

ETUDE MECANISTE ET ECOPHYSIOLOGIQUE DU TRANSFERT DU CARBONE 14 CHEZ LES POISSONS

Frédéric ALONZO, Audrey SOULOUMIAC, IRSN LECO
Taku Tanaka, Philippe CIFFROY, EDF R&D

« FAUNE, FLORE, DENRÉES et RADIOACTIVITÉ »
17-18 novembre 2021, Paris



LE CARBONE 14 DANS L'ENVIRONNEMENT

- Origine naturelle : réaction des neutrons sur les atomes d'azotes, sous l'effet des rayons cosmiques (1.4×10^{15} Bq par an)
- Origine anthropique : un des radionucléides rejetés dans les effluents liquides des CNPE françaises ($1.5 - 3 \times 10^{11}$ Bq par an)
- Fraction très minoritaire (10^{-12}) du carbone total entrant dans les chaînes alimentaires aquatiques via la production primaire (photosynthèse)
- Contribue, avec le tritium, à la dose annuelle reçue en aval des CNPE ($1 \mu\text{Sv}$ par an)



MODELES DE TRANSFERT DU CARBONE 14 DANS LES ECOSYSTEMES AQUATIQUES

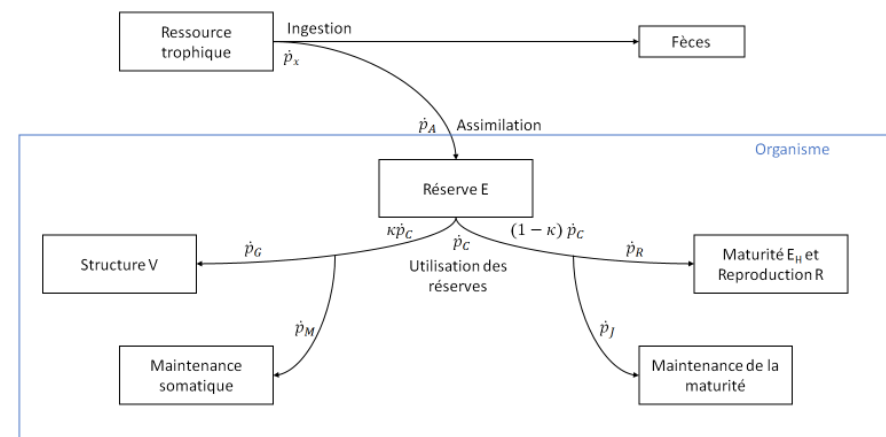
- Modèles simplistes basés des concentrations à l'équilibre entre l'eau et les poissons (150 – 250 Bq de ¹⁴C par kg de C)
- Caractère épisodique des rejets entrainant de fortes variations de la concentration dans l'eau
- Variations chez les poissons de plusieurs ordres de grandeur dans les suivis radioécologiques (200 – 2800 Bq de ¹⁴C par kg de C)
- Influence de la physiologie des poissons, selon les espèces et les facteurs environnementaux (température, disponibilité de la nourriture)

Espèces	Bq/kg C		
	Min	Max	Moyenne
Silure glane	237	334	286
Perche	234	931	466
Lamproie marine	247		
Hotu	202	212	207
Grande alose	249		
Gardon	231	1262	453
Chevesne	200	2000	465
Carpe commune	559	581	570
Brochet	234	340	270
Brème commune	201	2830	1138
Barbeau fluviatile	204	2300	528
Anguille	213	1393	587

[LE BUDGET ENERGÉTIQUE DYNAMIQUE PEUT-IL CONTRIBUER À MIEUX EXPLIQUER LES VARIATIONS D'ACTIVITÉ OBSERVÉES ?

BUDGET ENERGETIQUE DYNAMIQUE : CONCEPTS CLES

- Modèle dynamique, qui décrit au fil du temps comment un organisme acquiert et utilise l'énergie pour survivre, grandir et se reproduire
- Modèle écophysiological, qui quantifie les flux métaboliques (J et mol C) selon la température et de l'abondance de la nourriture
- Modèle mécaniste, qui obéit à la loi de la conservation de la masse et de l'énergie
- Modèle générique, paramétré pour des dizaines d'espèces de poissons (eaux douces et marines)



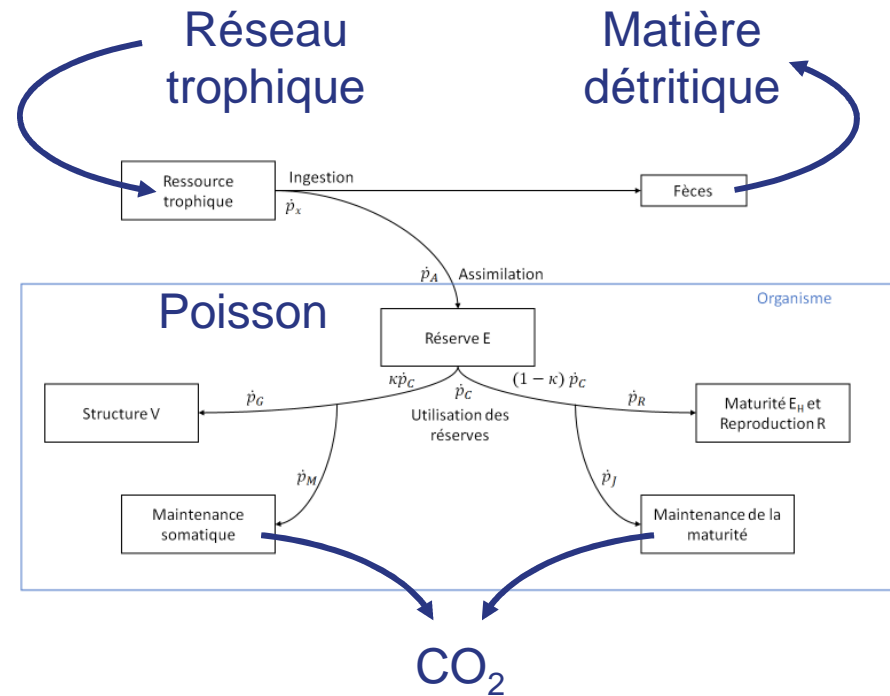
APPLIQUER LE BUDGET ENERGETIQUE DYNAMIQUE AU CAS DU CARBONE 14

Modèle utilisé pour analyser les teneurs en isotopes stables (carbone 13 et azote 15)

Volet expérimental : acquérir des données expérimentales pour paramétrer le modèle « DEB C-14 »

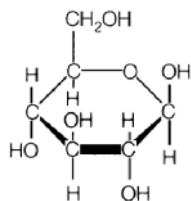
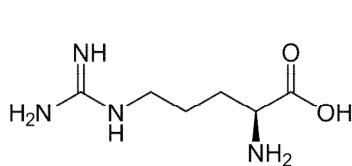
Volet modélisation DEB : analyser les données expérimentales et expliquer les variations observées au cours du temps

Perspectives : modélisation prédictive dans des conditions représentatives d'une situation de terrain



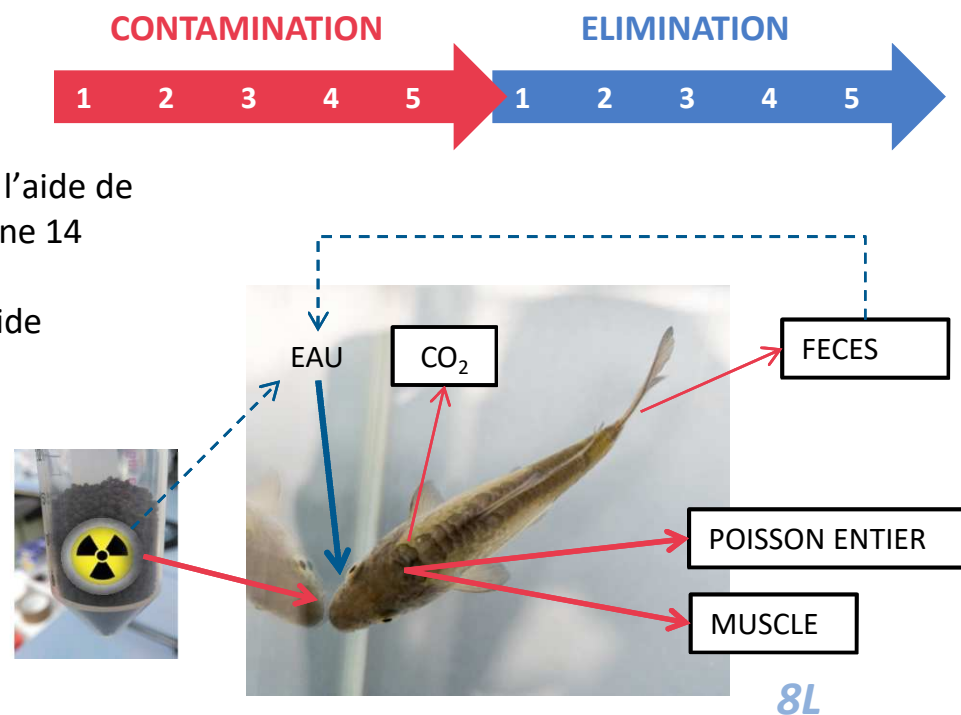
VOLET EXPERIMENTAL CHEZ LA CARPE COMMUNE, *CYPRINUS CARPIO*

- Espèce présente dans les cours d'eaux français
- Espèce renseignée dans la base de données des paramètres fondamentaux du modèle DEB
- Mesurer les cinétiques d'absorption (directe), d'assimilation (trophique), d'incorporation et d'élimination du carbone 14
- En fonction de la forme biochimique de la source de carbone 14 (arginine ou glucose)



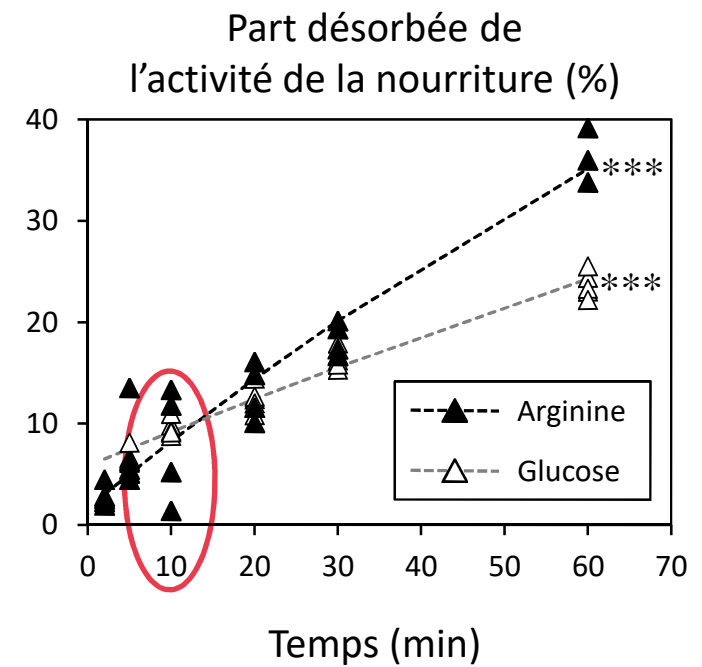
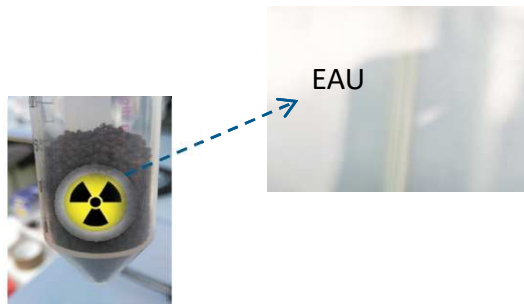
QUANTIFICATION DU TRANSFERT DIRECT ET TROPHIQUE

- Design : 1 carpe dans 8L
- Contamination trophique (1 à 4 jours) à l'aide de nourriture artificielle marquée au carbone 14
- Contamination directe (1 à 4 jours) à l'aide d'arginine dissoute
- Phase d'élimination (3 à 5 jours) à l'issue d'une contamination trophique
- Suivi de l'activité du carbone 14 (eau, poisson entier, muscle, fèces)
- Mesure de la taille et des masses fraîches



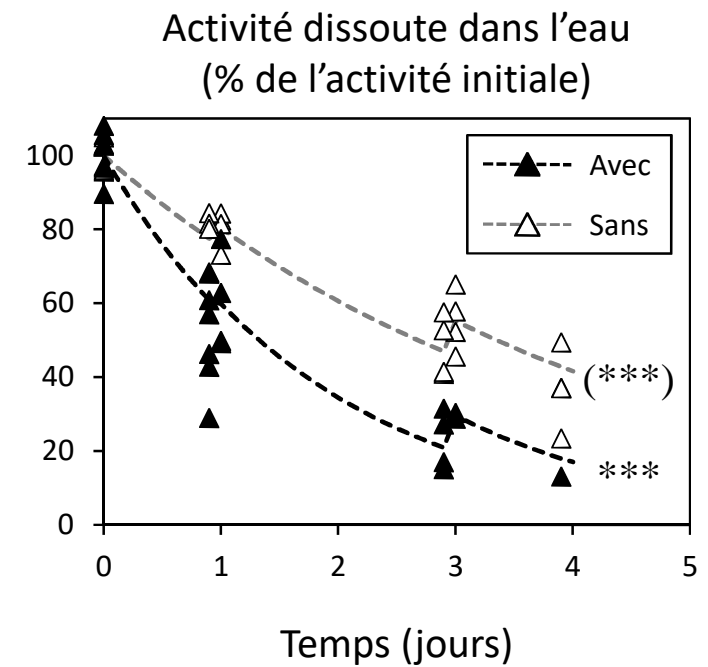
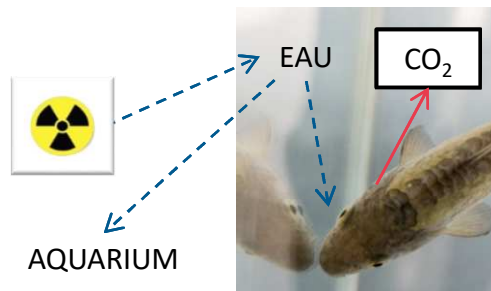
RESULTATS (1) : DESORPTION DE L'ACTIVITE DE LA NOURRITURE ARTIFICIELLE

- Suivi de l'activité de l'eau dans laquelle on place de la nourriture artificielle marquée
- Jusqu'à 40% de désorption après 1 h
- On limitera le contact de la nourriture avec l'eau (maximum 10 min)



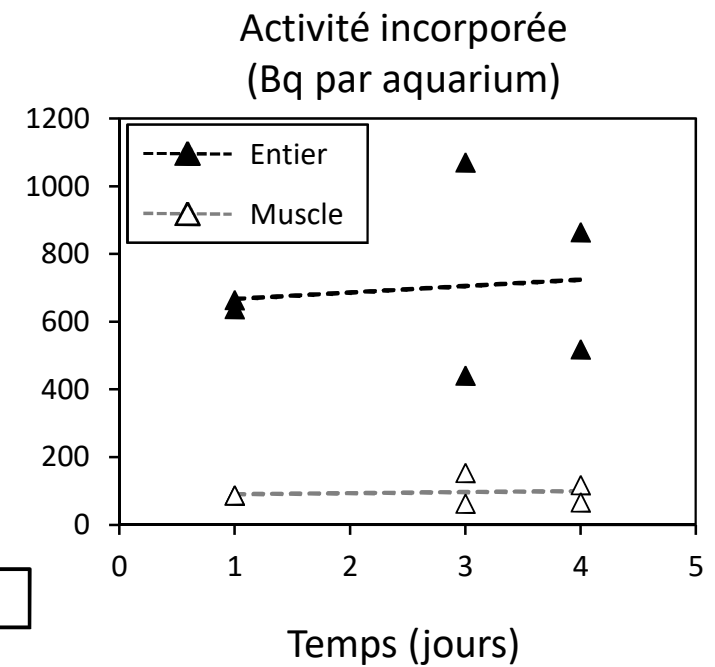
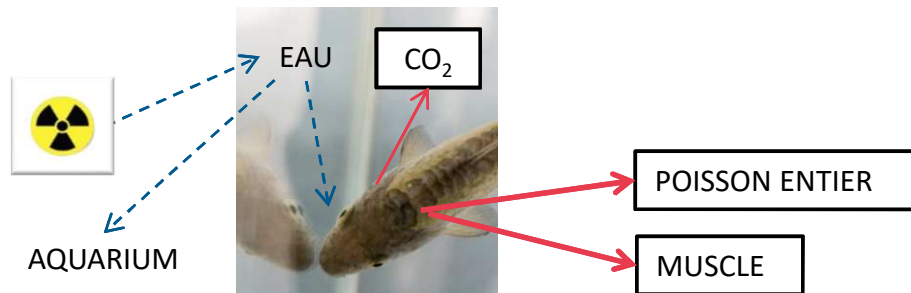
RESULTATS (2) : SORPTION ET ABSORPTION DE L'ARGININE DISSOUE DANS L'EAU

- Suivi de l'activité de l'arginine dissoute dans l'eau (30 000 Bq) avec ou sans poisson
- Décroissance exponentielle de l'activité dans l'eau au fil des jours (plus faible sans poisson)
- Taux de sorption par l'aquarium de 23% par jour et d'absorption par la carpe d'au moins 20% par jour



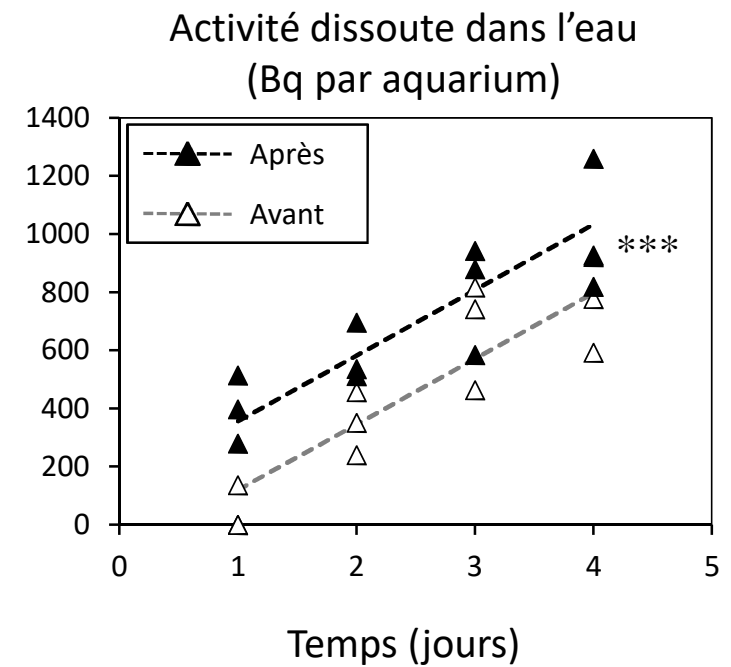
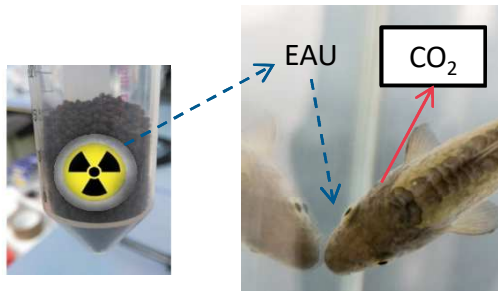
RESULTATS (3) : TRANSFERT DIRECT PAR L'ARGININE DISSOUTE DANS L'EAU

- Suivi de l'activité incorporée dans les poissons à jeun en présence d'arginine dissoute
- Pas de variation significative au fil des jours, en raison du déclin de la concentration dans l'eau
- Faible incorporation (correspondant au max à 14% des Bq absorbés) – en raison du jeûne ?



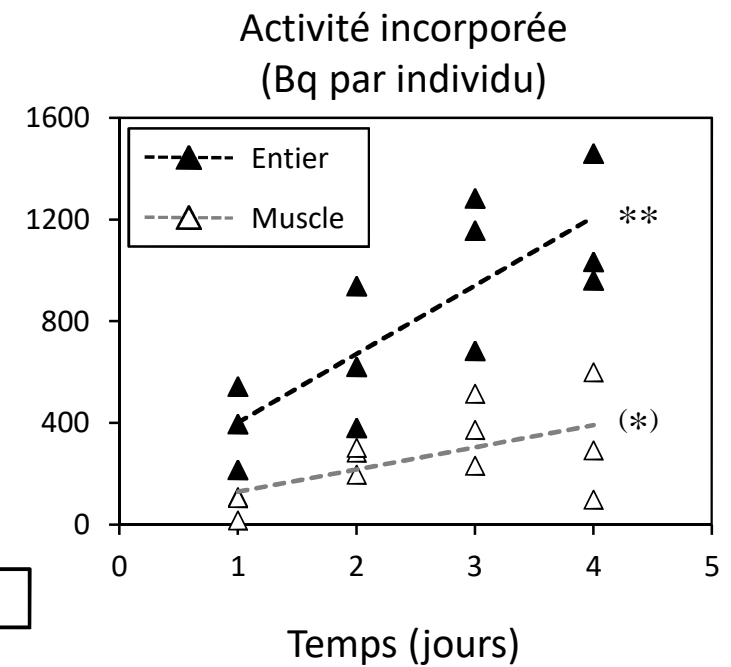
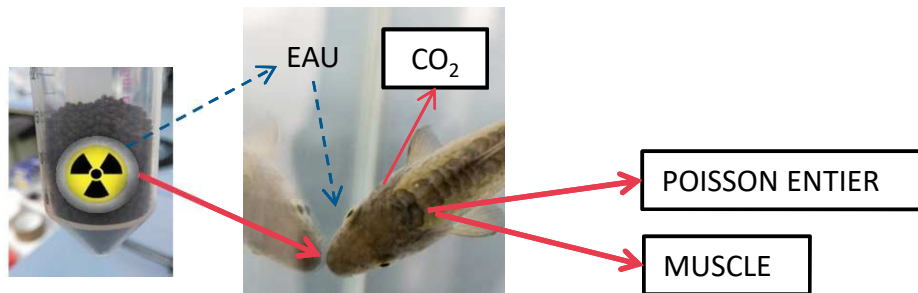
RESULTATS (4) : ACTIVITE DESORBEE LORS DE LA CONTAMINATION TROPHIQUE

- Suivi de l'activité dissoute dans l'eau, avant et après addition de la nourriture artificielle marquée
- Augmentation significative au fil des jours (correspondant à 15% des Bq ajoutés)
- Le transfert direct de l'arginine désorbée pourrait représenter quelques Bq par poisson (~ 5 Bq)



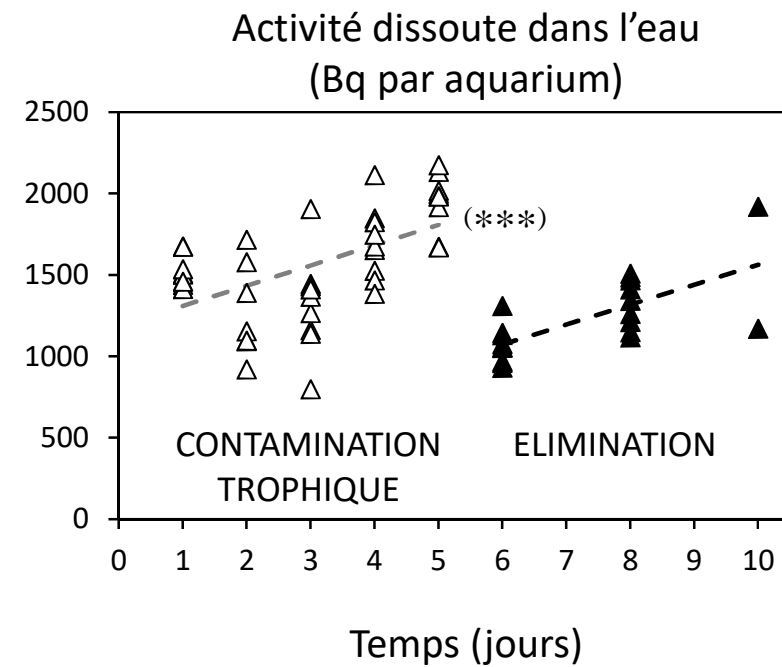
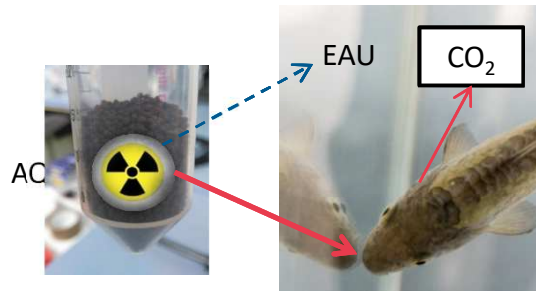
RESULTATS (5) : TRANSFERT TROPHIQUE PAR L'ARGININE DANS LA NOURRITURE

- Suivi de l'activité incorporée dans les poissons nourris sur nourriture artificielle marquée
- Augmentation significative au fil des jours (correspondant à 22% des Bq ingérés)
- L'activité dans le muscle représente 32% de l'activité des poissons



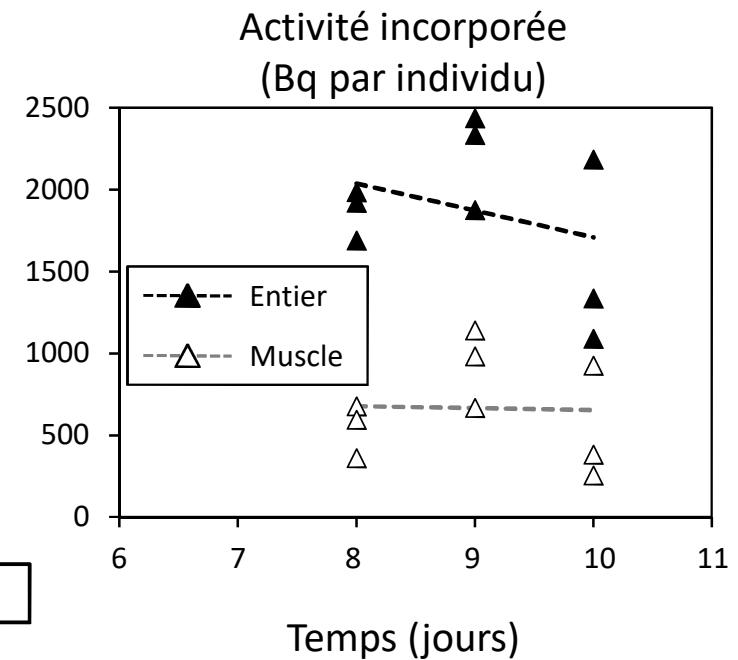
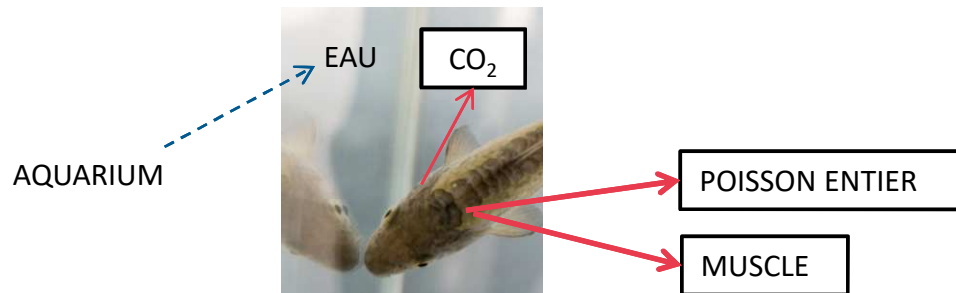
RESULTATS (6) : ACTIVITE DANS L'EAU DURANT L'ELIMINATION

- Suivi de l'activité dissoute dans l'eau
- Augmentation durant la contamination préliminaire (15% des Bq ajoutés)
- Augmentation durant l'élimination
- Activité dans l'eau anormalement élevée dès le premier jour



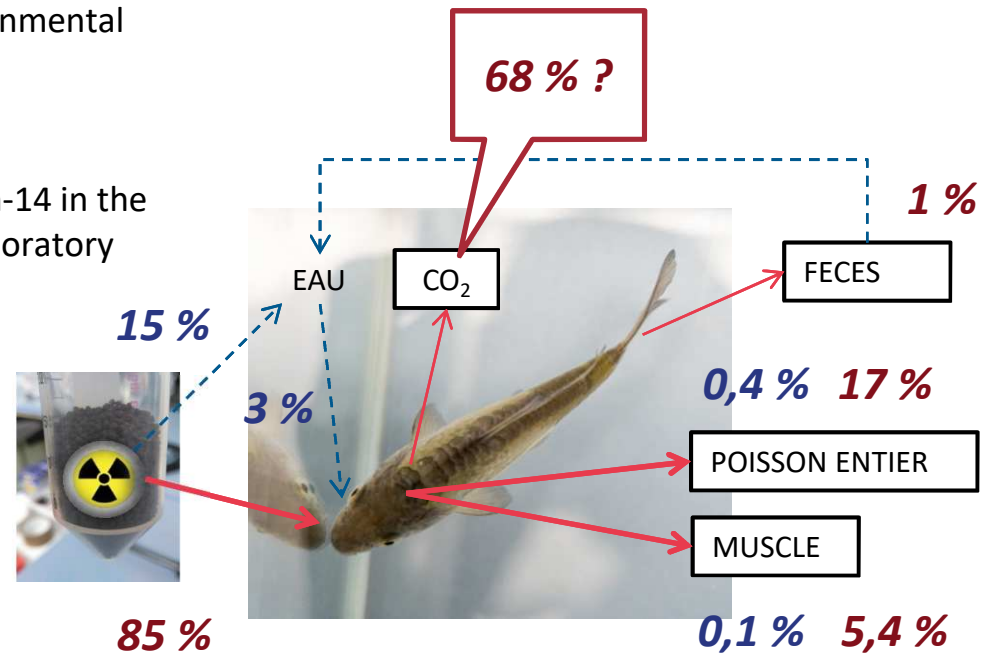
RESULTATS (7) : DECLIN DE L'ACTIVITE INCORPOREE LORS DE L'ELIMINATION

- Suivi de l'activité dans les poissons lors de l'élimination (phase de jeûne)
- Déclin de l'activité incorporée (23% après 5 jours de jeûne)
- Déclin moins marqué dans le muscle (4%)
– organe de stockage des acides aminés ?



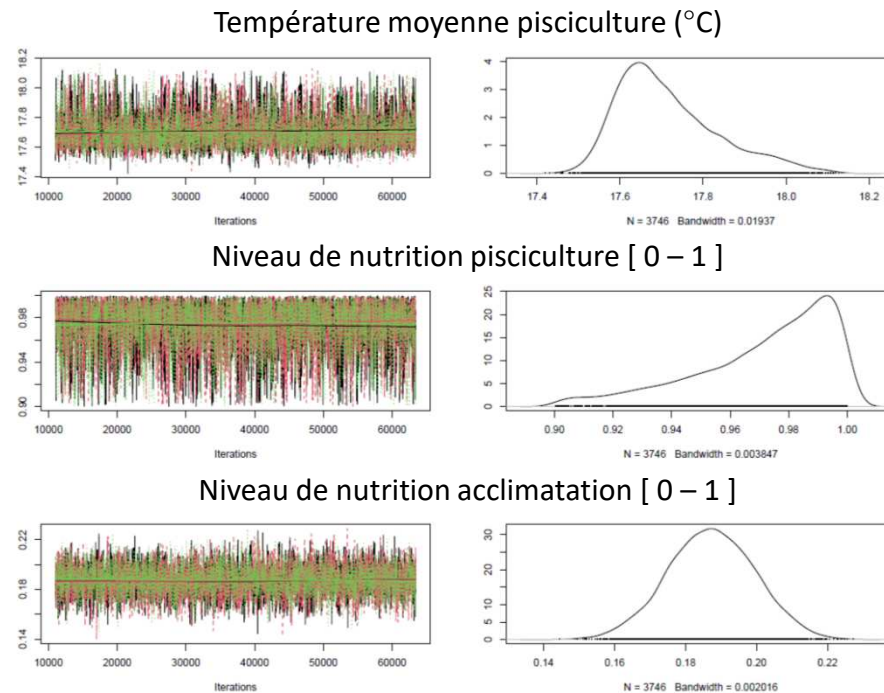
EN RESUME...

- Résultats publiés dans Journal of Environmental Radioactivity
- Souloumiac et al. (2021) « Short-term accumulation and elimination of carbon-14 in the common carp *Cyprinus carpio* under laboratory conditions »
- Possibilité de dresser un bilan
- Où est l'activité associée au CO₂ ?



MODELISATION DU BUDGET ENERGETIQUE DYNAMIQUE EN INFERENCE BAYESIENNE

- Comparer la vraisemblance des modèles et quantifier l'incertitude associée
- Modélisation sous R à l'aide des packages Rjags et Coda (Plummer, 2016a, 2016b)
- Enregistrement de chaînes de Markov Monte Carlo (MCMC) - nombre d'itérations nécessaire pour chaque modèle estimé par la technique de Raftery et Lewis (1992)
- Convergence des chaînes MCMC vers une solution unique évaluée graphiquement et quantitativement à l'aide des tests de Gelman et Rubin (1992)



EXPLIQUER LES VARIATIONS DE TAILLE, MASSE ET ACTIVITE AU COURS DU TEMPS

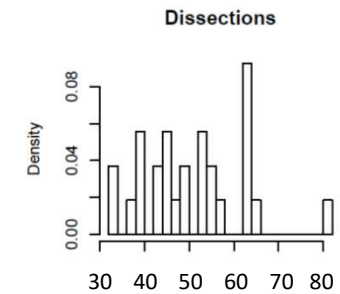
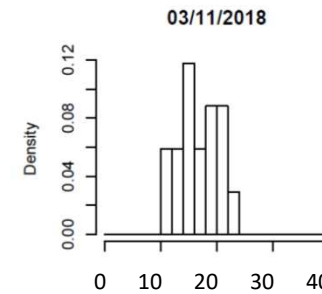
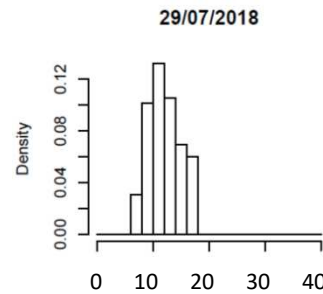
- Modèle de croissance (taille, masse), seul ou couplé au transfert du carbone 14 (activité dans l'eau et les poissons)
- Bonne convergence de tous les modèles (Gelman ≈ 1)
- Calcul d'une valeur de DIC (Deviance Information Criterion), vraisemblance pénalisée par le nombre de paramètres du modèle
- Comparaison des DIC pour identifier les modèles les plus vraisemblables

Priors del_M	DIC			Diag. Gelman
	Dev.	Pénalité	Pénalisé	
<i>Croissance seule</i>				
AmP (2019)	2200	29.4	2230	1.01
Moyenne obs.	2142	41.1	2183	1.00
Carpe obs.	2049	56.1	2105	1.01
Ajusté	2139	60.8	2200	1.01
<i>Croissance et transfert</i>				
AmP (2019)	4245	24.4	4269	1.01
Moyenne obs.	4183	30.8	4214	1.01
Carpe obs.	4070	39.3	4110	1.01
Ajusté	4183	29.6	4213	1.00

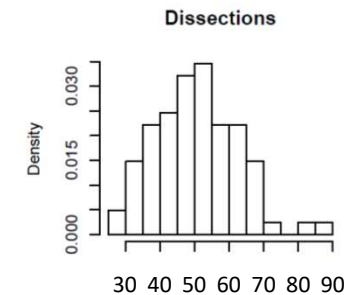
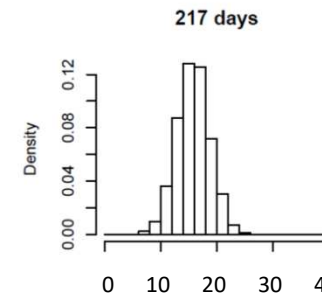
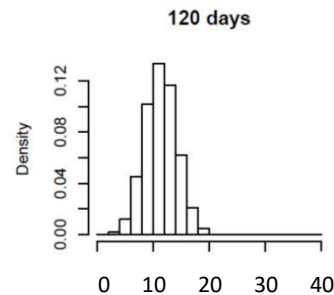
AJUSTEMENT DE LA COURBE DE CROISSANCE DES CARPES AU LABORATOIRE

Réalisé sur les données de taille et masse, mesurées à l'arrivée des carpes, au cours de l'acclimatation et à la fin de l'expérimentation

Le modèle DEB ajusté renseigne sur les niveaux de nutrition, le flux de carbone assimilé et le flux de CO₂ rejeté par chaque carpe



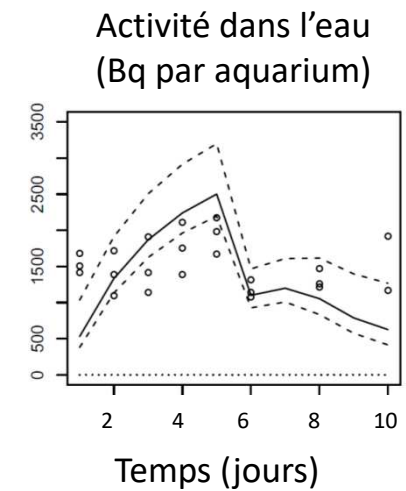
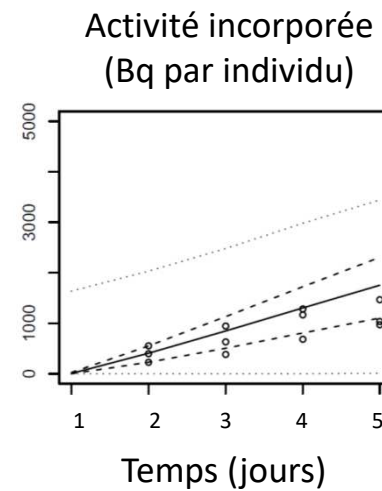
Masse fraîche observée (g)



Masse fraîche prédite (g)

TROUVER LE MODELE DE TRANSFERT QUI EXPLIQUE TOUTES LES VARIATIONS D'ACTIVITE

- Certaines observations sont décrites de façon satisfaisante : activité dans le poisson lors de la contamination trophique
- D'autres traitements demandent à être mieux décrits : activité dans l'eau lors de l'élimination
- Travail en cours de finalisation...



EN CONCLUSION

- Défi technique lié au choix du modèle biologique (une espèce plus facile à manipuler aurait peut-être apporté davantage d'information)
- Des conditions expérimentales dont il faudra nuancer la représentativité (nourriture optimisée pour la croissance des carpes, carbone 14 porté sur une molécule d'acide aminé, stress associé à la captivité et à l'expérimentation etc.)
- Financement GGP-ENV (fiche v1-101.4)

[MERCI DE VOTRE ATTENTION

