé deux niveaux de lipides alimentaires et deux niveaux de supplémentation en P (adéquat selon les recommandations du National Research Council<sup>5</sup> et élevé). Avec la plus haute supplémentation, le niveau circulant de métabolites lipidiques a été moindre et le dépôt de Ca et de P dans les vertèbres plus importants. Ainsi, la supplémentation des régimes à fort taux de lipides tend à améliorer le bilan minéral et il semble qu'il y ait une interaction entre le P et le métabolisme lipidique.

Une autre évolution remarquable des aliments piscicoles est la substitution de la farine de poisson par des matières premières végétales. Elle induit des variations importantes dans le profil, la quantité et la disponibilité de l'apport alimentaire en minéraux. La seconde grande question posée est « *doit-on supplémenter les régimes à base de protéines végétales et si oui quelle doit être la*

---

<sup>2</sup> Outre les Dr Mariojouis et Verreth, le Dr Prabhu remercie plus particulièrement le Dr Kaushik (INRA) pour la constance de son soutien scientifique, le Dr Geurden (INRA) pour sa présence et la qualité de ses propositions, le Dr Fontagné-Dichhary (INRA) pour ses encouragements et le Dr Schrama (WUR) pour la qualité de sa collaboration.

<sup>3</sup> Antony Jesu Prabhu, P., Schrama, J. W., & Kaushik, S. J. (2013). Quantifying dietary phosphorus requirement of fish – a meta-analytic approach. *Aquaculture Nutrition*, 19(3), 233-249

<sup>4</sup> Antony Jesu Prabhu, P., Schrama, J. W., & Kaushik, S. J. (2014). Mineral requirements of fish: a systematic review. *Reviews in Aquaculture*. Online first.

<sup>5</sup> 2011

*formule du premix ?* ». L'expérience présentée au chapitre 5<sup>6</sup> décrit les effets d'une supplémentation en phosphate di-calcique de régimes à base de matières premières végétales chez la truite arc-en-ciel. Elle a amélioré l'utilisation de P, Ca, Mg et K, mais a eu des effets négatifs sur les micro-éléments Zn et Cu.

Pour aller plus loin, il fallait mieux comprendre les effets d'équilibre. Le chapitre 6<sup>7</sup> présente la première tentative de mesure des besoins d'entretien et des pertes endogènes en minéraux des poissons. Nous ne disposions pas encore d'estimation pour les poissons. Ceci peut paraître étonnant, sachant l'importance à considérer l'existence de réservoirs corporels pour déterminer précisément le besoin. Cela rend compte de l'intérêt à porter un regard neuf sur la nutrition minérale. L'étude a été menée chez la truite arc-en-ciel en utilisant des aliments classiques, comportant des protéines d'origine animales ou végétales. Elle montre que les besoins d'entretien restent relativement stables et confirme que l'efficacité d'utilisation des minéraux varie avec la source protéique alimentaire.

Ces variations dans l'efficacité d'utilisation sont précisées dans l'expérience décrite au chapitre 7<sup>8</sup>. L'objectif est d'évaluer les effets de la substitution des protéines animales par des protéines végétales, supplémentées ou non avec des micro-éléments, sur le métabolisme des micro-minéraux estimé à partir des activités et de l'expression génique d'enzymes marqueurs des activités d'absorption, de transport et de métabolisme du Fe et du Cu. Ces dernières ont été affectées par la nature du régime, comme par la supplémentation en micro-minéraux. Il s'agissait ensuite de préciser les besoins associés à l'utilisation de sources alimentaires végétales, objectif de l'expérience décrite au chapitre. L'effet de doses croissantes de premix sur l'utilisation digestive et métabolique des micro-éléments a été testé chez la truite arc-en-ciel. Alors que pour Cu, Mn et dans une moindre mesure Fe, le niveau basal de l'aliment a été suffisant pour maintenir la concentration corporelle de ces micro-éléments, il semble que pour Zn et Se, la supplémentation est indispensable.

*Les poissons élevés dans des eaux chargées en minéraux ont-ils toujours besoin d'un apport alimentaire en ces éléments ?* est la troisième grande question posée dans cette thèse. Le chapitre 9 présente une étude réalisée sur des carpes communes élevées dans des circuits fermés à fort ou faible accumulation de minéraux dans l'eau d'élevage. Dans le milieu chargé en minéraux, les carpes ont été capables de capter et retenir les minéraux et de couvrir ainsi leurs besoins, sauf dans le cas du sélénium. Le milieu affecte l'activité et l'expression des enzymes marqueurs du métabolisme des minéraux dans les branchies, le foie et l'intestin, sans toutefois que ces variations soient corrélées aux niveaux d'apport des minéraux, sauf dans le cas de la glutathione peroxidase. Ce sont les marques des effets multiples de la qualité du milieu d'élevage sur la physiologie.

---

<sup>6</sup> Antony Jesu Prabhu, P., Schrama, J. W., Mariojouis, C., Godin, S., Fontagné-Dicharry, S., Geurden, I., Surget, A., Bouyssiere, B., & Kaushik, S. J. (2014). Post-prandial changes in plasma mineral levels in rainbow trout fed a complete plant ingredient based diet and the effect of supplemental di-calcium phosphate. *Aquaculture*, 430, 34-43.

<sup>7</sup> Antony Jesu Prabhu, P., Kaushik, S. J., Mariojouis, C., Surget, A., Fontagné-Dicharry, S., Schrama, J. W., & Geurden, I. (2015). Comparison of endogenous loss and maintenance need for minerals in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed fishmeal or plant ingredient-based diets. *Fish Physiology and Biochemistry*, 41(1), 243-253

<sup>8</sup> Antony Jesu Prabhu, P., Geurden, I., Fontagné-Dicharry, S., Veron, V., Larroquet, L., Mariojouis, C., Schrama J. W., Kaushik S. J., (2016) Responses in micro-mineral metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to change in dietary ingredient composition and inclusion of a micro-mineral premix. *PloS ONE*, 11 (2), article e0149378

En conclusion ce travail de thèse a l'immense mérite de mettre sur le devant de la scène scientifique la nutrition minérale qui reste un domaine peu couvert, alors que, comme le démontre cette thèse, elle peut devenir un verrou à lever avec les nouvelles formules alimentaires et systèmes d'élevage. La démarche adoptée permet de saisir le sujet dans sa complexité, et de produire, pour chaque expérience menée, des résultats utiles à la profession piscicole et ouvrant de nouvelles perspectives académiques. En particulier :

- Ils appellent à réviser les recommandations alimentaires (notamment établies par le National Research Council) afin de :
  - o tenir compte des variabilités liées à la composition des aliments et à la nature des systèmes d'élevage
  - o considérer les effets de l'utilisation des protéines végétales sur :
    - les besoins métaboliques de base en Zn, Cu,
    - la régulation de l'homéostasie de Fe et Cu
    - le besoin de supplémentation spécifique en Zn et surtout en Se<sup>9</sup>
- Ils incitent à considérer les minéraux dans leur ensemble car une supplémentation de l'un peut modifier l'utilisation des autres (cas des effets de la supplémentation en phosphate dicalcique sur l'absorption de Fe, Cu, Mn, Zn).
- Ils montrent que la qualité des aliments et des dispositifs d'élevage modifient l'absorption et l'équilibre des minéraux en jouant de manière différenciée sur la régulation des voies métaboliques en jeu
- Ils pointent l'importance des interactions :
  - o entre les minéraux et le métabolisme des substrats carbonés (cas de l'interaction entre P et le métabolisme lipidique)
  - o entre les macro et micro-minéraux

A l'université de Wageningen, comme à AgroParisTech la thèse d'Antony Prabhu a été jugée de haute valeur scientifique et pratique et saluée par les félicitations du jury. Elle y est citée comme exemple de cette science pour l'impact que ces institutions entendent développer. Elle fait honneur à la plateforme INRA-WUR. C'est une contribution majeure.

---

<sup>9</sup> Fontagné-Dicharry, S., Godin, S., Liu, H., Antony Jesu Prabhu, P., Bouyssière, B., Bueno, M., Tacon, P., Médale, F., & Kaushik, S. J. (2015). Influence of the forms and levels of dietary selenium on antioxidant status and oxidative stress-related parameters in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry. *British Journal of Nutrition*, 1-12.  
Godin, S., Fontagné-Dicharry, S., Bueno, M., Tacon, P., Antony Jesu Prabhu, P., Kaushik S, Médale, F, Bouyssiere, B (2015) Influence of dietary selenium species on selenoamino acids levels in rainbow trout. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Accepted.