

Archéométrie

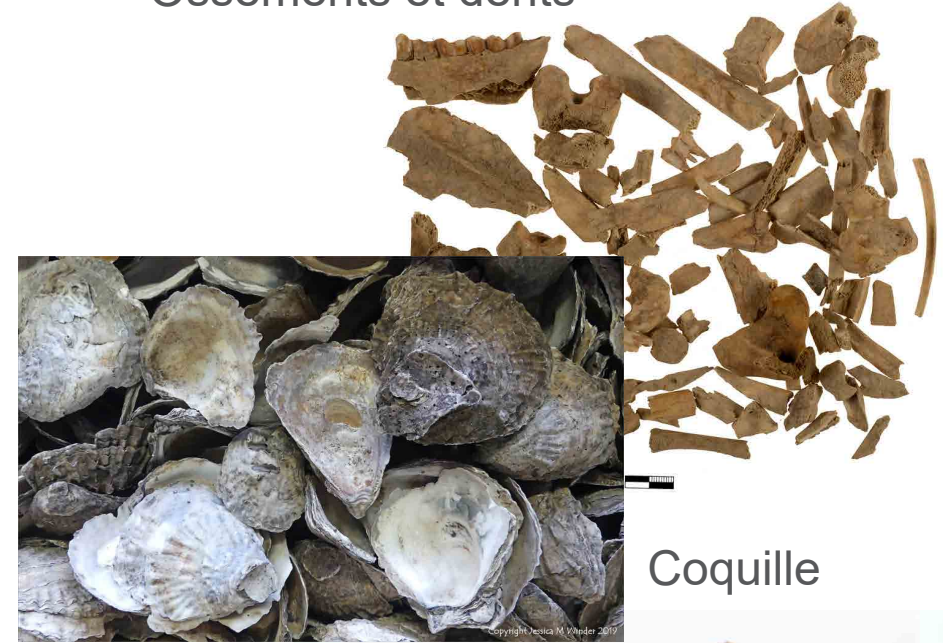
Antigone Uzunidis - 2025

Archéométrie et restes squelettiques :
Isotopes stables

DE QUELS RESTES PARLE-T-ON ?

- Pour la biologie, l'humain est un mammifère comme les autres...
- Matériaux les plus souvent analysés : matières dures animales
 - Restes squelettiques : dent et os +++
 - Bois de cervidés, tests de mollusques, coquilles d'oeufs...
- Plus rarement
 - Tissus mous animaux : poil, peau (y compris cuir et parchemin), tissus momifiés...

Ossements et dents



Coquille

Parchemin



Restes momifiés

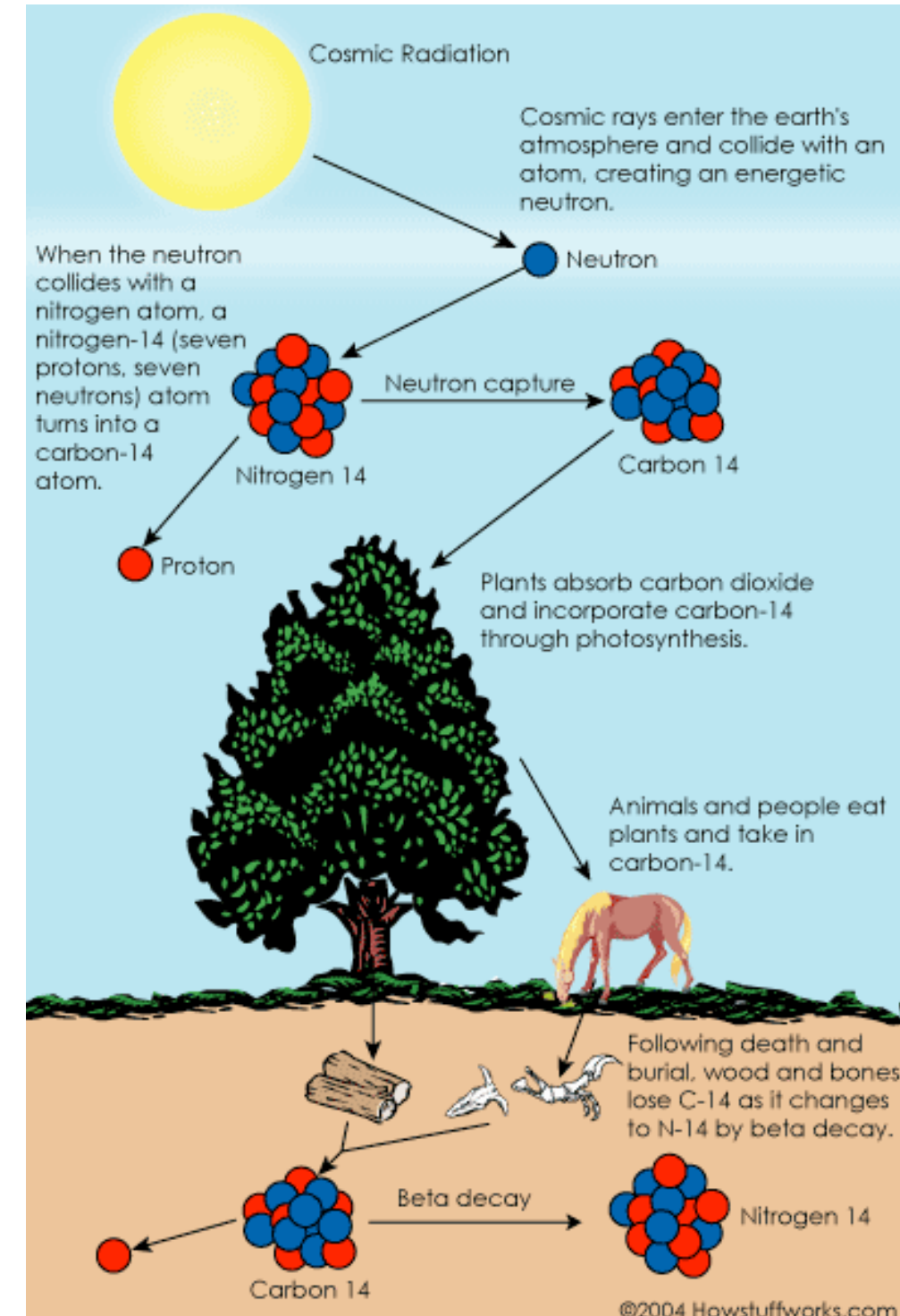


QUELLES QUESTIONS ? QUELLES ANALYSES ?

- Régime alimentaire de l'individu : isotopes stables (C et N)
- Origine géographique de l'individu : isotopes stables (O, Sr, Pb)
- Et au cas par cas, saisonnalité (isotopes stables O), sevrage (isotopes stables N), physiologie (isotopes stables Fe)...

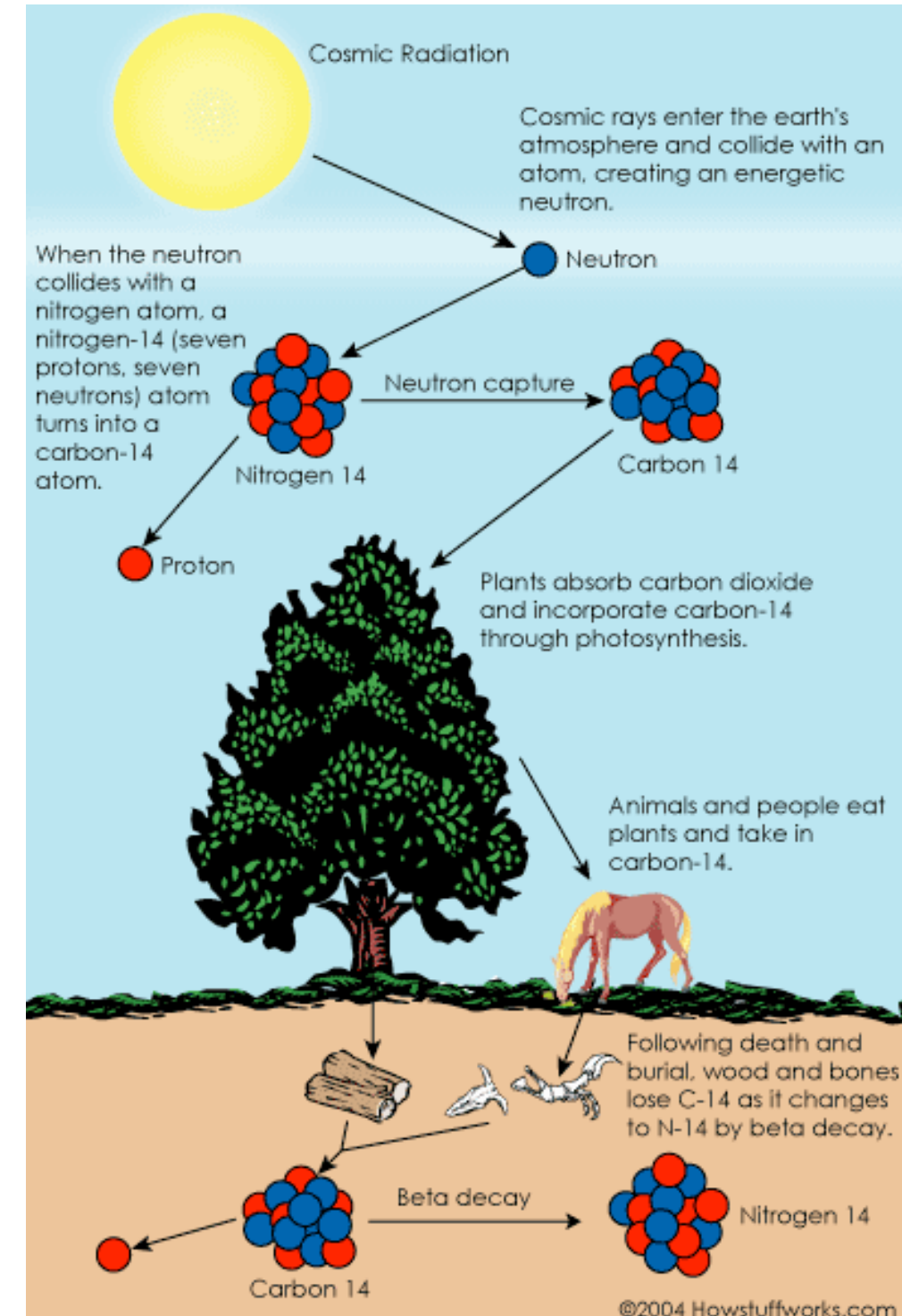
RAPPEL : LA DATATION RADIOCARBONE

- Méthode de datation basée sur la comparaison de la quantité de ^{14}C dans un échantillon organique à sa quantité totale de carbone
- ^{14}C : isotope radioactif se désintégrant naturellement au cours du temps
- ^{14}C : incorporé dans les êtres vivants par photosynthèse ou alimentation, cessant au décès de l'individu



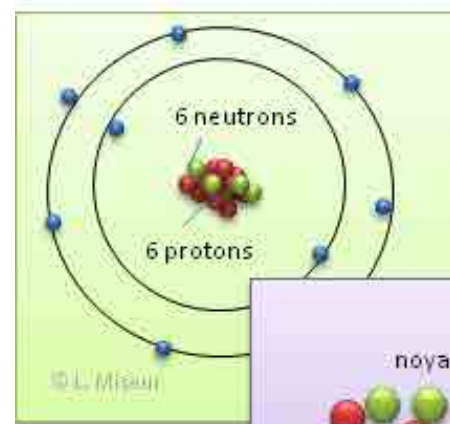
PRINCIPE DE L'ANALYSE EN ISOTOPES STABLES

- Idée de base : si le carbone est incorporé par l'alimentation, l'analyse des isotopes du carbone peut aussi renseigner sur l'alimentation des individus passés
- Mais le ^{14}C se prête mal à cette analyse, puisqu'il va se désintégrer avec le temps...

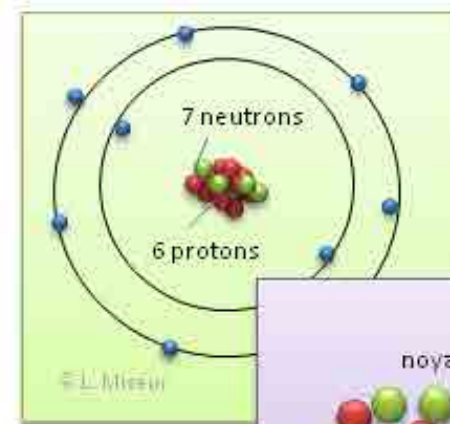
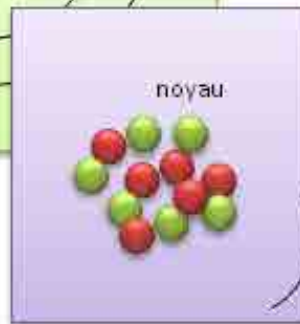


ISOTOPES DU CARBONE

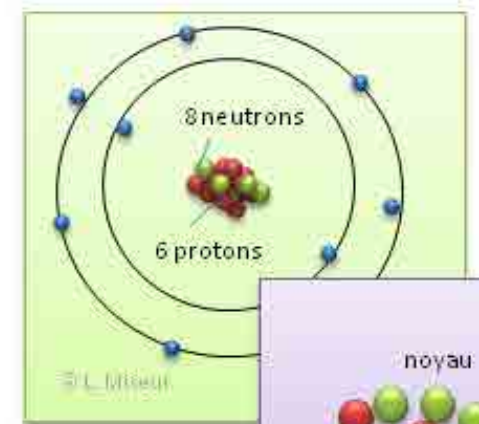
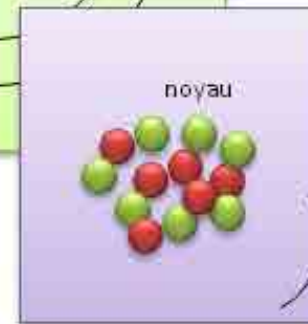
- Solution : analyser les proportions d'isotopes non radioactifs, dont le taux dans l'organisme reste stable après le décès
- Rappel : des isotopes sont atomes d'une même espèce chimique possédant
 - le même nombre de protons et d'électrons (mêmes propriétés chimiques)
 - un nombre différent de neutrons (masse différente et propriétés physiques différentes)
- Pour le carbone, 3 isotopes
 - ^{12}C , majoritaire (98,9%), stable
 - ^{13}C , minoritaire (1,1%), stable
 - ^{14}C , minoritaire (10-9 %), radioactif



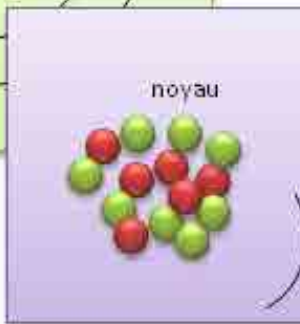
$^{12}_6\text{C}$



$^{13}_6\text{C}$

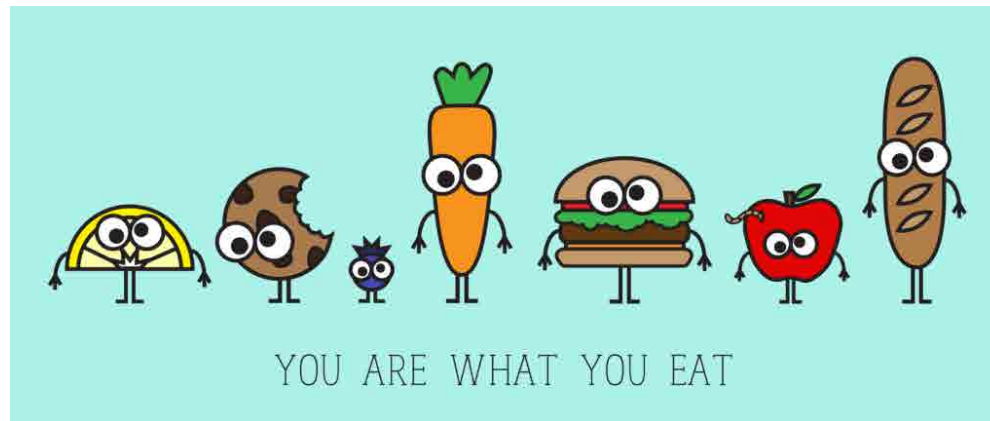


$^{14}_6\text{C}$



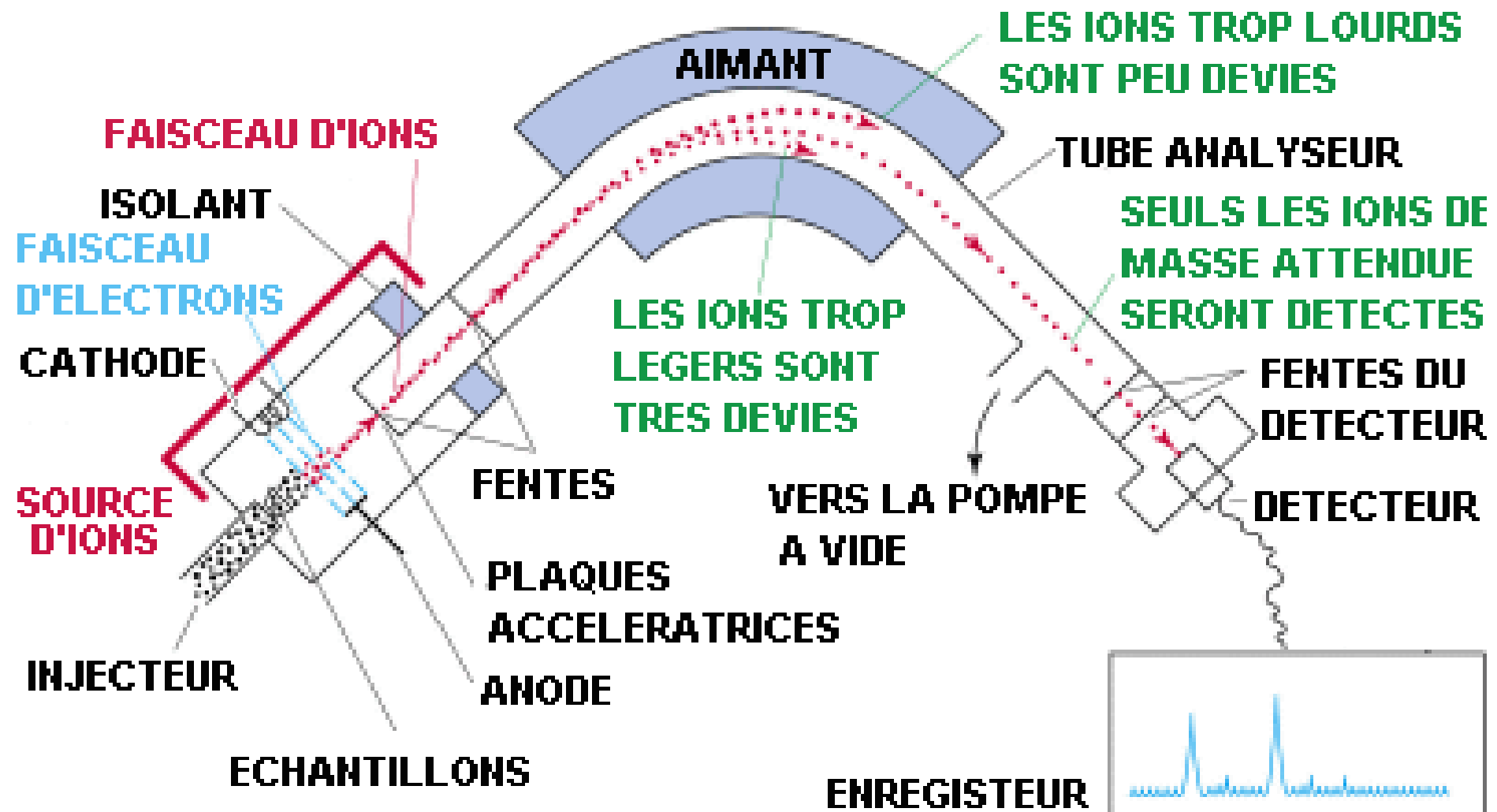
AUTRES ISOTOPES STABLES

- Analyse également applicable à d'autres espèces chimiques incorporées dans l'organisme au cours de la vie par l'alimentation ou l'eau de boisson et dont les taux restent stables après le décès
- Azote : isotope majoritaire ^{14}N , isotope stable étudié ^{15}N (enrichissement du ^{15}N par rapport au ^{14}N)
- Oxygène : isotope majoritaire ^{16}O , isotope stable étudié ^{18}O (enrichissement du ^{16}O par rapport au ^{18}O)
- Strontium, soufre, plomb, fer...



MÉTHODE D'ANALYSE

- Spectrométrie de masse (similaire à analyse AMS radiocarbone)
- Analyse destructrice

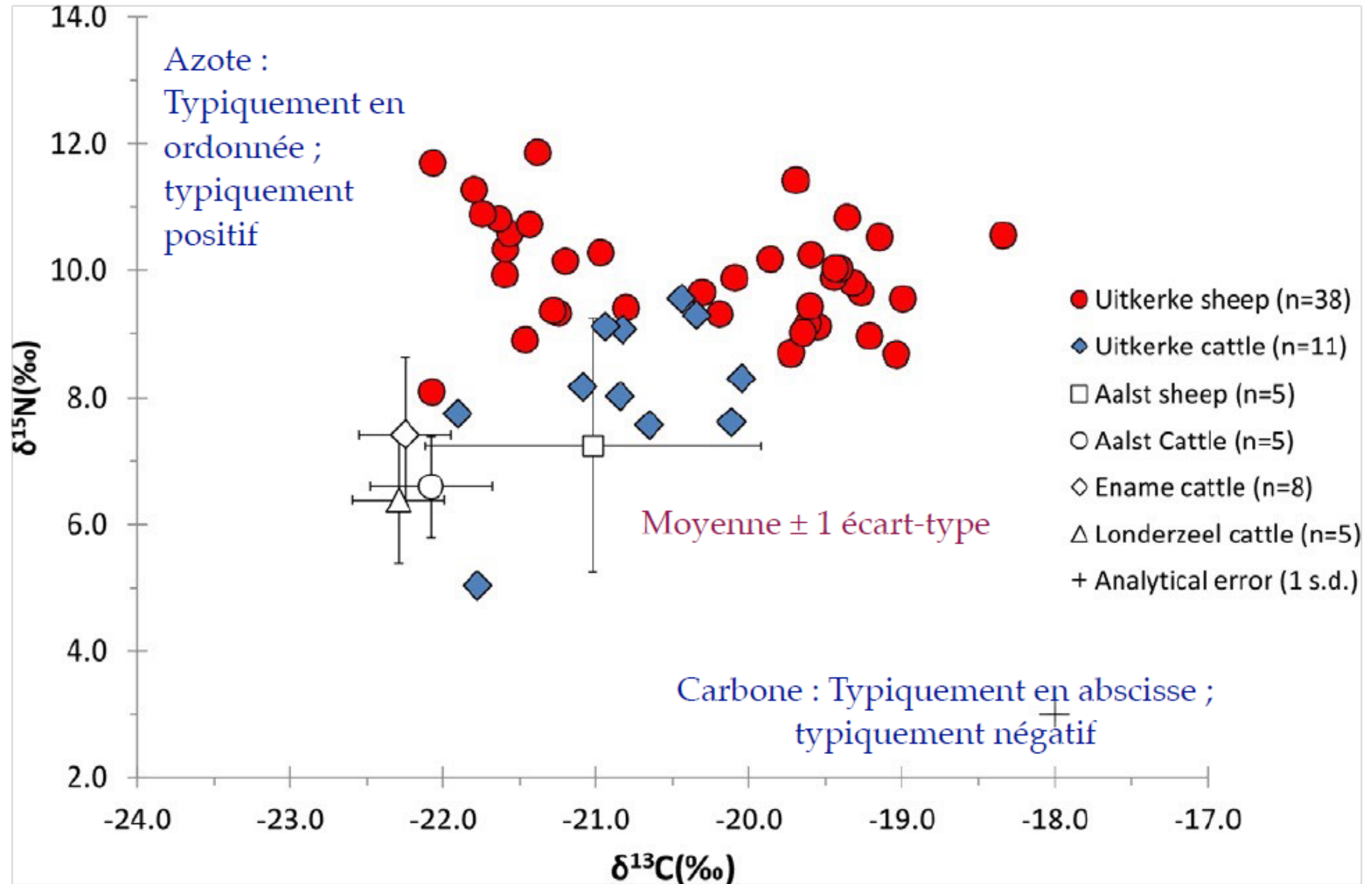


PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

- Rapport isotopique (R) : abondance de l'isotope rare / abondance isotope abondant.
- Pour C, N et O : notation δ exprimé en ‰, notant l'écart entre le rapport isotopique mesuré (R) et un standard international
- ex: $\delta^{18}\text{O} = 17,6 \text{ ‰}$

- Présentation graphique
 - Souvent nuage de points avec 1 point = 1 individu
 - C et N généralement analysés conjointement
 - C typiquement en abscisse ; typiquement négatif
 - N typiquement en ordonnée, typiquement positif

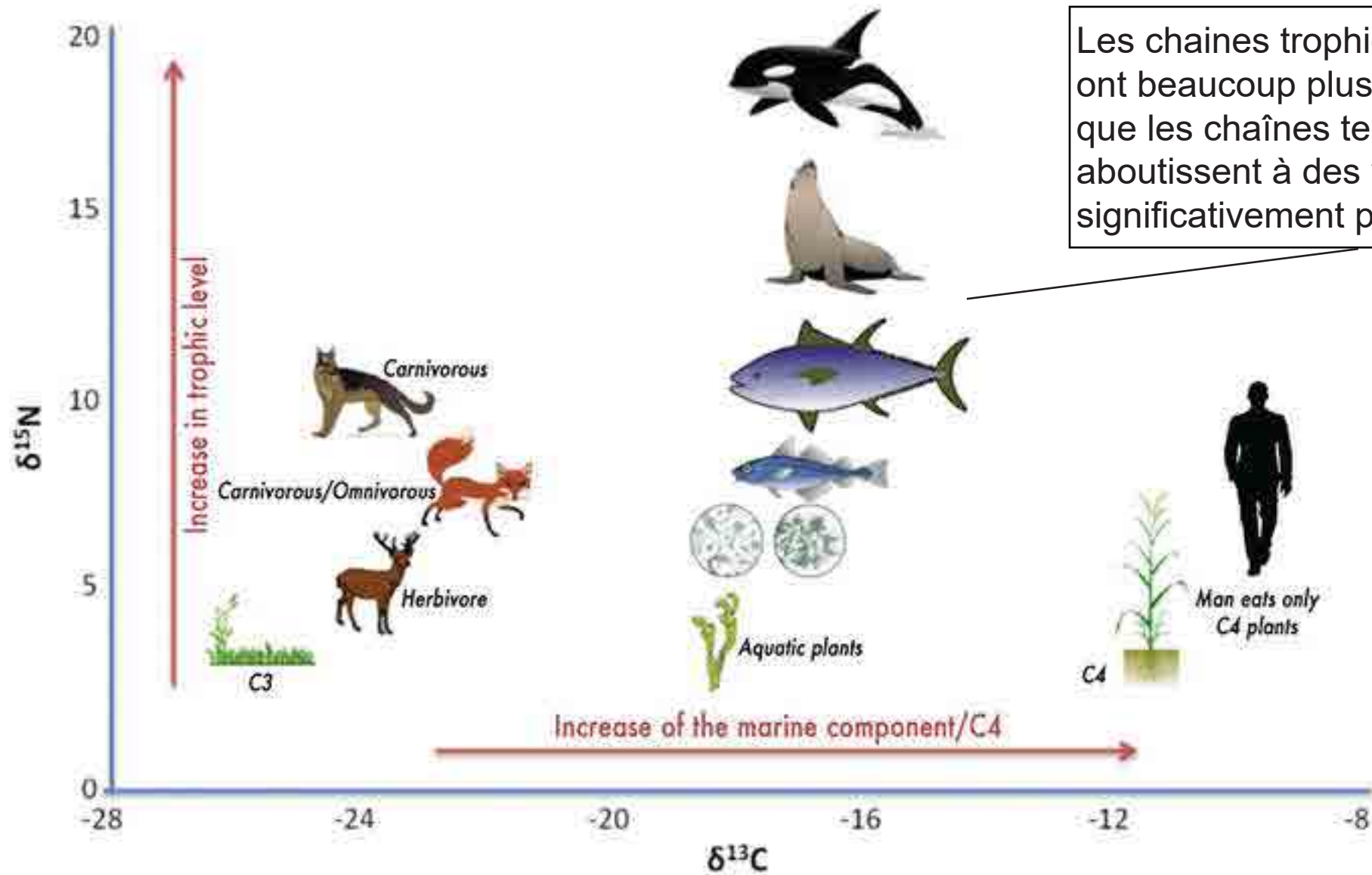
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS



LE CARBONE ET L'AZOTE, DES MARQUEURS ALIMENTAIRES

- Le carbone et l'azote issus de l'alimentation sont incorporés dans les tissus tout au long de la vie - les rapports isotopiques des tissus permettent de remonter aux aliments consommés
- La proportion de l'isotope stable minoritaire dans l'organisme dépendra de deux facteurs :
 - La place de l'individu dans la chaîne alimentaire
 - Le type d'aliment végétal à la base de la chaîne alimentaire

CHAINE ALIMENTAIRE ET NIVEAUX TROPHIQUES



Les chaînes trophiques marines ont beaucoup plus de maillons que les chaînes terrestres, et aboutissent à des valeurs du $\delta^{15}\text{N}$ significativement plus élevées

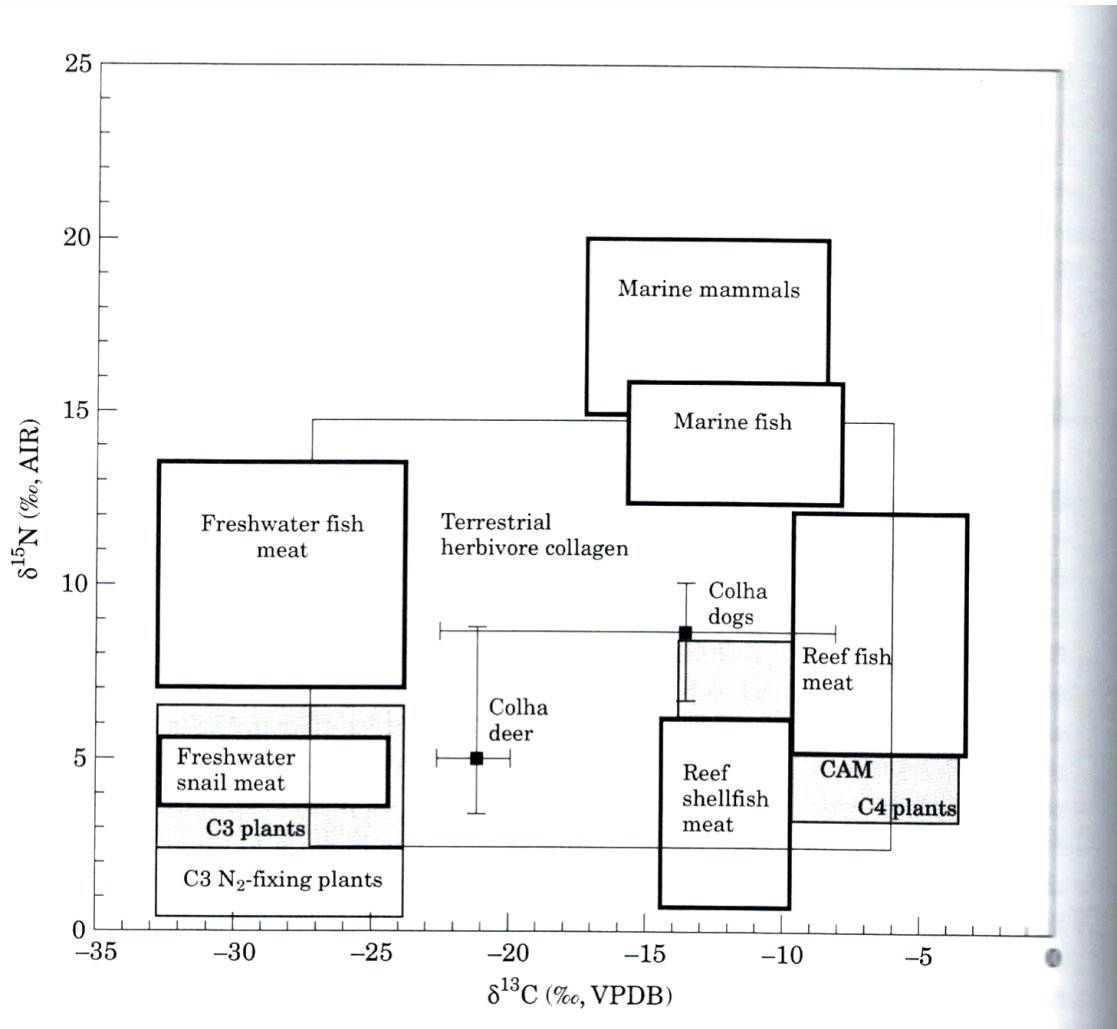
Enrichissement simultané en ^{13}C et ^{15}N à chaque accroissement d'un niveau trophique

PHOTOSYNTHÈSE ET ALIMENTS VÉGÉTAUX

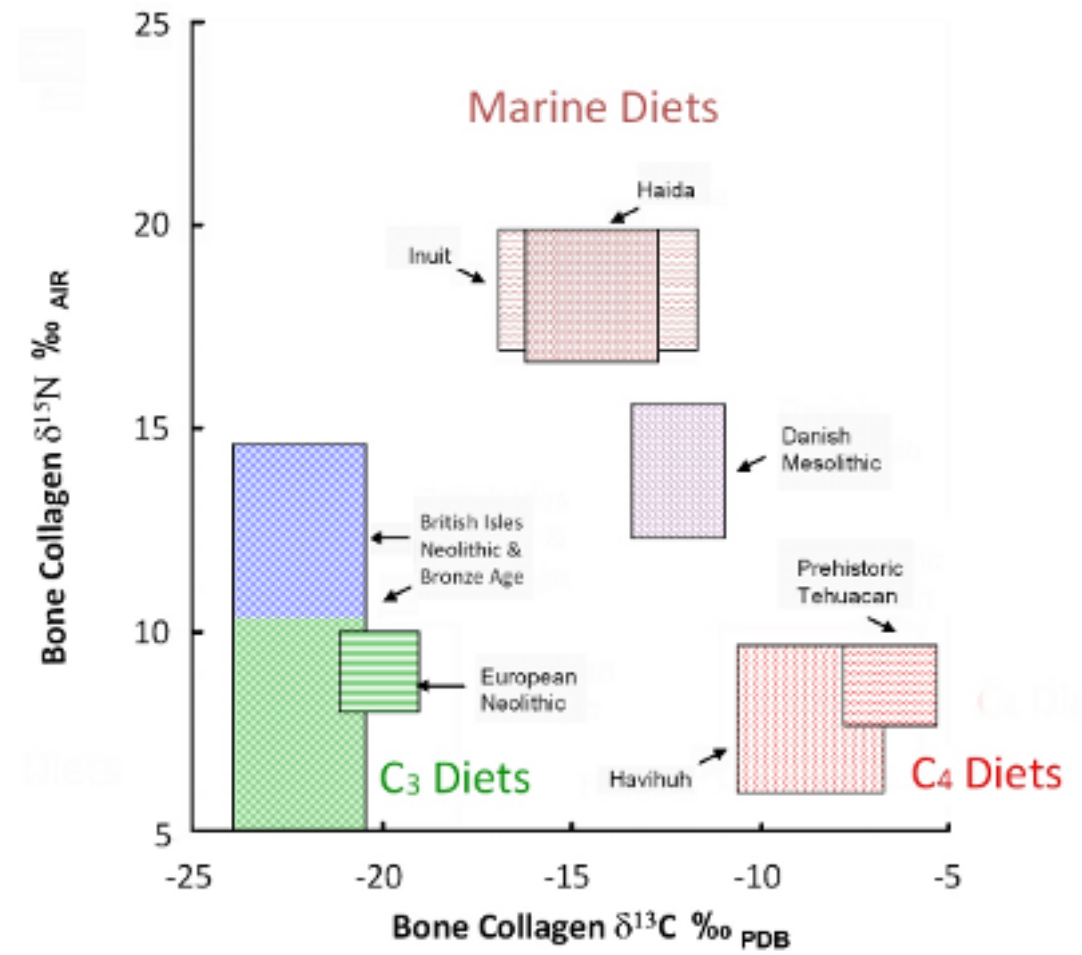
- Trois types principaux de photosynthèse :
 - Photosynthèse dite « **en C3** » - 97% des végétaux supérieurs, y compris toutes plantes européennes autochtones ainsi que blé, orge, seigle, avoine, riz, légumineuses...
 - $\delta^{13}\text{C}$ généralement entre **-23 et -30‰**
 - Photosynthèse dite « **en C4** » - principalement graminées de zone tropicale sèche ; inclut maïs, sorgho, millet, canne à sucre...
 - $\delta^{13}\text{C}$ généralement entre **-10 et -15‰**
 - Photosynthèse des algues et végétaux marins
 - $\delta^{13}\text{C}$ généralement entre **-12 et -20‰**

RECONSTITUTION DES RÉGIMES ALIMENTAIRES DES POPULATIONS PASSÉES

Rapports isotopiques de différentes populations humaines archéologiques




Rapports isotopiques de différentes ressources alimentaires

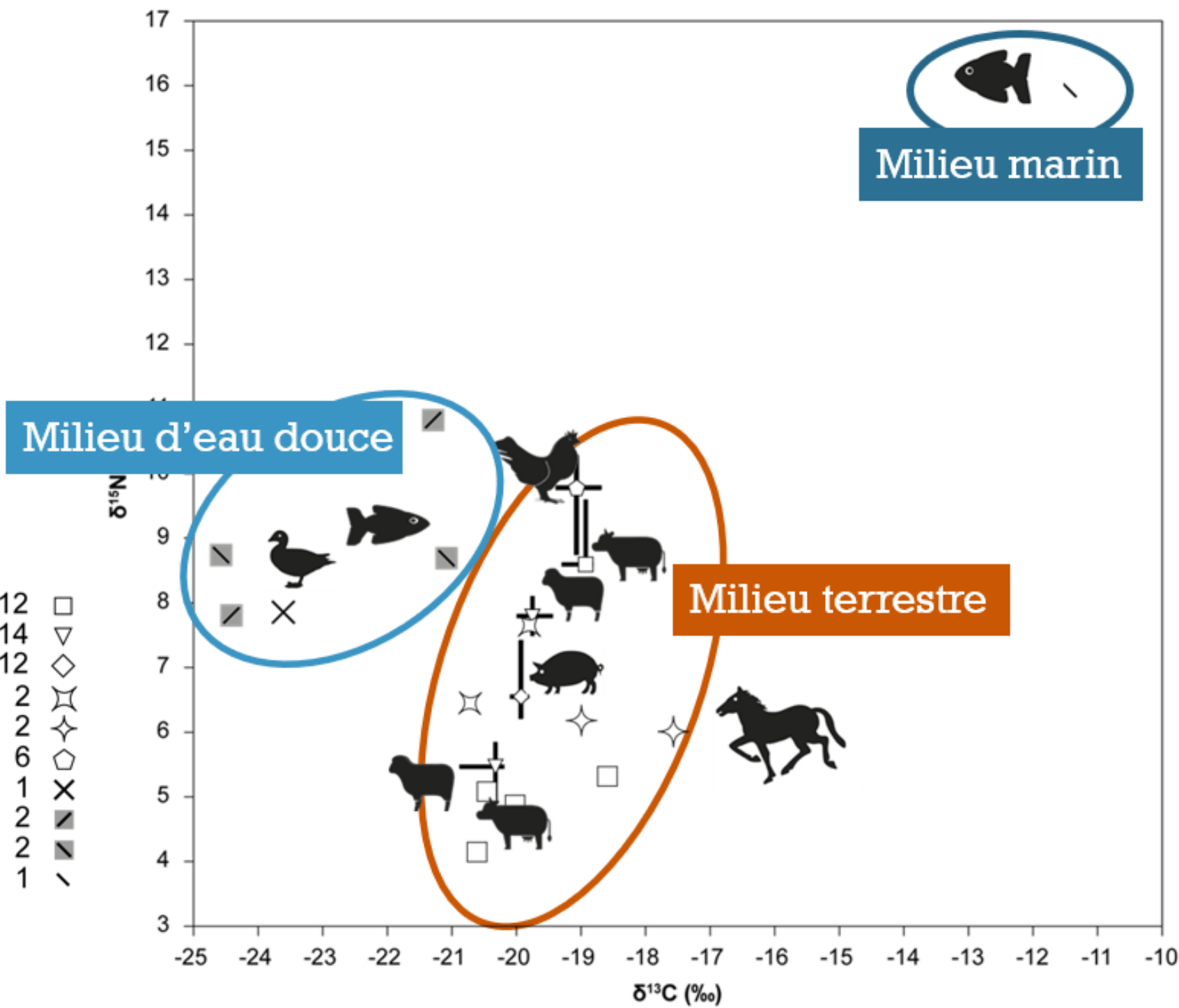


EXEMPLE : ALIMENTATION AU MOYEN AGE DANS LE LANGUEDOC

- *Mion, L., Herrscher, E., André, G. et al. The influence of religious identity and socio-economic status on diet over time, an example from medieval France. Archaeol Anthropol Sci 11, 3309–3327 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0754-z>*
- Données isotopiques (C et N) mesurées sur des ossements animaux dont humains du site de Missignac (Languedoc), IX-Xe siècle (Moyen-Age) pour évaluer les évolutions chronologiques de l'alimentation humaine.

<i>Bos taurus</i>	n = 12	□
<i>Ovis aries</i>	n = 14	▽
<i>Sus scrofa domesticus</i>	n = 12	◇
<i>Equus asinus</i>	n = 2	⊠
<i>Equidae</i>	n = 2	✧
<i>Gallus gallus domesticus</i>	n = 6	◊
<i>Anas platyrhynchos</i>	n = 1	×
<i>Anguilla anguilla</i>	n = 2	▧
<i>Esox lucius</i>	n = 2	▨
<i>Mugilidae</i>	n = 1	∖

 Médiane Q1/Q3





Milieu marin



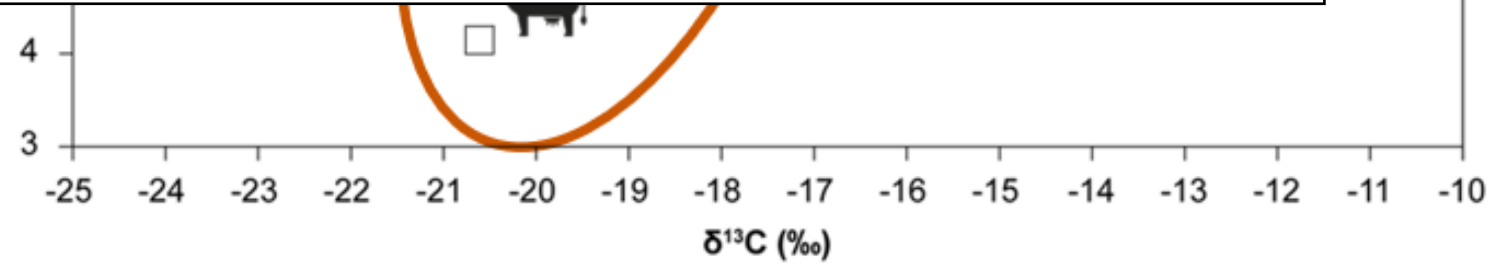
- Description du graphique :
 - Animaux de milieu d'eau douce : $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 7.5‰ et 11‰ et $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -25 et -20.5‰
 - Animaux de milieu marin : $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 15‰ et 17‰ et $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -12 et -10‰
 - Animaux terrestre : $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 4‰ et 10‰ et $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -21 et -17‰)

Bos taurinus
Ovis aries
Sus scrofa
Equus caballus
Equidae
Gallus gallus
Anas platyrhynchos
Anguilla anguilla

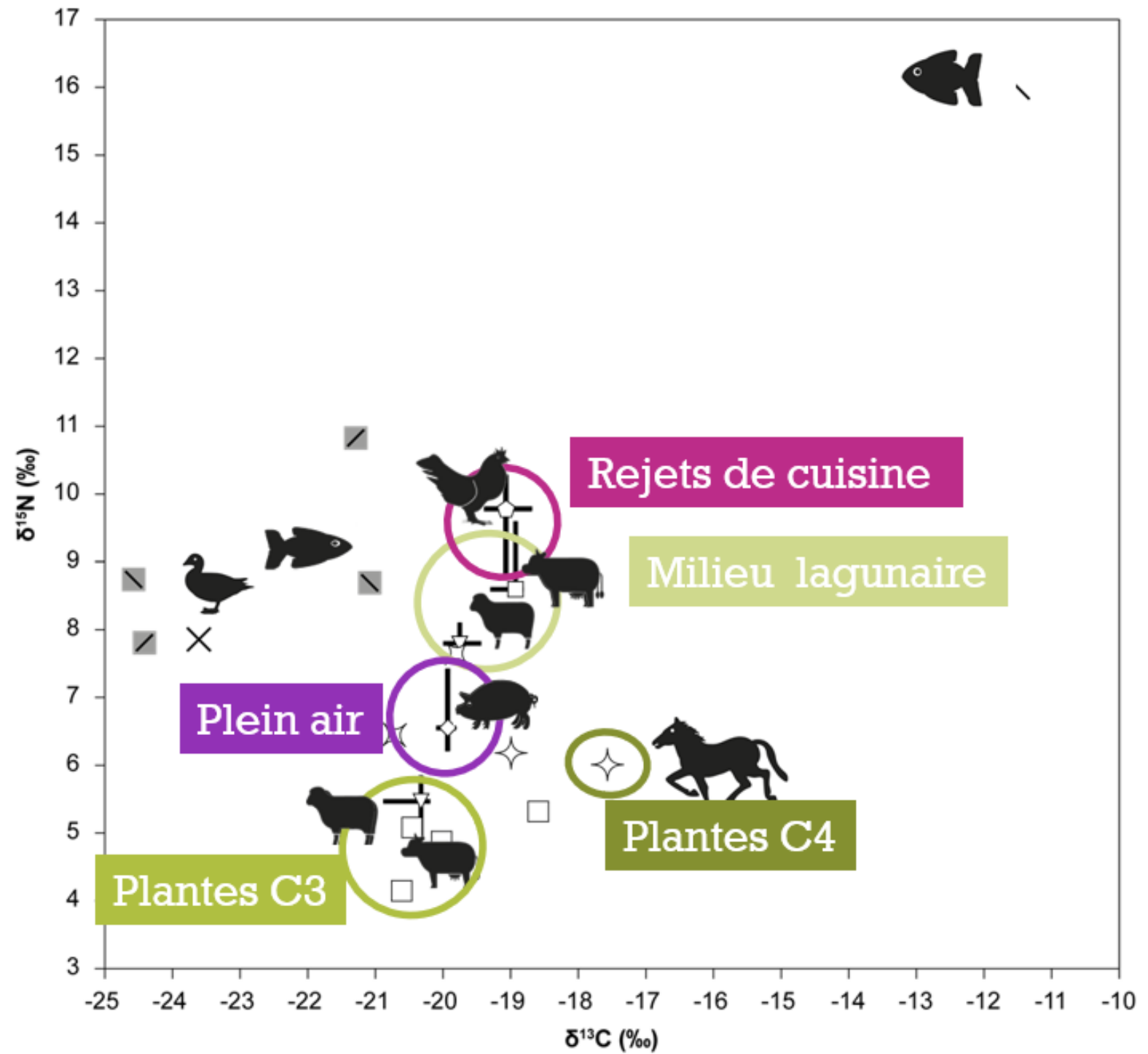
Esox lucius
Mugilidae

n = 2 ■
 n = 1 \

⊕ Médiante Q1/Q3



<i>Bos taurus</i>	n = 12	□
<i>Ovis aries</i>	n = 14	▽
<i>Sus scrofa domesticus</i>	n = 12	◇
<i>Equus asinus</i>	n = 2	⊠
<i>Equidae</i>	n = 2	✧
<i>Gallus gallus domesticus</i>	n = 6	◊
<i>Anas platyrhynchos</i>	n = 1	×
<i>Anguilla anguilla</i>	n = 2	▣
<i>Esox lucius</i>	n = 2	▤
<i>Mugilidae</i>	n = 1	∖
+ Médiante Q1/Q3		



- Description du graphique :

- Herbivores C3 stricts : $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 4‰ et 6‰ et $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -21 et -19.5‰

- Equidés (herbivores C4 = millet) : $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 6.5‰ et 7.5‰ et $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -18 et -17‰

- Suidés (plein-air) : $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 6‰ et 7.5‰ et $\delta^{13}\text{C}$ environ -20‰

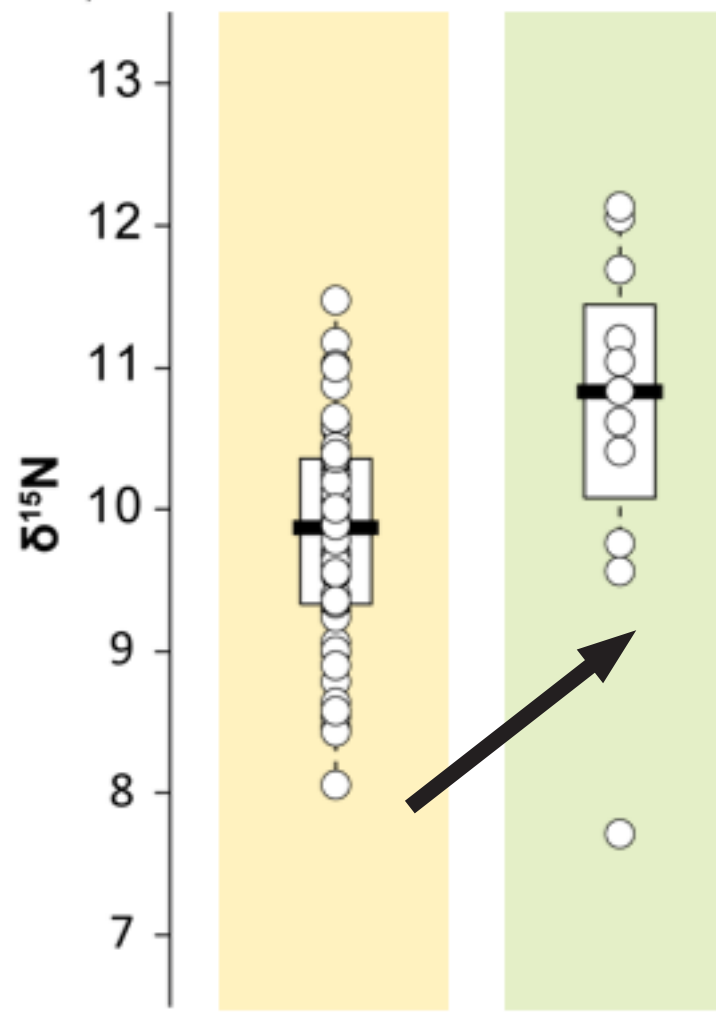
- Herbivores de milieux lagunaires : $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 9‰ et 10.5‰ et $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -20 et -18‰

- Omnivores (rejets de cuisine) : $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 9‰ et 11‰ et $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -17.5 et -19.5‰

Bo.
Ov.
Sus.
Eq.
Eq.
Ga.
An.
An.
Est.
Mu.

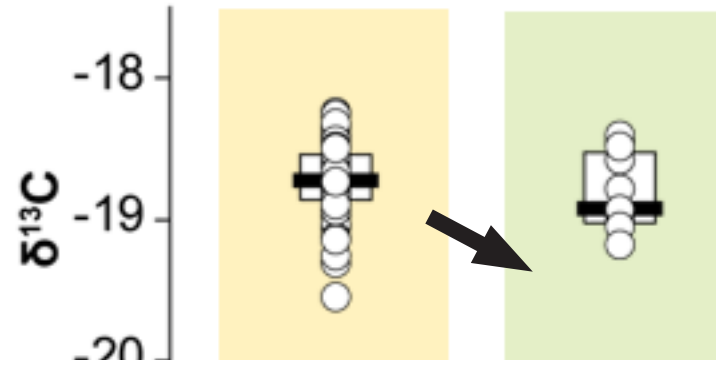
+

☐ Médiante, Q1/Q3



n = 58

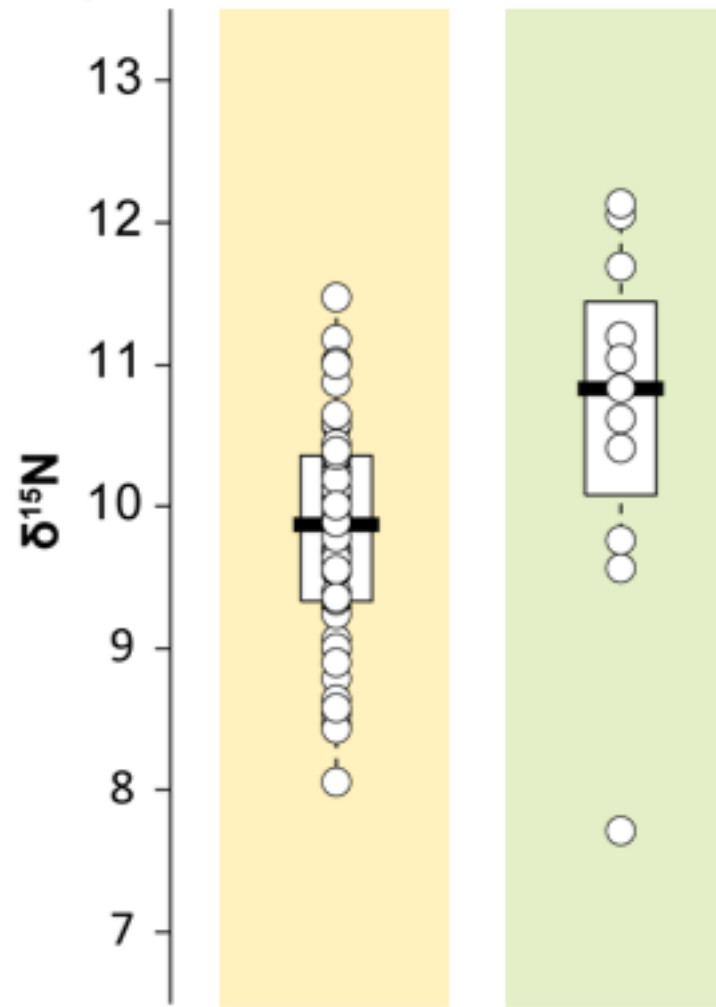
n



• Description du graphique, entre la phase I (IXe siècle) et la phase II (Xe siècle) :

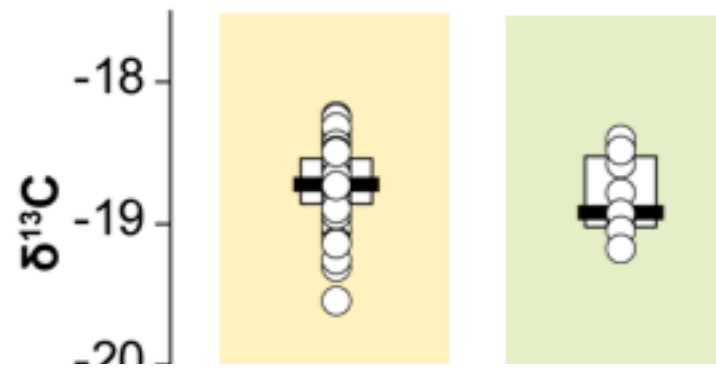
- Augmentation des valeurs de l'azote chez les humains
- Réduction des valeurs du carbonnes

— Médiante, Q1/Q3



n = 58

n



• Description du graphique, entre la phase I (IXe siècle) et la phase II (Xe siècle) :

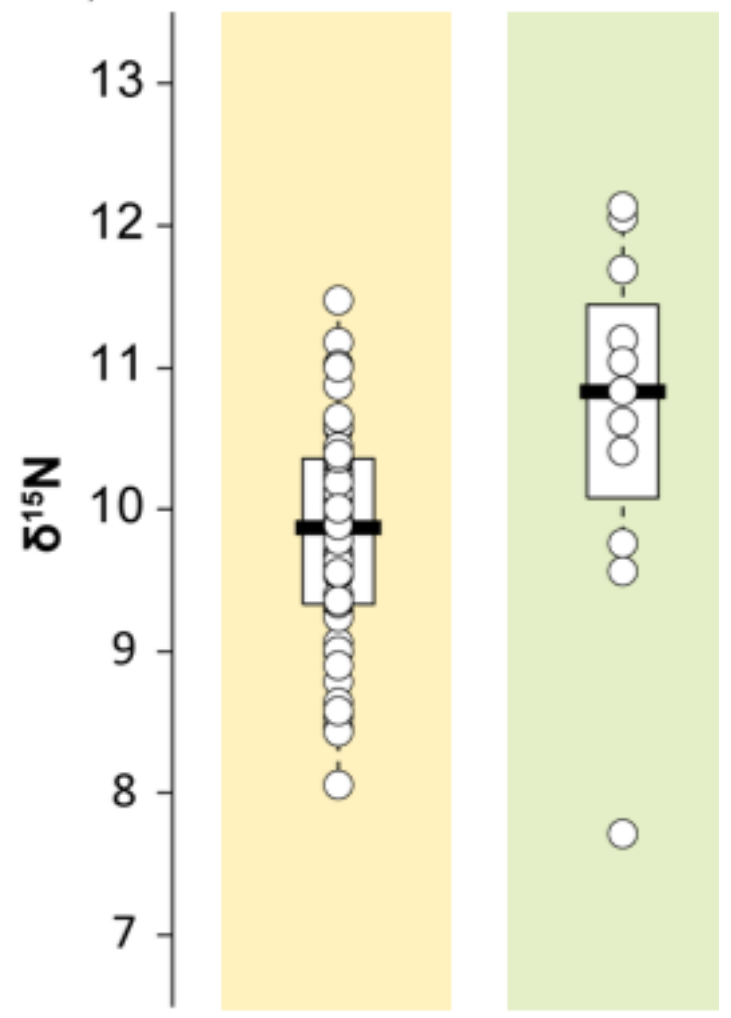
- Augmentation des valeurs de l'azote chez les humains

- Réduction des valeurs du carbone

Indique une consommation plus régulière des ressources d'eau douce

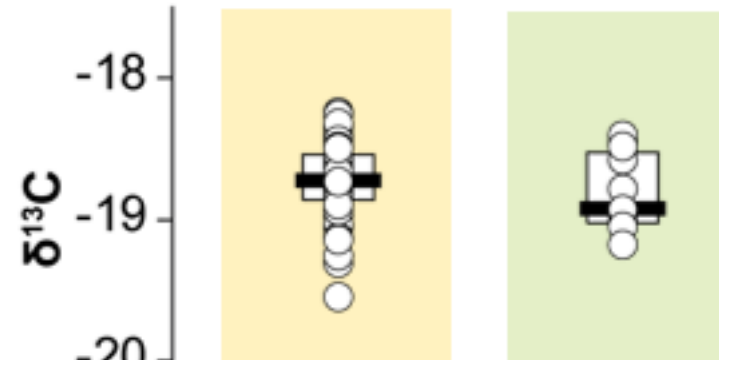
Pourquoi ?

— Médiante, Q1/Q3



n = 58

n



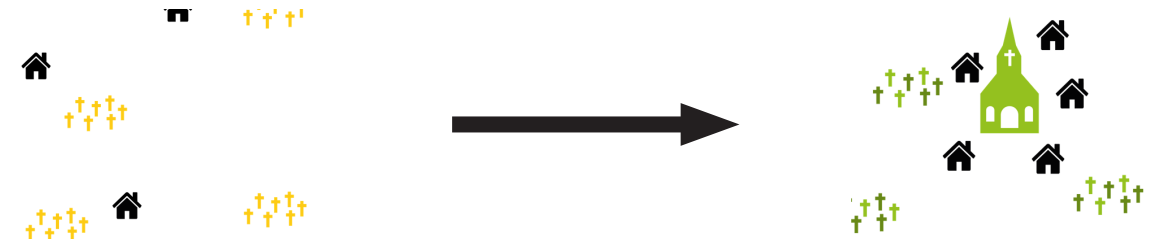
• Description du graphique, entre la phase I (IXe siècle) et la phase II (Xe siècle) :

- Augmentation des valeurs de l'azote chez les humains
- Réduction des valeurs du carbone

Indique une consommation plus régulière des ressources d'eau douce

Pourquoi ?

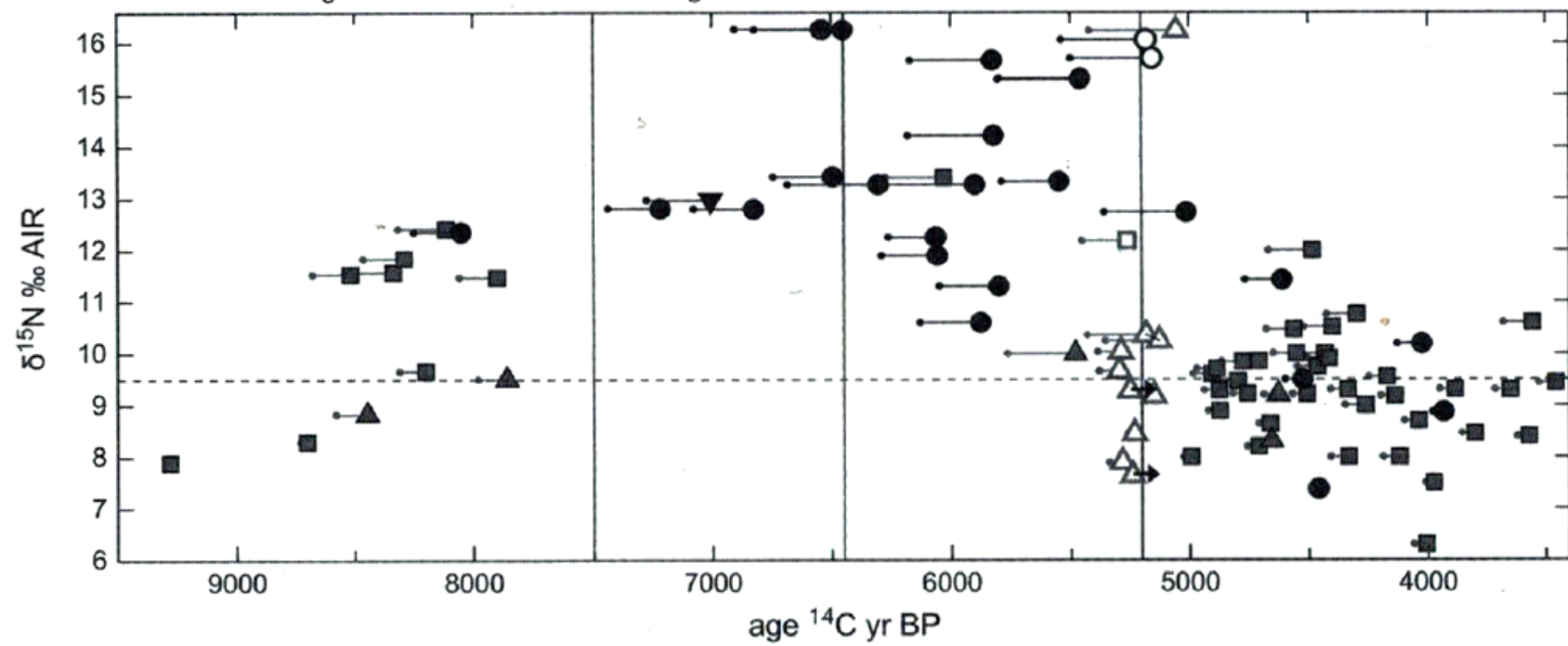
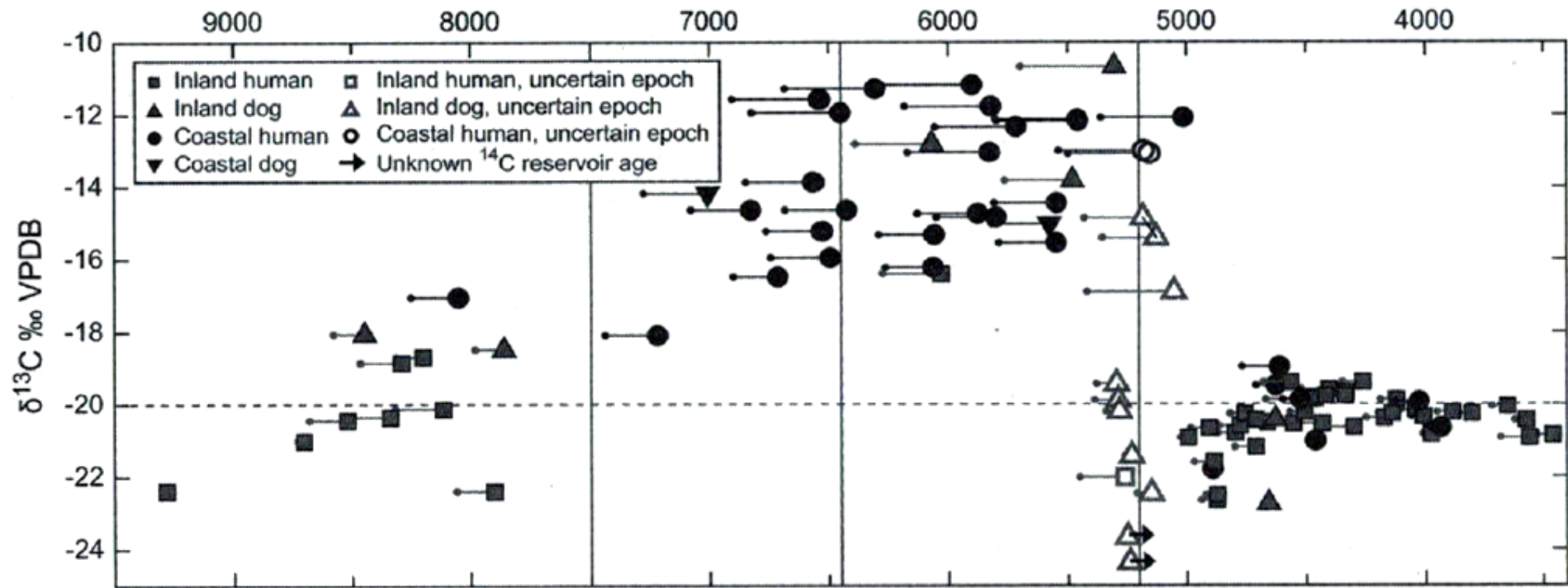
- Coïncide avec agrandissement du village, densification du tissu urbain et installation d'une église.



- Observation plus stricte des régimes alimentaires chrétiens (carême, jours maigres...) ?

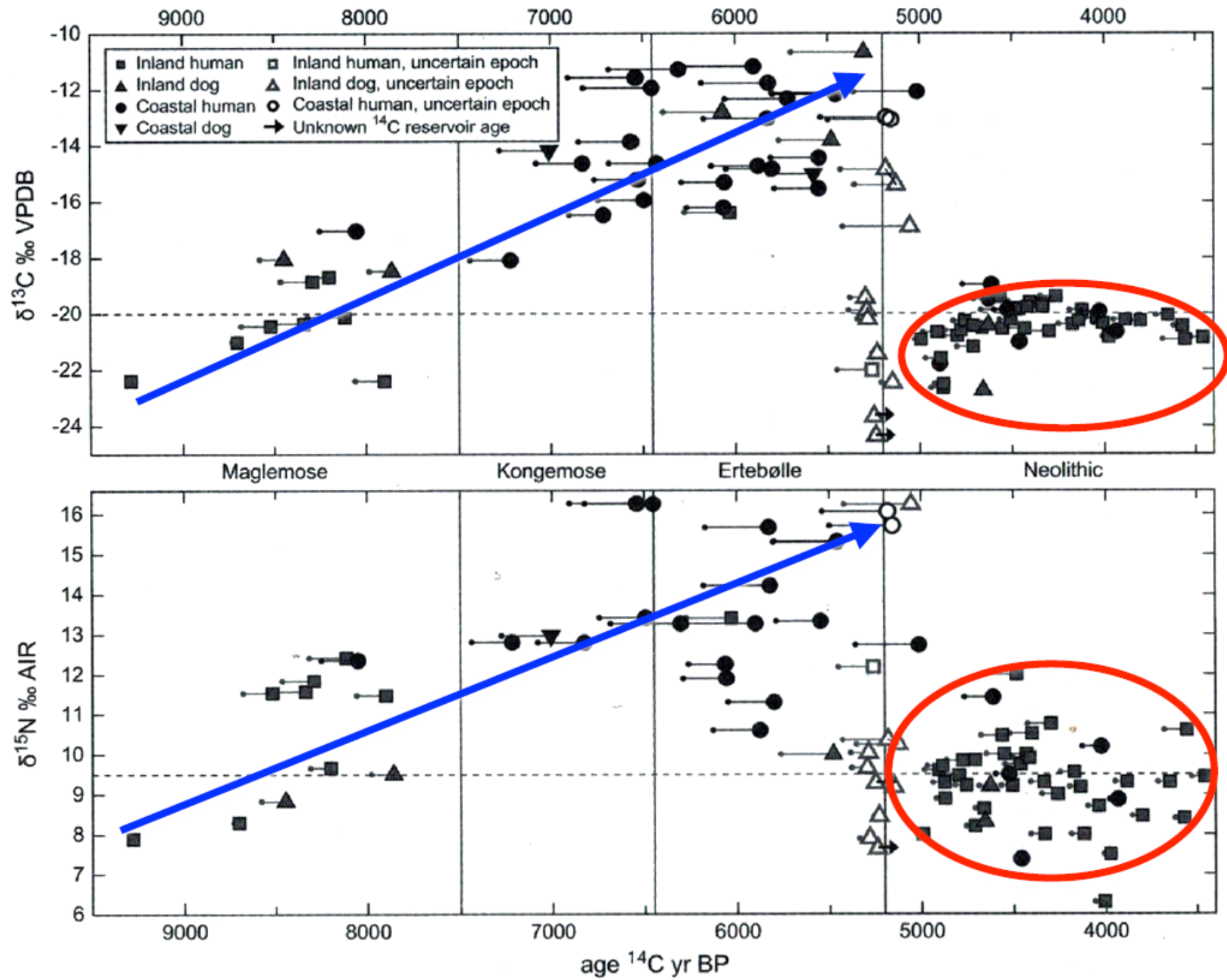
EXEMPLE : RESSOURCES ALIMENTAIRES AU MÉSOLITHIQUE ET AU NÉOLITHIQUE AU DANEMARK

- *Schulting, R. 2011. Mesolithic-Neolithic Transitions: An Isotopic Tour through Europe. In R. Pinhasi & J. T. Stock (eds) Human Bioarchaeology of the Transition to Agriculture, 15–41. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.*
- Synthèse des données isotopiques (C et N) mesurées sur des ossements humains et canins (utilisés comme proxy de l'alimentation humaine), du début du Mésolithique au Néolithique, au Danemark



EXEMPLE : RESSOURCES ALIMENTAIRES AU MÉSOLITHIQUE ET AU NÉOLITHIQUE AU DANEMARK

- Description du graphique :
 - On constate que les distributions des valeurs isotopiques de C et de N au Mésolithique et au Néolithique sont très différentes
 - Au **Mésolithique**, on constate une grande **variabilité** des valeurs observées tant pour C que pour N, avec une **augmentation** progressive mais très nette de la valeur moyenne du $\delta^{13}\text{C}$ et du $\delta^{15}\text{N}$ au cours du temps
 - Au **Néolithique**, on observe une très grande **homogénéité** du $\delta^{13}\text{C}$ et une relative homogénéité du $\delta^{15}\text{N}$, et très peu de variation temporelle



EXEMPLE : RESSOURCES ALIMENTAIRES AU MÉSOLITHIQUE ET AU NÉOLITHIQUE AU DANEMARK

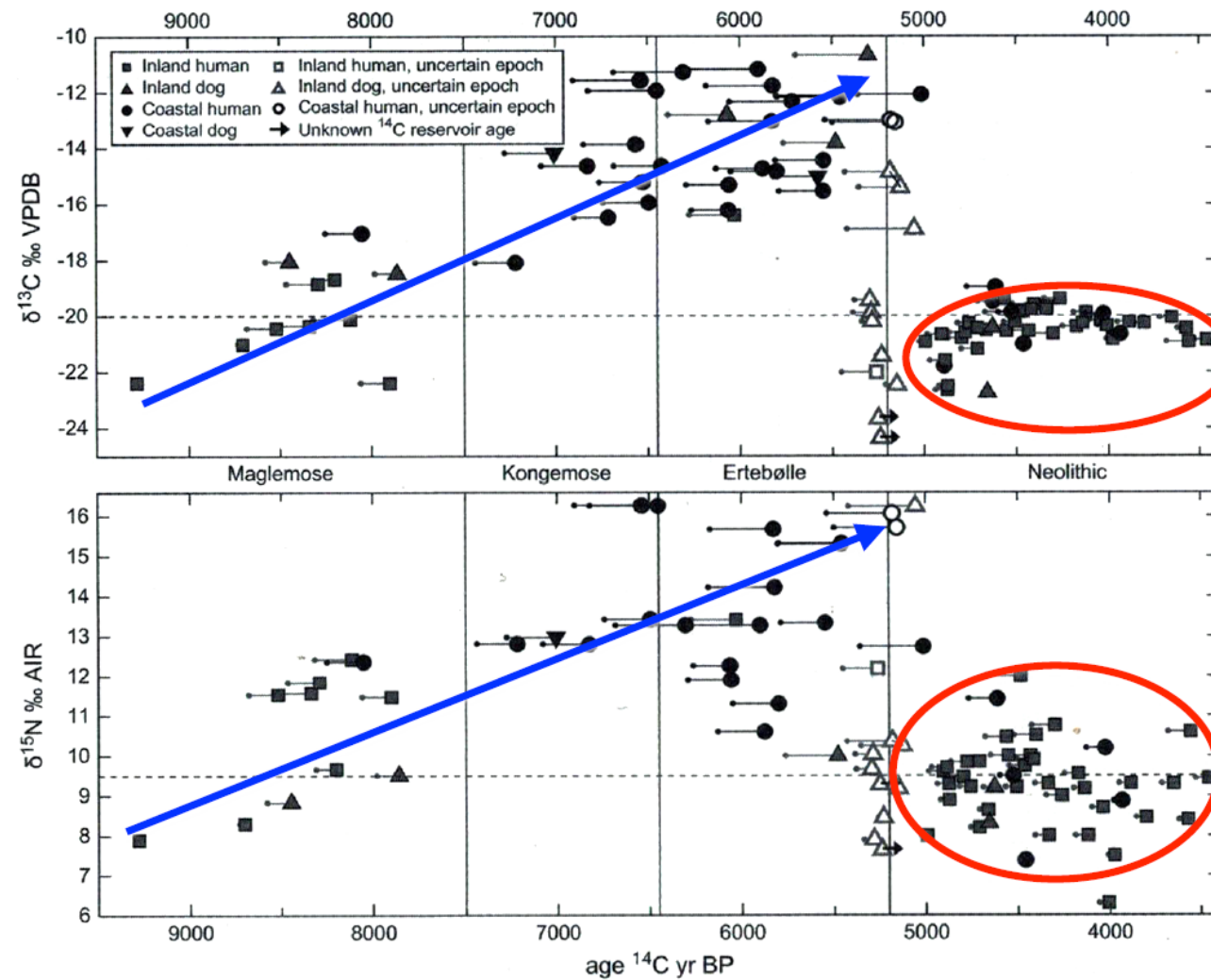
- Les analyses réalisées s'interprètent en termes de **régime alimentaire** des populations étudiées
- Au Mésolithique, avant 7500 BP, on constate un régime alimentaire reposant vraisemblablement sur un **mélange de ressources terrestres et maritimes** ($\delta^{13}\text{C}$ compris entre -23‰ (plantes en C3) et -17‰ (végétaux marins), avec **une part variable de l'alimentation carnée** ($\delta^{15}\text{N}$ compris entre 8‰ et $12,5\text{‰}$)
- A partir de 7500 BP et jusqu'à 5200 BP, la dépendance aux **ressources d'origine maritime s'accroît très significativement** ($\delta^{13}\text{C}$ compris entre -18‰ et -10‰) tout comme la part des protéines animales ($\delta^{15}\text{N}$ compris entre 10‰ et 16‰) dans l'alimentation

EXEMPLE : RESSOURCES ALIMENTAIRES AU MÉSOLITHIQUE ET AU NÉOLITHIQUE AU DANEMARK

- Au Néolithique, on observe une **transition brutale et générale** vers un régime alimentaire **très homogène**, basé quasi-exclusivement sur des **ressources terrestres** ($\delta^{13}\text{C}$ compris entre -23‰ et -19‰), et relativement pauvre en protéines animales ($\delta^{15}\text{N}$ compris entre 6‰ et 12‰ , avec une majorité des individus autour de 9‰).
- **Changement culturel majeur** : transition d'un mode de vie basée sur la **chasse et la collecte** (avec une alimentation **riche en produits carnés** et une **variabilité** alimentaire adaptée aux conditions locales) à un mode de vie d'agriculteur-éleveur (avec un régime alimentaire basé sur les **céréales** et une forte **standardisation** des ressources exploitées).

EXEMPLE : RESSOURCES ALIMENTAIRES AU MÉSOLITHIQUE ET AU NÉOLITHIQUE AU DANEMARK

- Mais *quid* du changement alimentaire observé au cours du Mésolithique ?



EXEMPLE : RESSOURCES ALIMENTAIRES AU MÉSOLITHIQUE ET AU NÉOLITHIQUE AU DANEMARK

- Transition Tardiglaciaire/Holocène : remontée des mers, transgression marine, transformation du lac d'eau douce Ancylus en Mer Baltique
- Les sites localisés au Danemark actuel, initialement continentaux, sont pour la plupart devenus côtiers



AUTRES APPLICATIONS DU $\delta^{13}\text{C}$ ET DU $\delta^{15}\text{N}$ EN ARCHÉOLOGIE

- Démontrer une stratification sociale de l'alimentation (valeurs isotopiques différentes entre individus privilégiés et individus défavorisés)
- Démontrer une stratification démographique de l'alimentation (alimentation variant selon le sexe et l'âge des individus)
- Etude de l'âge au sevrage des nourrissons (un bébé allaité exclusivement est un carnivore strict de très haut niveau trophique)
- Démontrer l'introduction de nouvelles ressources alimentaires (p.ex. le maïs en Europe)
- ...

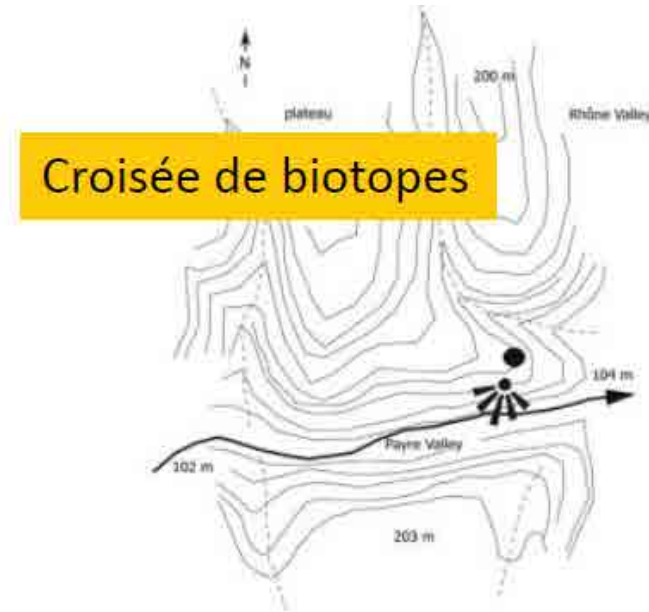
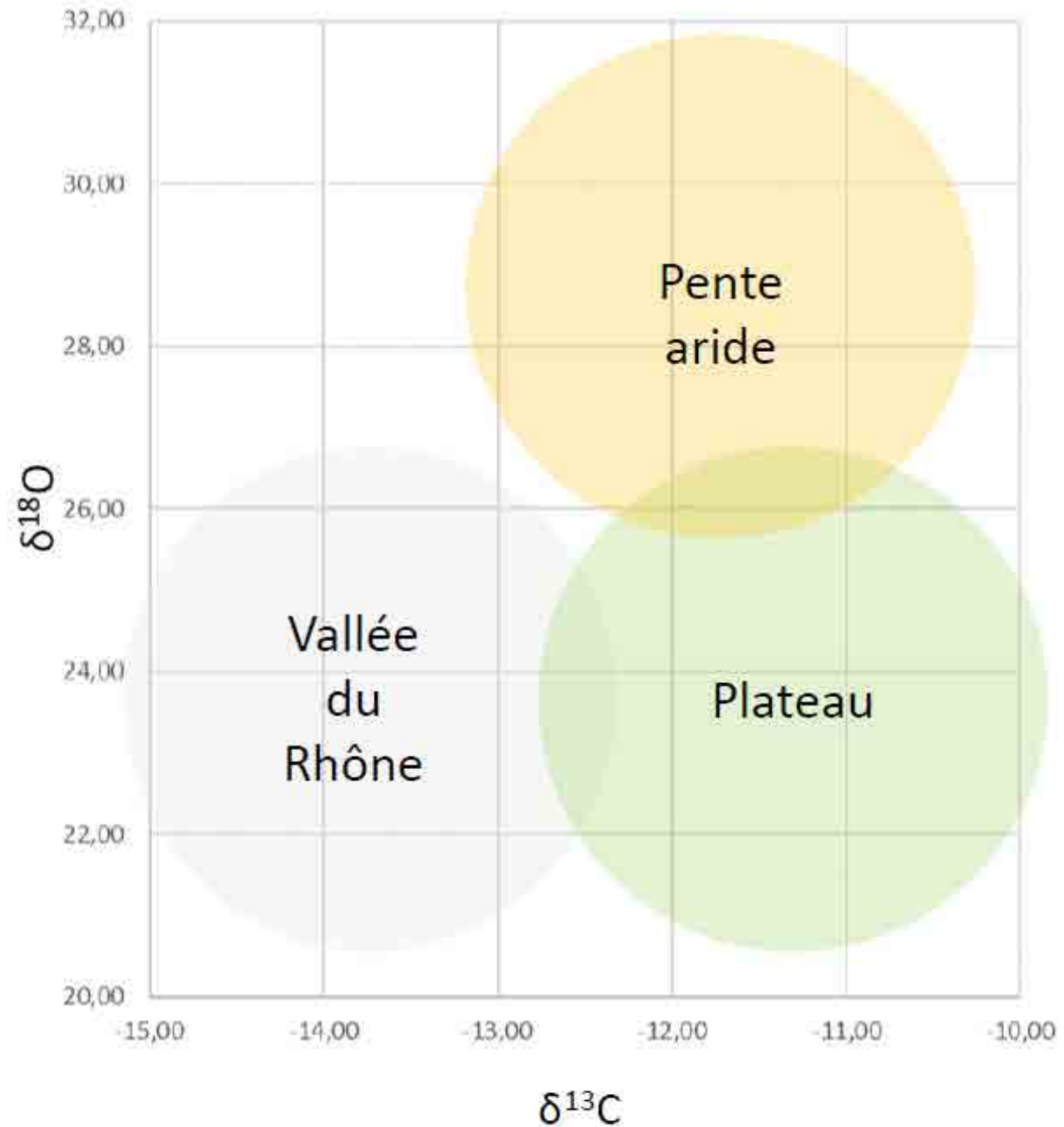
L'OXYGÈNE : UN MARQUEUR PALÉO-ENVIRONNEMENTAL

- L'oxygène des tissus des animaux terrestres provient de leur eau de boisson ; celui des animaux aquatiques de leur milieu de vie
- **Donc aucun impact du niveau trophique**
- En revanche, le $\delta^{18}\text{O}$ d'une eau varie en fonction de la **température** et de la **salinité**
 - Eaux formées à T° élevée : appauvries en $\delta^{18}\text{O}$; à T° basses : enrichies en $\delta^{18}\text{O}$
 - Enrichissement en $\delta^{18}\text{O}$ avec salinité croissante
- Le $\delta^{18}\text{O}$ est donc une importante source de **données paléoclimatologiques et environnementales**

EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE, env. 200 000 ans)

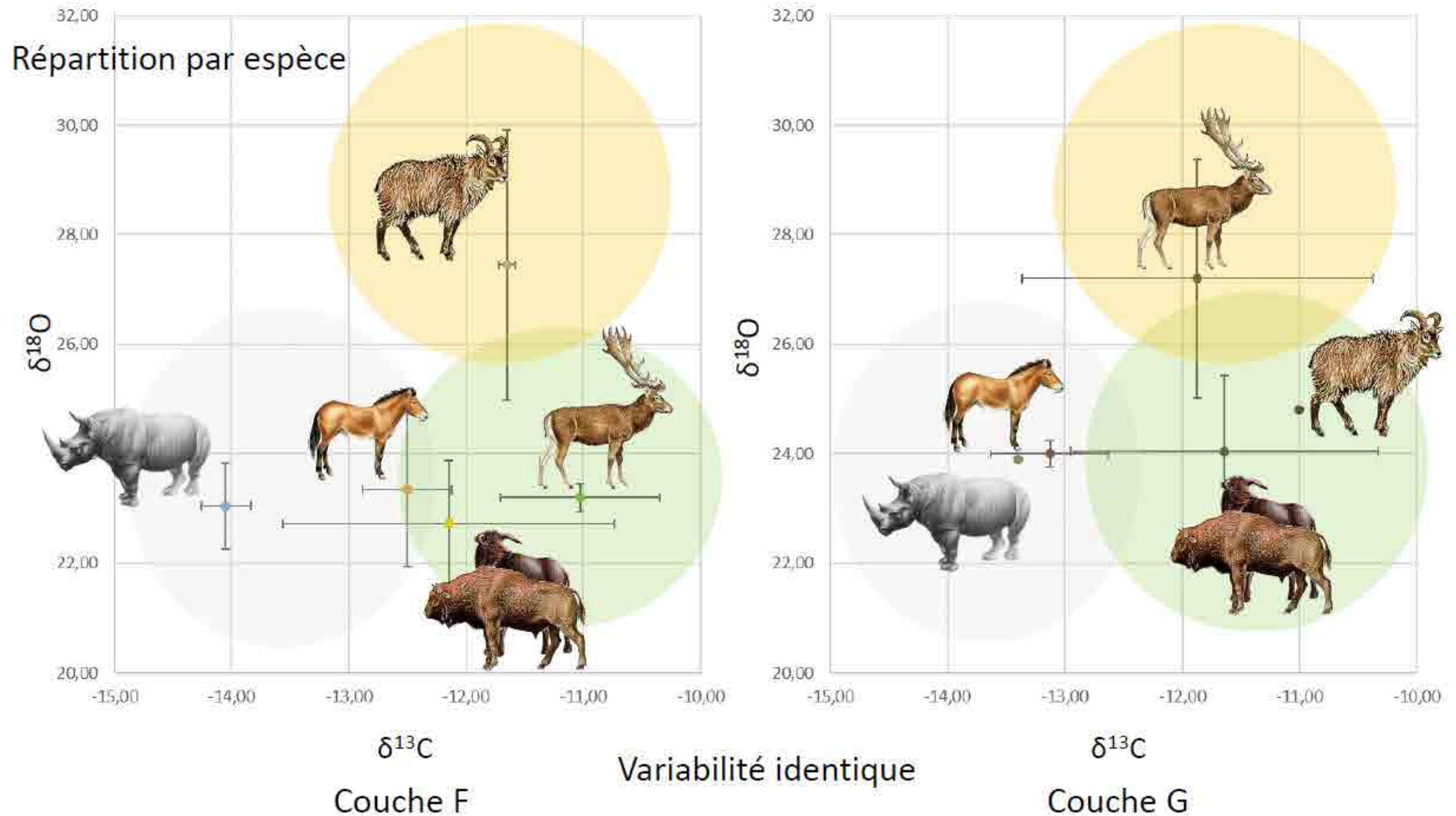
- *Bocherens H., Díaz-Zorita Bonilla M., Daujeard C., Fernandes P., Raynal J.-P., Moncel M.-H., Direct isotopic evidence for subsistence variability in Middle Pleistocene Neanderthals (Payre, southeastern France), 2016, Quaternary Science Reviews, Volume 154, 226-236*
- Utilisation de l'Oxygène (O) et du Carbone (C) pour reconstruire la répartition des espèces animales dans le territoire et retrouver la position de Neandertal dans les écosystèmes

EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)



- Modèle représentant les valeurs isotopiques attendues pour les biotopes autour de Payre.
- C plus bas dans la vallée par rapport à la pente aride et le plateau
- O plus haut dans la pente par rapport au plateau à la vallée

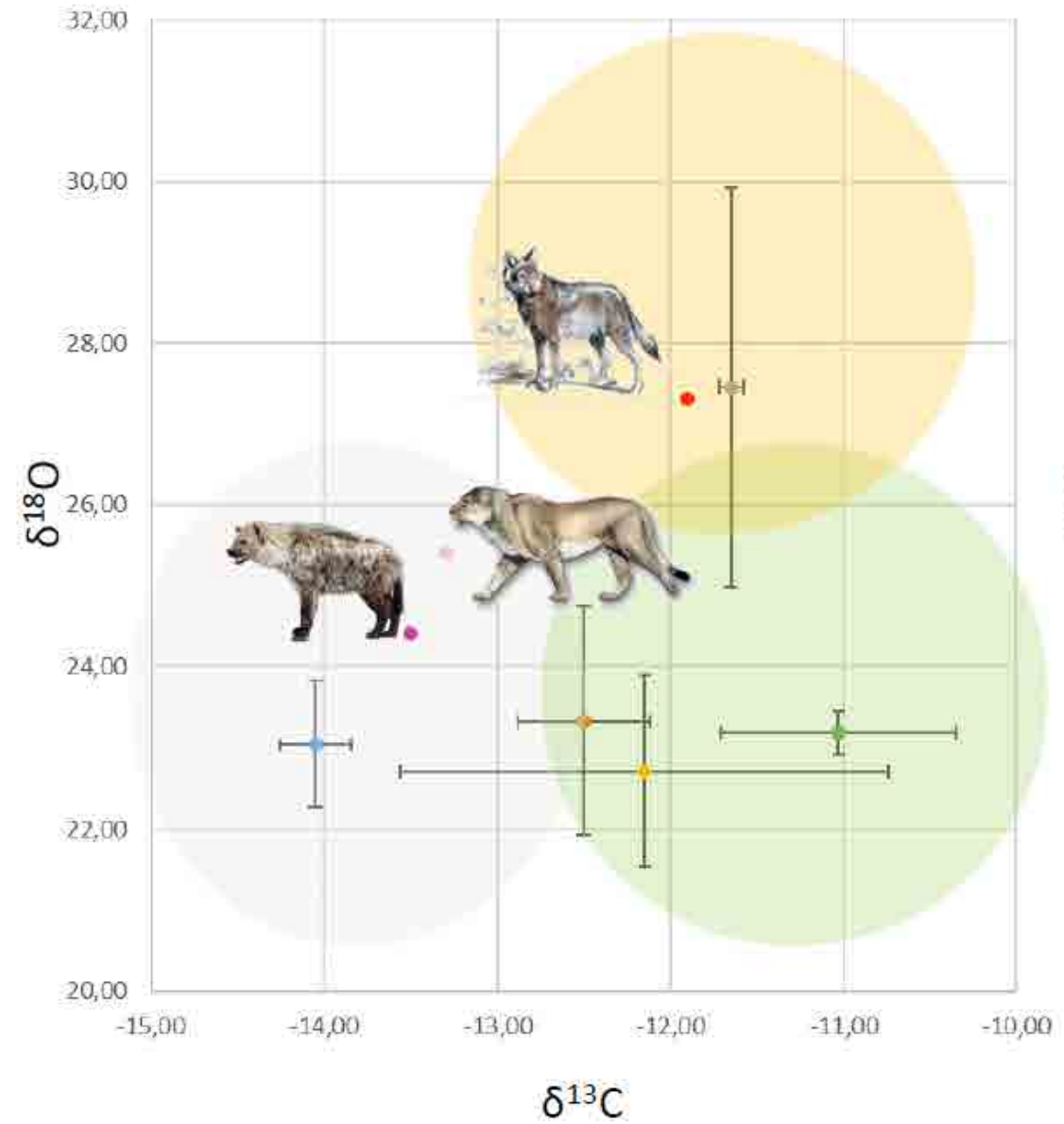
EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)



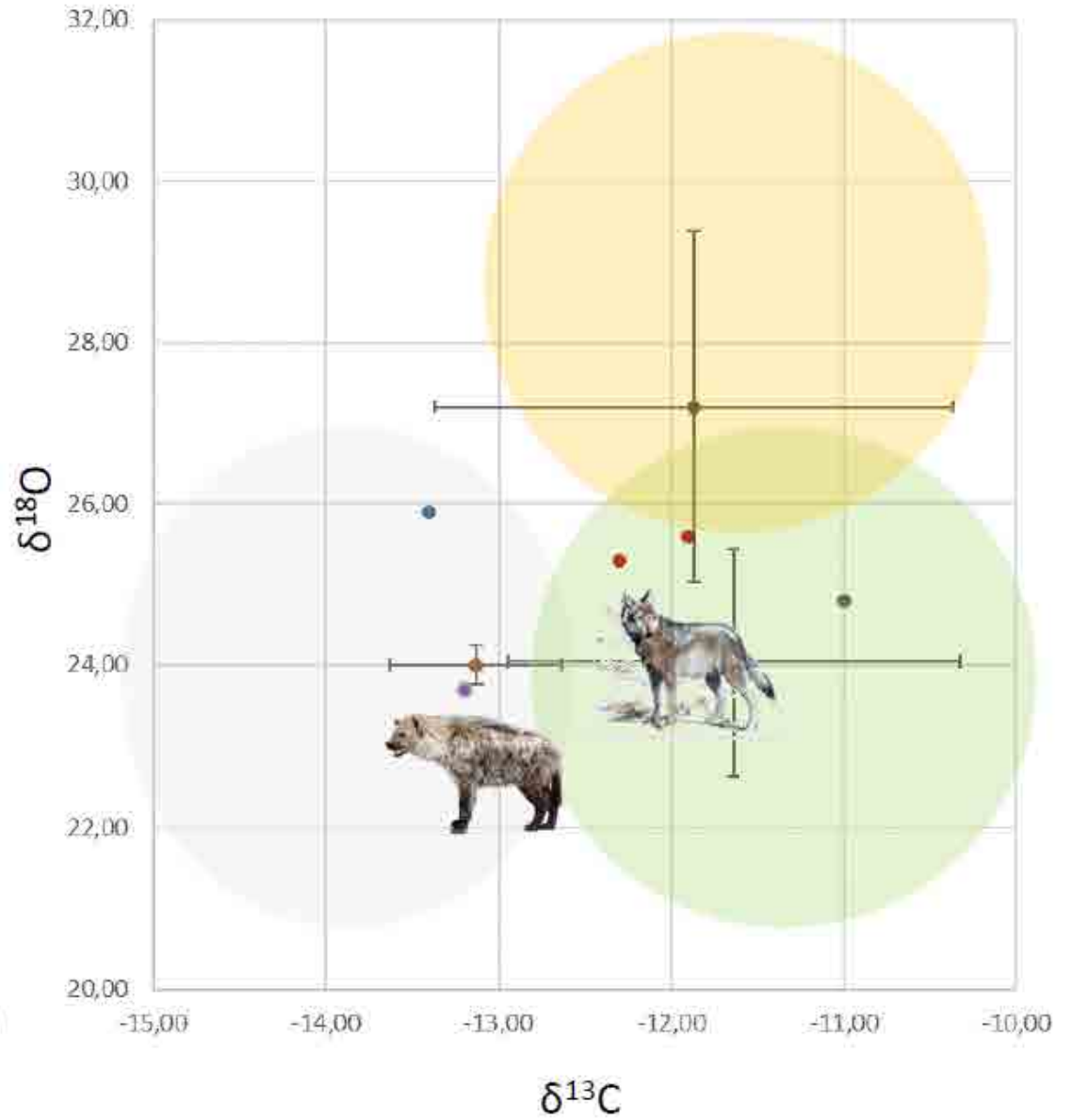
EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)

- Espèces replacées dans le modèle où les valeurs isotopiques en O et en C reflètent la diversité du territoire.
 - > Indique la répartition des espèces herbivores dans le territoire pour les couches F et G de Payre
- Couche F :
 - Vallée : Rhinocérotidés
 - Plateau : Cheval, cerf, bovinés
 - Pente : Bouquetin
- Couche G :
 - Vallée : Rhinocérotidés, cheval
 - Plateau : Bovinés, bouquetin
 - Pente : Cerf

EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)



Couche F

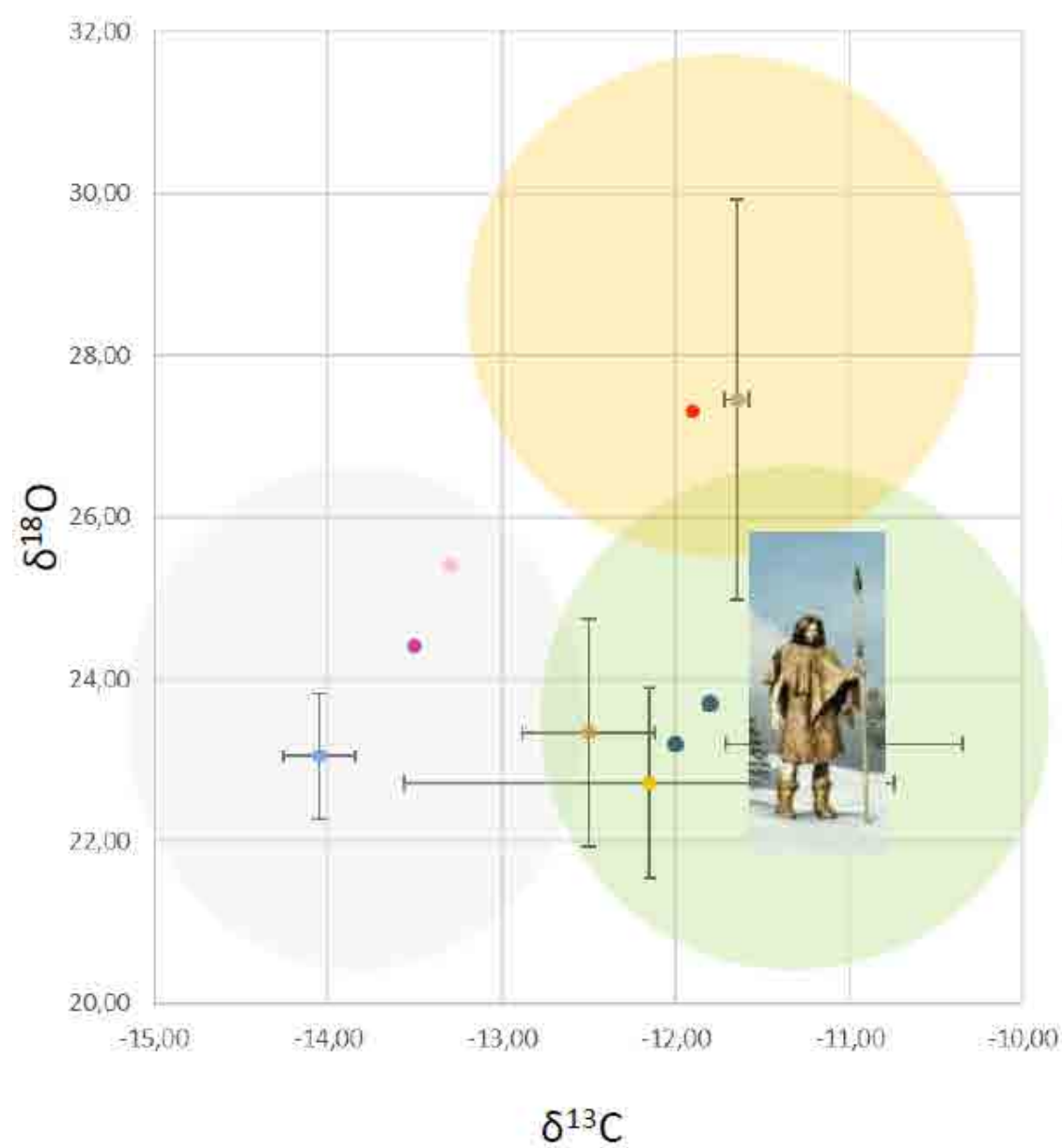


Couche G

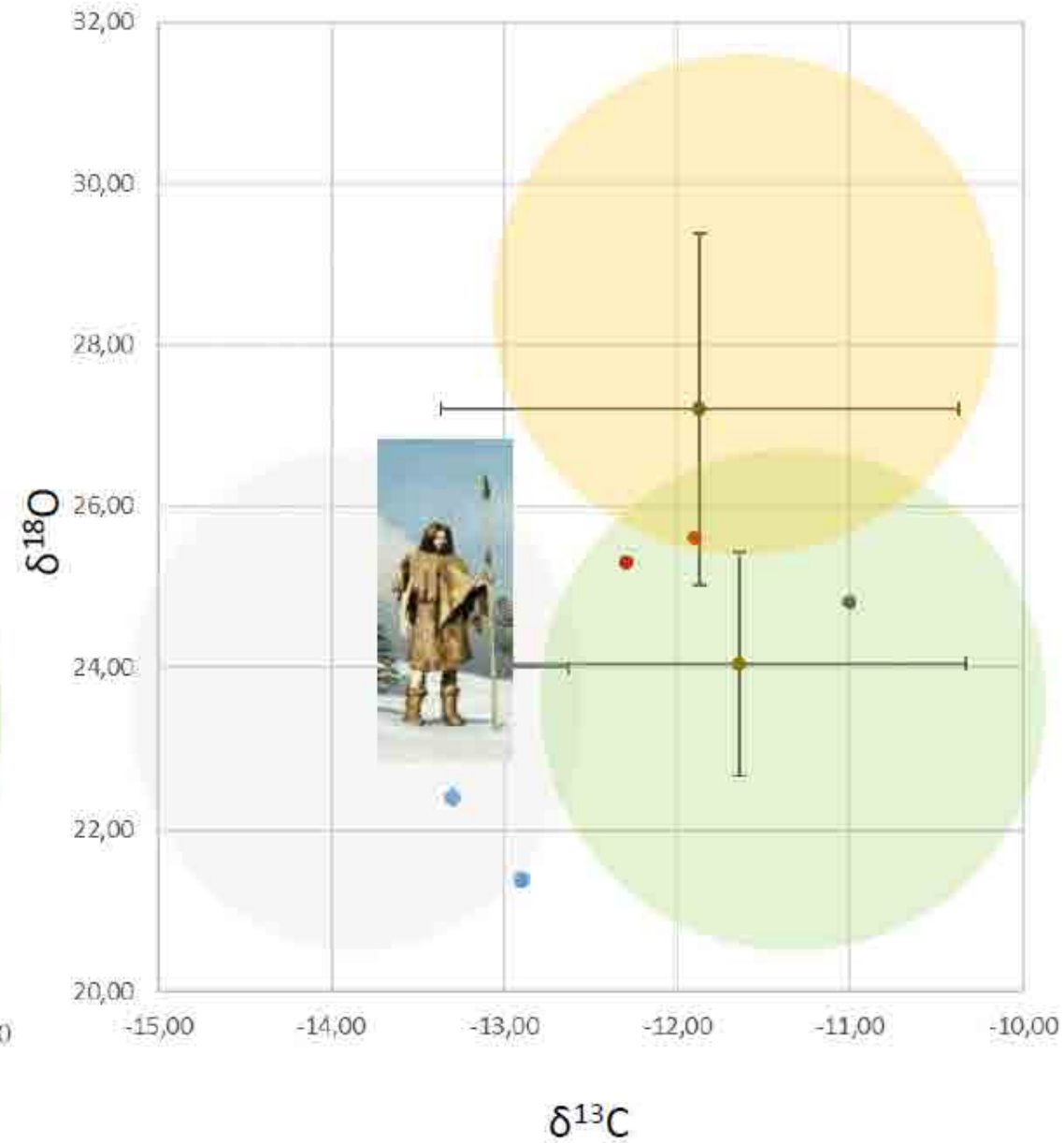
EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)

- Espèces replacées dans le modèle où les valeurs isotopiques en O et en C reflètent la diversité du territoire.
 - > Indique la répartition des espèces carnivores dans le territoire pour les couches F et G de Payre
- Couche F :
 - Vallée : Hyénidés, lions
 - Plateau : Aucun
 - Pente : Loup
- Couche G :
 - Vallée/Plateau : Hyénidés
 - Plateau : Loup
 - Pente : Aucun

EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)



Couche F

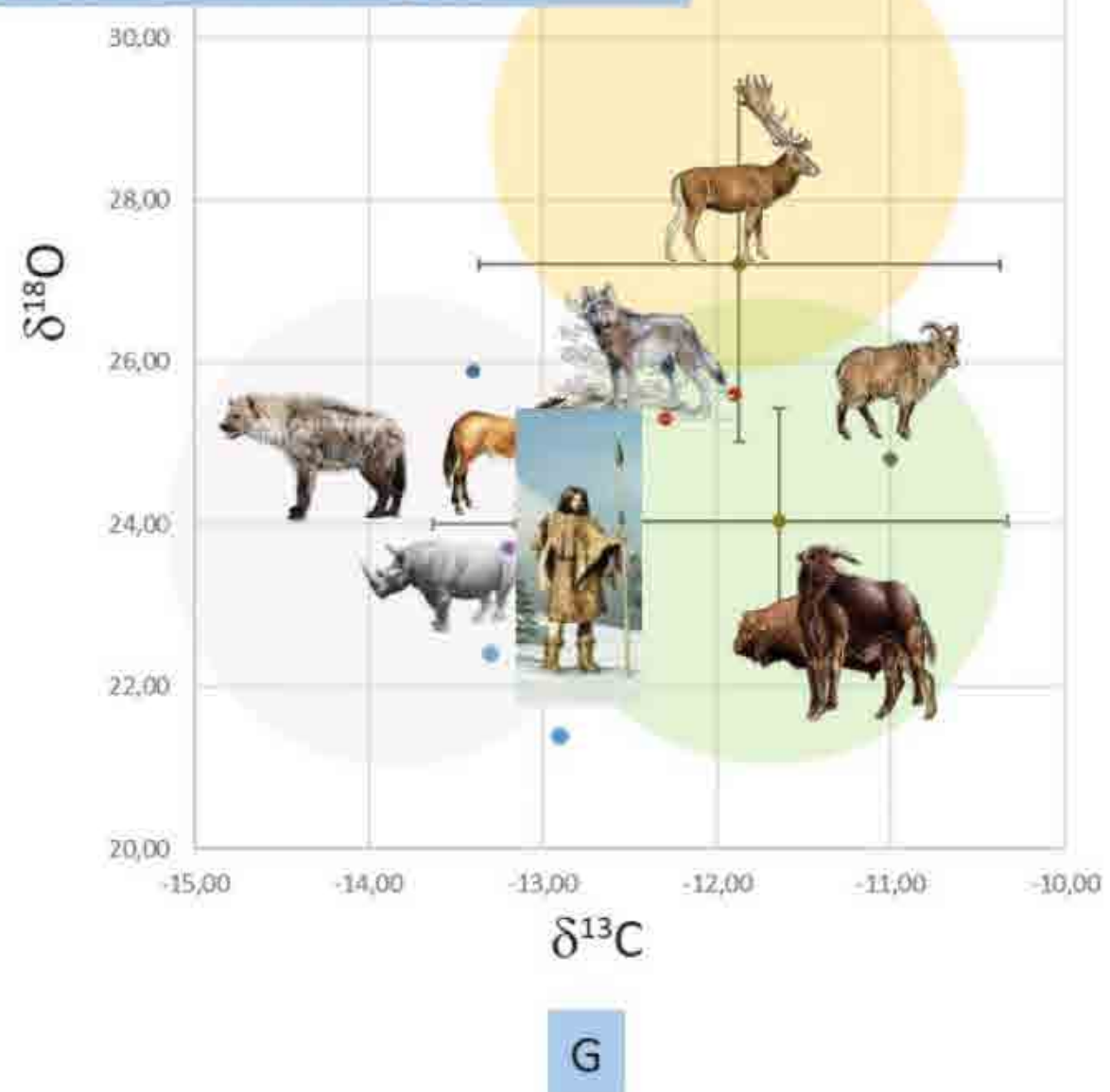
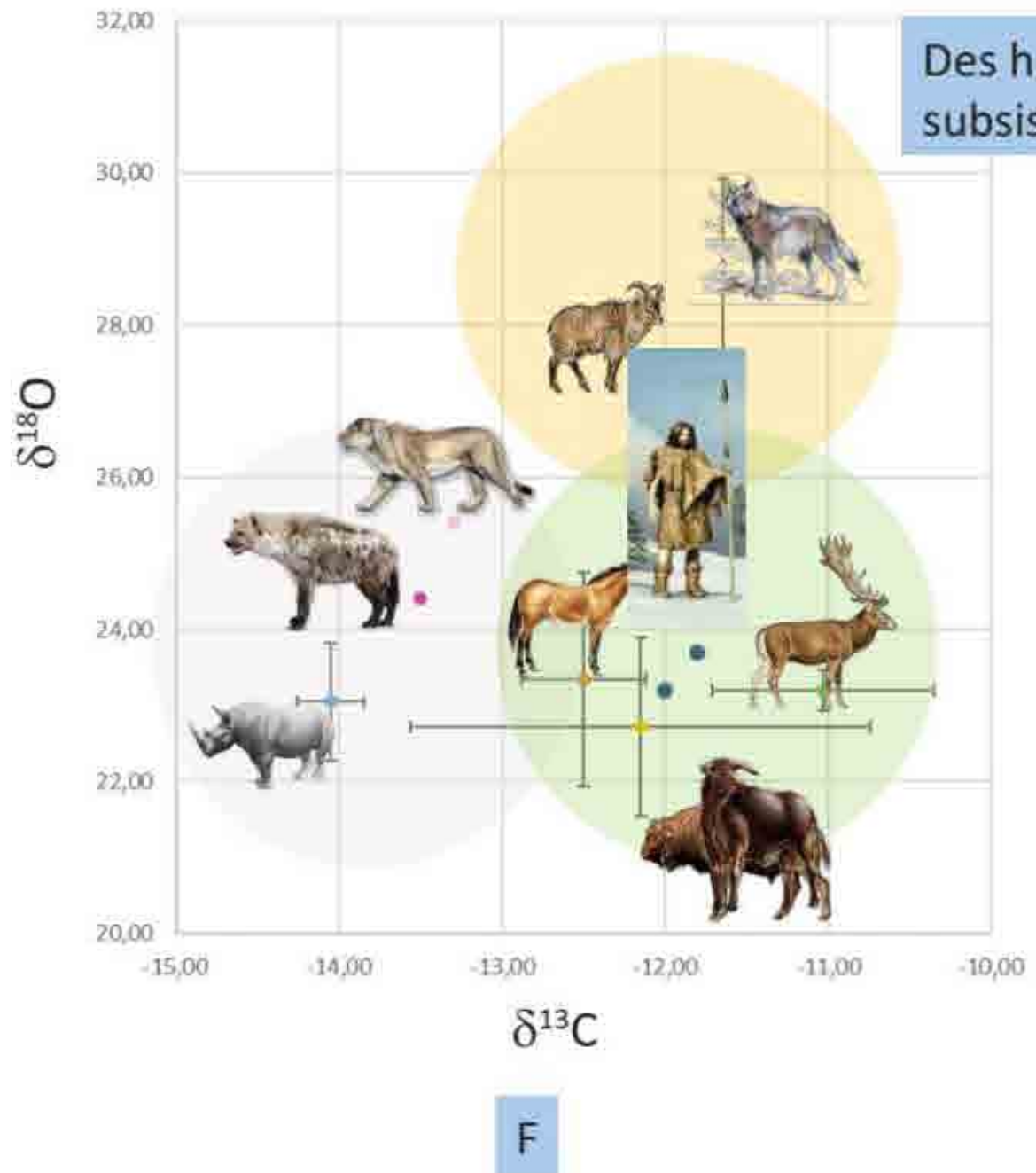


Couche G

EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)

- Espèces replacées dans le modèle où les valeurs isotopiques en O et en C reflètent la diversité du territoire.
 - > Indique la répartition des humains dans le territoire pour les couches F et G de Payre
- Couche F :
 - Plateau : Neandertal
- Couche G :
 - Vallée/Plateau : Néandertal

EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)



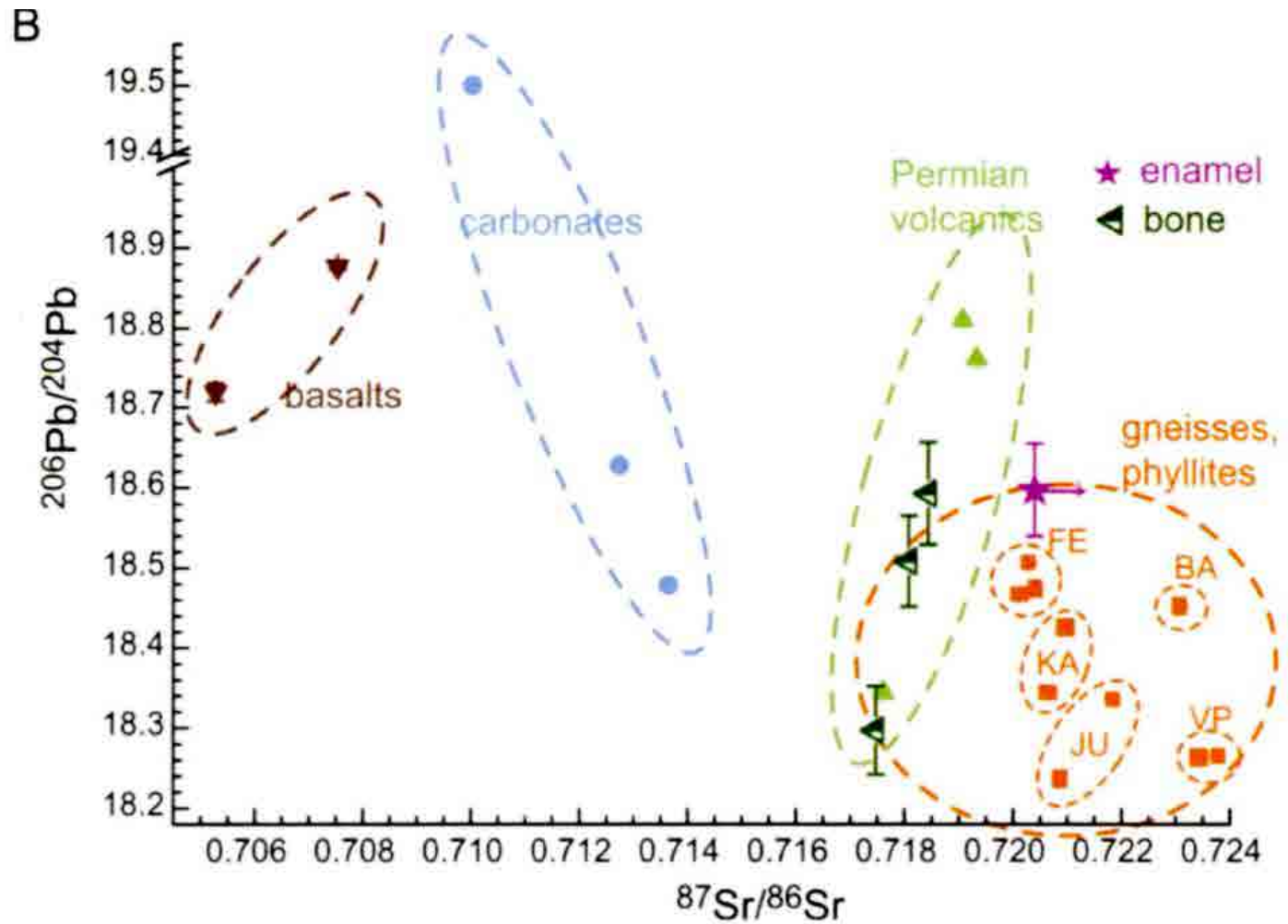
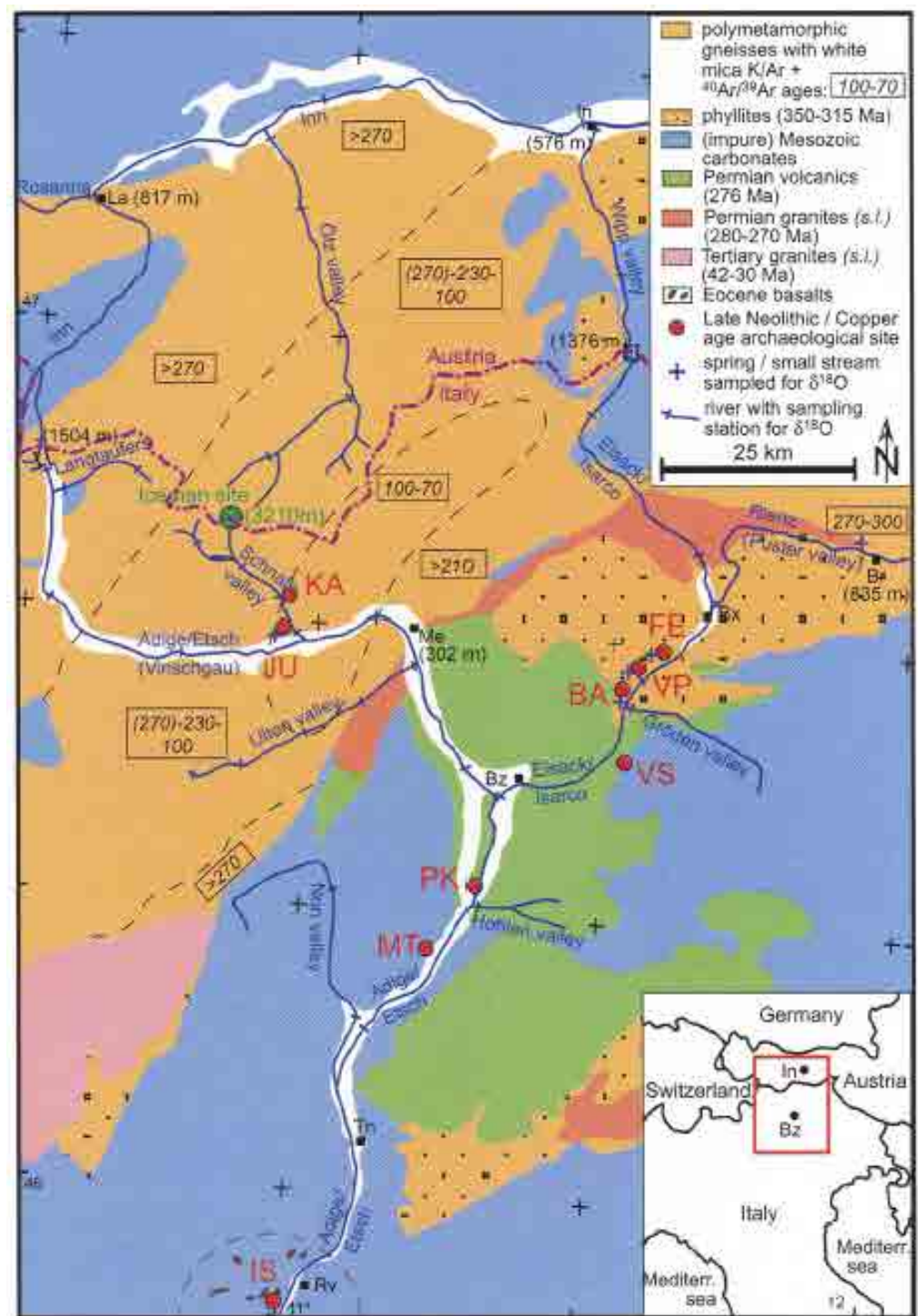
EXEMPLE : EXPLOITATION VARIEE DES TERRITOIRES PAR NEANDERTAL A PAYRE (ARDECHE)

- Espèces replacées dans le modèle où les valeurs isotopiques en O et en C reflètent la diversité du territoire.
 - > Indique les espaces exploités par Néandertal au cours du temps et selon ses modes d'occupation du site de Payre.
- Couche F : Occupations brèves = camps de chasse ponctuels
 - Valeurs de Néandertal centrées sur l'ellipse du plateau
 - Exploitation réduite de l'environnement, limitée au plateau
- Couche G : Occupations longues = habitat
 - Valeurs de Néandertal à l'intersection des ellipses du plateau et de la vallée
 - Exploitation plus exhaustive du territoire en incluant les deux espaces du plateau et de la vallée

LE STRONTIUM, MARQUEUR GÉOGRAPHIQUE

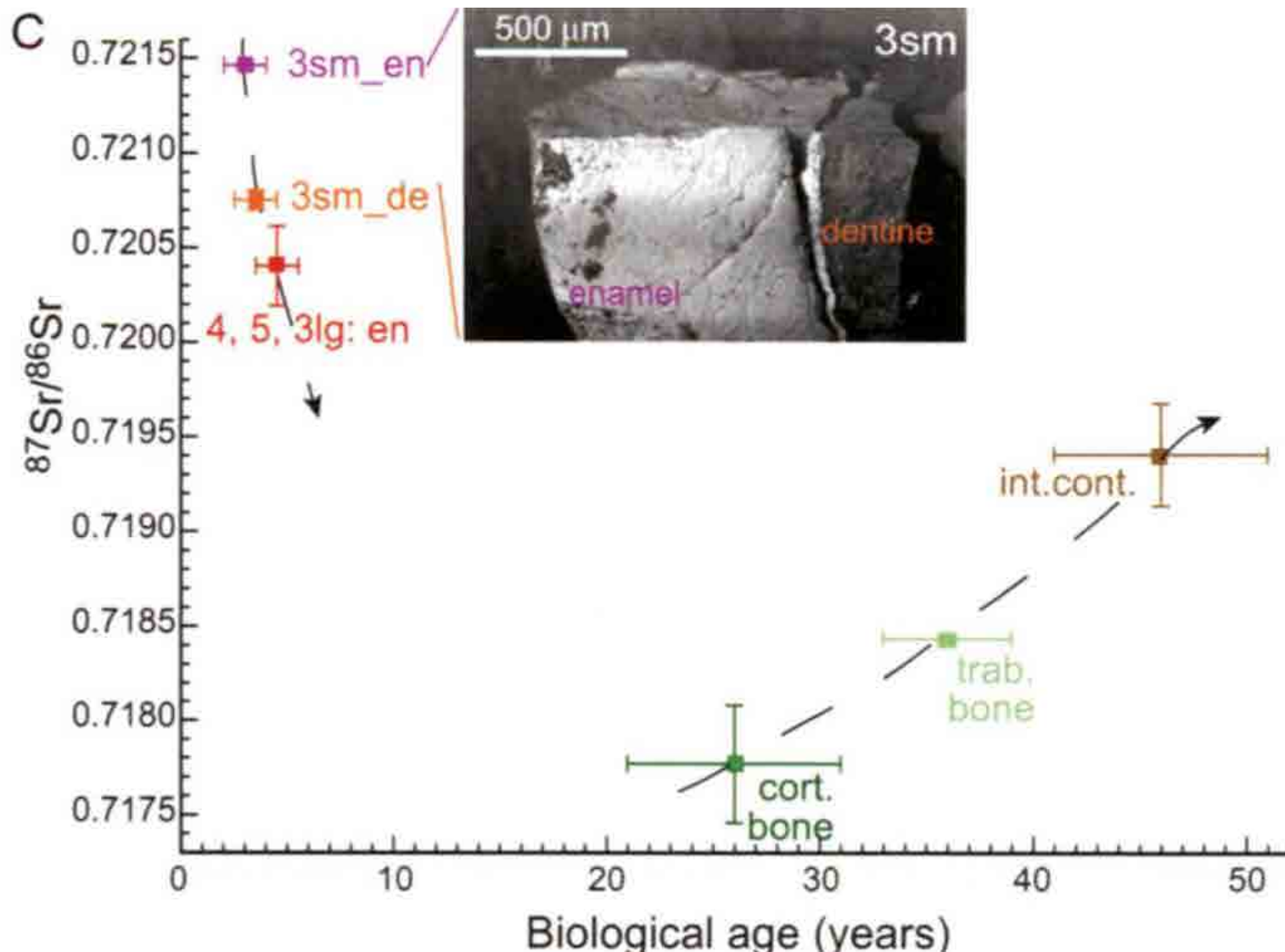
- Minéral se fixant en faible quantité dans les tissus calcifiés, en proportions isotopiques identiques à celles du terrain
- Issu de l'eau de boisson et de l'alimentation végétale - pas de fractionnement trophique
- Rapport isotopique variant en fonction du terrain : âge géologique, composition minérale, proximité d'un environnement marin, nature et intensité de l'érosion...
 - > Ratio caractéristique (avec précision variable) du lieu où s'est formé le tissu analysé
 - > Utilité dans analyse de provenance des individus et/ou des aliments consommés (importations)

EXEMPLE : ORIGINE GÉOGRAPHIQUE ET MOBILITÉ D'ÖTZI



- Analyses en Sr et Pb de roches locales et de tissus biologiques d'Ötzi
- Enfance sur terrain de gneiss ou de phyllites ; âge adulte sur roches volcaniques permiennes

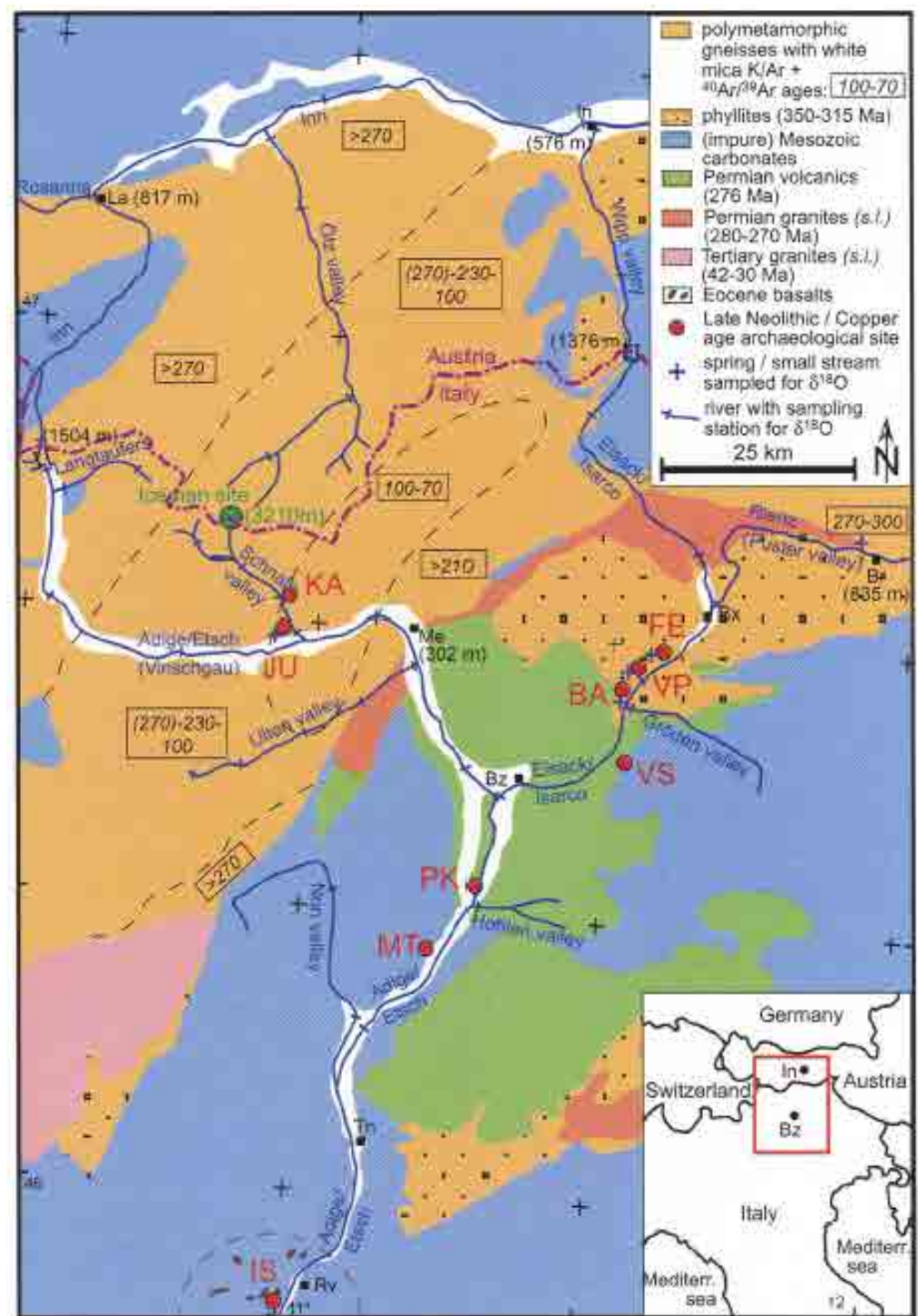
EXEMPLE : ORIGINE GÉOGRAPHIQUE ET MOBILITÉ D'ÖTZI



Variabilité des rapports isotopiques de Sr en fonction de l'âge de formation des tissus d'Ötzi : assez importante mobilité au cours de sa vie

Rapports isotopiques du strontium en fonction de l'âge de formation des tissus. Prélèvements, de gauche à droite : émail canine (3sm-en), dentine canine (3sm-de), émail prémolaire, os compact (cort. bone), os spongieux (trab. bone), contenu intestinal (int. cont.).

EXEMPLE : ORIGINE GÉOGRAPHIQUE ET MOBILITÉ D'ÖTZI



Source prélèvement	$\delta^{18}O$
Ötzi : Canine	-10,6 ‰
Ötzi : Première prémolaire	-11,0 ‰
Ötzi : Os compact (p.ex., fémur)	-11,7 ‰
Ötzi : Os spongieux (p.ex., côte)	-11,4 ‰
Eau des sources et rivières du bassin versant méditerranéen	entre -9,2 et -13,9 ‰
Eau des sources et rivières du bassin versant atlantique de la	entre -12,0 et -16,4 ‰
Eau du glacier du Hauslabjoch	entre -13,4 et -16,4 ‰

Carte géologique simplifiée de la zone d'étude. Le cercle vert représente le lieu de découverte de la momie. La frontière entre l'Autriche et l'Italie correspond également à la ligne de partage des eaux entre le bassin atlantique (Autriche) et méditerranéen (Italie).