

NANTES UNIVERSITÉ
UNITÉ DE FORMATION ET DE RECHERCHE
D'ODONTOLOGIE

Année 2022

N° 3867

**APPORT DE L'ÉTUDE DES ISOTOPES PRÉSENTS
DANS L'ORGANE DENTAIRE EN ANTHROPOLOGIE :
ANALYSE DE LA LITTÉRATURE**

THÈSE POUR LE DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

présentée
et soutenue publiquement par

ROLLAND Clémence

le 13 décembre 2022 devant le jury ci-dessous

Président : Monsieur le Pr. LE GUEHENNEC Laurent

Assesseur : Monsieur le Dr. AMADOR DEL VALLE Gilles

Assesseur : Madame la Dr. CLOUET Roselyne

Directrice de thèse : Madame la Dr. JORDANA Fabienne

 Nantes Université	Présidente - Pr BERNAULT Carine
 Pôle Santé UFR Odontologie	Doyen - Pr SOUEIDAN Assem
<u>Asseseurs</u> Dr GAUDIN Alexis Pr LE GUEHENNEC Laurent Pr LESCLOUS Philippe	

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers des C.S.E.R.D	
Mme ALLIOT-LICHT Brigitte	Mme LOPEZ Serena
M AMOURIQ Yves	Mme PEREZ Fabienne
Mme CHAUX Anne-Gaëlle	M. WEISS Pierre
M. LABOUX Olivier	

Professeur des Universités
M. BOULER Jean-Michel

Maitre de conférence des Universités
Mme VINATIER Claire

Professeur Emérite
M. GIUMELLI Bernard

Enseignants Associés	
M. GUIHARD Pierre (Professeur Associé)	M. MAITRE Yoann (Assistant Associé)
Mme LOLAH Aoula (Assistant Associé)	M. KOUADIO Ayepa Alain (Assistant Associé)
M. BANDIAKY Octave (Assistant Associé)	

Maitres de conférences des Universités - Praticiens Hospitaliers des C.S.E.R.D	Assistants Hospitaliers Universitaires des C.S.E.R.D
M. AMADOR DEL VALLE Gilles	M. ALLIOT Charles
Mme ARMENGOL Valérie	Mme CLOUET Roselyne
Mme BLERY Pauline	M. EVRARD Lucas
M. BODIC François	M. GUILLEMIN Maxime
Mme CLOITRE Alexandra	Mme HASCOET Emilie
Mme DAJEAN-TRUTAUD Sylvie	Mme HEMMING Cécile
M. DENIS Frédéric	M. HIBON Charles
Mme ENKEL Bénédicte	Mme OYALLON Mathilde
M. HOORNAERT Alain	Mme QUINSAT Victoire Eugenie
Mme HOUCHMAND-CUNY Madline	M. REMAUD Matthieu
Mme JORDANA Fabienne	M. RETHORE Gildas
M. LE BARS Pierre	M. SERISIER Samuel
M. NIVET Marc-Henri	Mme TISSERAND Lise
M. PRUD'HOMME Tony	
Mme RENARD Emmanuelle	
M. RENAUDIN Stéphane	
M. STRUILLOU Xavier	
M. VERNER Christian	

Praticiens Hospitaliers	
Mme DUPAS Cécile	Mme HYON Isabelle

Par délibération, en date du 6 décembre 1972, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'il n'entend leur donner aucune approbation, ni improbation.

A Monsieur le Professeur Laurent LE GUEHENNEC,

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier des Centres de Soins d'Enseignement et
de Recherche Dentaires

Docteur de l'Université de Nantes Habilité à Diriger les Recherches

Chef du Département de Prothèses

- NANTES -

*Pour m'avoir fait l'honneur d'avoir accepté de présider cette thèse,
Pour votre investissement à la faculté d'Odontologie de Nantes,
Veuillez trouver ici l'expression de ma respectueuse considération.*

A Madame la Docteur Fabienne JORDANA

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier des Centres de Soins
d'Enseignement et de Recherche Dentaires

Docteur de l'Université de Bordeaux Habilité à Diriger les Recherches

Département de Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques,

Biomatériaux, Biophysique, Radiologie

- NANTES -

*Pour avoir accepté sans hésitation de diriger cette thèse,
Pour votre gentillesse, votre disponibilité et votre patience tout au long du travail de
recherche et de rédaction,
Pour votre implication dans vos enseignements au sein de la faculté d'Odontologie de
Nantes,
Veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect et de ma reconnaissance.*

A Monsieur le Docteur Gilles AMADOR DEL VALLE

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier des Centres de Soins
d'Enseignement et de Recherche Dentaires

Docteur de l'Université de Nantes Habilité à Diriger les Recherches

Chef du Département de Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie
Légale

- NANTES -

*Pour avoir accepté de faire partie de ce jury,
Pour la qualité de vos enseignements et votre encadrement au sein de la faculté
d'Odontologie de Nantes,
Pour m'avoir guider dans mon souhait de me former en Odontologie médico-légale,
Je vous adresse mes plus sincères remerciements.*

A Madame la Docteur Roselyne CLOUET

Assistante Hospitalière Universitaire des Centres de Soins d'Enseignement et de Recherche
Dentaires Département de Prothèses

- NANTES -

Pour votre présence au sein de ce jury,

Pour votre aide et vos conseils précieux en clinique, ainsi que pour votre bienveillance,

Je vous adresse ici les sentiments de ma profonde gratitude.

Table des matières

1 : INTRODUCTION.....	9
2 : GÉNÉRALITÉS.....	10
2-1 : La dent.....	10
2-1-1 : Coupe longitudinale d'une molaire (4).....	10
2-1-2 : Émail dentaire.....	10
2-1-3 : Dentine.....	11
2-1-4 : La pulpe.....	11
2-1-5 : La dentition.....	11
2-2 : Atomes.....	12
.....	12
2-2-1 : Notions d'isotopes.....	12
2-2-2 : Notion de radioactivité.....	13
2-2-3 - Notations.....	13
2-2-3-1 :Éléments non métalliques.....	13
.....	13
2-2-3-2 : Éléments métalliques.....	14
2-2-3-3 : Fractionnement isotopique.....	14
2-3 : Notion d'anthropologie.....	15
3 : Méthodes de mesures.....	16
3-1 : Echantillonnage.....	16
3-2 : Spectromètre de masse.....	16
3-2-1 : DI-IRMS.....	17
3-2-2 : CF-IRMS.....	17
3-2-3 : Choix des échantillons.....	18
3-2-4 : Biais possibles dans l'analyse isotopique.....	19
4 : Les isotopes utilisés en anthropologie.....	20
4-1 : Le carbone.....	20
4-1-1 : La photosynthèse.....	20
4-1-2 : Le carbone et l'alimentation.....	21
4-2 : L'azote.....	21
4-2-1 : Assimilation de l'azote atmosphérique.....	21
.....	21
4-2-2 : Azote et alimentation.....	22
.....	22
4-2-3 : Azote et sevrage.....	22
4-4 : Oxygène et l'hydrogène.....	23
4-5 : Le strontium.....	24
4-6 : Isoscapes et bases de données.....	24
5 : Applications.....	25
5-1 : Utilisations principales de l'analyse isotopique en anthropologie.....	25
5-1-1 : Alimentation (C, N).....	25
5-1-2 : Origine géographique, mobilité (O, H, Sr).....	26
5-1-3 : Sevrage.....	27
5-1-4 : Classe sociale.....	27
5-2 : Applications à différentes périodes, multi-isotopiques.....	27
5-2-1 : Discrimination des soldats lors de grandes guerres.....	28
5-2-2 : Enquêtes non résolues.....	28
5-2-3 : Identification des corps des sans-papiers retrouvés à la frontière USA-Mexicaine.....	28
5-2-4 : Etude des populations anciennes.....	29
6 : Conclusion.....	31

1 : INTRODUCTION

Les dents représentent une riche source d'informations concernant la personne à qui elles ont appartenu. Leur analyse, que ce soit dans un contexte médico-légal (mort récente) ou dans un contexte plus ancien, peut parfois permettre de faire la différence pour identifier des restes humains.

En effet, la dent se conserve très bien dans le temps, car protégée par une cage osseuse et musculaire, en plus de sa composition qui la rend résistante en elle-même (1).

La dent peut résister à la putréfaction, à l'immersion (que ce soit dans l'eau douce ou salée), à l'acide (qui n'a que peu d'effets sur l'émail à court terme), ou à la crémation (elle se détruira que lors d'une crémation extrême).

Dans un contexte médico-légal, la dent peut fournir des indications sur l'âge, le sexe, sur la provenance, sur la classe sociale, et grâce à la comparaison avec le dossier *ante mortem* et dans le cas d'une assez bonne conservation de la denture, peut permettre d'identifier précisément un individu (1).

L'analyse isotopique, dont l'utilisation tend à s'accroître, peut permettre non pas d'attribuer une identité à des restes humains, mais donne des indices sur le lieu de naissance, sur le lieu de résidence adulte à long terme, sur les antécédents de voyages récents, sur la migration géographique, et sur la tendance alimentaire d'un individu, ou groupe d'individus. Ceci en comparant les données de l'échantillon étudié avec des données acquises sur des Hommes contemporains des individus étudiés, ou de leur environnement (2,3).

Ce type d'analyse n'en est qu'à ses débuts, mais ses applications dans le domaine de l'anthropologie sont prometteuses.

Le but de cette analyse de littérature est de décrire les procédures d'analyse des isotopes stables présents dans une dent, et de faire un résumé de leurs applications en anthropologie.

2 : GÉNÉRALITÉS

2-1 : La dent

2-1-1 : Coupe longitudinale d'une molaire

Cette illustration représente une coupe de molaire dans son environnement osseux.

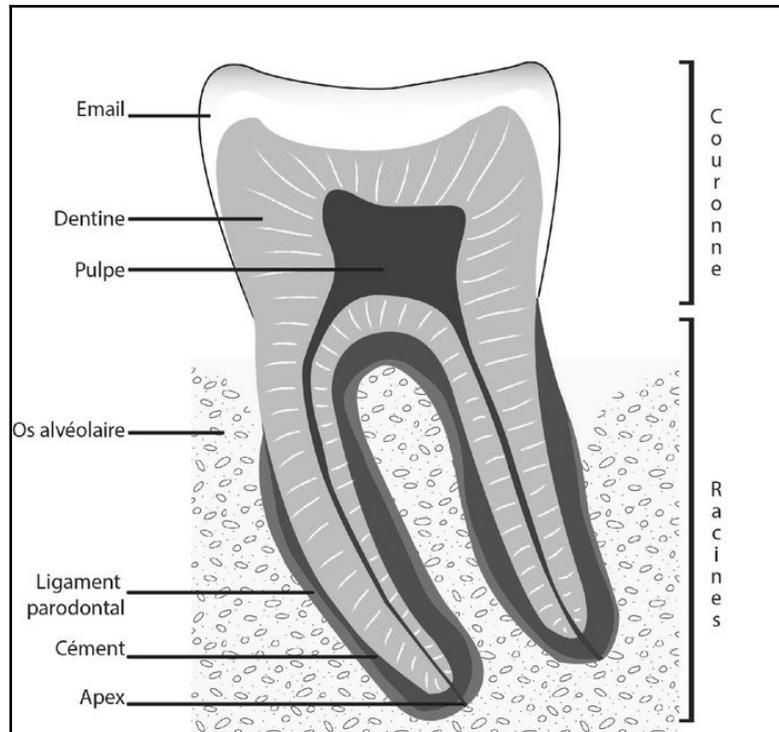


Figure 1: Coupe longitudinale d'une molaire (72)

Une dent est divisée en deux parties : la couronne et la racine.

La couronne est composée d'émail qui recouvre la dentine, qui elle-même recouvre la pulpe camérale. La racine est composée de cément, de dentine et de pulpe canalaire respectivement, de l'extérieur vers l'intérieur.

Elle est implantée dans de l'os qui va constituer les deux maxillaires (5).

2-1-2 : Émail dentaire

L'émail est un tissu acellulaire, avasculaire, non innervé et d'origine épithéliale, qui recouvre la couronne anatomique de la dent. C'est le tissu le plus minéralisé dans le corps humain, car il est constitué à 96% de matière inorganique sous forme de cristaux d'apatite. Les améloblastes, qui sont les cellules responsables de sa formation, disparaissent quand la dent fait son éruption en bouche. Ce tissu ne peut donc pas se régénérer ni être remplacé après altération (5,6).

Tableau 1: Constitution d'un émail humain mature (5)

	En poids	En volume
Phase minérale	96 %	87-91 %
Phase organique	0,4 %	2 %
Phase aqueuse	3,6 %	7-11 %

2-1-3 : Dentine

La dentine, recouverte par l'émail qui est très dur, est un tissu plus résilient que celui-ci. Elle permet donc de le protéger de la fracture sous les forces de mastication. C'est un tissu dur, élastique, avasculaire qui entoure la chambre pulpaire. Elle est traversée par les tubuli dentinaires, qui contiennent les prolongements cytoplasmiques des odontoblastes, les cellules responsables de la formation de la dentine. Elle est donc perméable, et la présence des odontoblastes fait d'elle un tissu sensitif capable de réparation.

La dentine est minéralisée à 70%, et son composant organique principal est le collagène fibrillaire (5,6).

2-1-4 : La pulpe

La pulpe dentaire est un tissu mou, contenant le corps des odontoblastes. Elle a de nombreuses fonctions, comme la nutrition de la dentine, la protection du nerf dentaire, et la formation de nouvelle dentine si nécessaire (5,6).

2-1-5 : La dentition

La dentition de l'espèce humaine est constituée de deux dentures qui se succèdent : les dents temporaires, et les dents définitives.

I	II	III	IV	V	STADE	1	2	3	4	5	6	7	8
1 a 1/2	1 a 1/2	3a	2a	3 a 1/2	APEX CALCIFIÉS	10 a	11a	13 a	14 a	13 a	9 a	15 a	18 - 25 a
7 m	8 m	18 m	12 m	24 m	ERUPTION	7 a	8 a	10 a	9 a	11 a	6 a	12 a	17 - 25 a
+/- 2 m		+/- 3 m		+/- 6 m		+/- 9 m						+/- 6 m	-
4 m	5 m	9 m	6 m	10 m	COURONNE ACHEVÉE	4 a	4 a	5 a	6 a	7 a	3 a	8 a	13 a
3 m iu	4 m iu	6 m iu	5 m iu	8 m iu	DÉBUT DE CALCIFICATION	4 m	10 m	5 m	1 a	2 a	Naissance	3 a	8 a
7 s iu	7 s iu	9 s iu	8 s iu	10 s iu	FORMATION DE GERME	3 m iu	3 m iu	6 m iu	Naissance	7 m	4 m iu	8 m	4 a
I	II	III	IV	V	MAXILLAIRE MANDIBULE	1	2	3	4	5	6	7	8
1 a 1/2	1 a 1/2	3a	2a	3 a 1/2	APEX CALCIFIÉS	9 a	10 a	13 a	12 a	14 a	9 a	15 a	18 - 25 a
6 m	7 m	18 m	12 m	24 m	ERUPTION	7 a	8 a	10 a	9 a	11 a	6 a	12 a	17 - 25 a
+/- 2 m		+/- 3 m		+/- 6 m		+/- 9 m						+/- 6 m	-
4 m	5 m	9 m	6 m	10 m	COURONNE ACHEVÉE	4 a	4 a	6 a	5 a	7 a	3 a	8 a	12 - 16 a
3 m iu	4 m iu	6 m iu	5 m iu	7 m iu	DÉBUT DE CALCIFICATION	3 m	10 m	4 m	2 a	3 a	naissance	3 a	8 - 10 a
7 s iu	7 s iu	9 s iu	8 s iu	10 s iu	FORMATION DE GERME	5 m iu	3 m iu	6 m iu	naissance	7 m	4 m iu	8 m	4 a

Tableau 2: Croissance d'Orlovetsky, d'après les travaux de Logan, Schour, et H. Hebert (1) (a = année, m = mois, s = semaine, iu = in utero).

D'après Orlovetsky (1) la minéralisation de l'émail commence pour les dents temporaires vers 3 mois *in utero*, pour se terminer vers 10 mois, et pour les dents définitives dès la naissance pour les premières molaires et se termine vers 16 ans pour les dents de sagesse mandibulaires.

Les isotopes présents dans l'environnement s'incorpore dans l'organe dentaire, et notamment dans l'émail dentaire lors de sa minéralisation.

Les différentes périodes de minéralisation des dents vont donc permettre, en fonction de la dent choisie, de cibler une période de la vie de l'individu analysé et d'en effectuer l'analyse isotopique.

Les dents pourront dans ce type d'analyse donner des informations sur le début de la vie d'une personne (2).

2-2 : Atomes

Un atome est constitué d'un noyau, composé de protons et de neutrons, et d'un nuage électronique composé d'électrons (7).

Cet atome est caractérisé par son nombre de proton (Z) et son nombre de masse (A), qui est égal à la somme du nombre de protons (Z) et du nombre de neutrons (N).

On l'écrit tel que A_ZX .

Figure 2: Tableau périodique des éléments modifié (71). Le tableau présente les éléments chimiques classés par numéros atomiques (1 à 118) et par groupes (IA à VIIIA). Les lanthanides et actinides sont inclus en bas du tableau principal.

																	17	18	
																	VIIA	VIIIA	
	1																	01	02
1	H																	H	He
	1.0079																	1.0079	4.0026
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII	VIII	IX	X	XI	XII	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
	6.941	9.012											10.81	12.011	14.007	15.999	18.998	20.179	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
	22.990	24.305											26.982	28.086	30.974	32.06	35.453	39.948	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
	39.098	40.08	44.956	47.90	50.941	51.996	54.938	55.847	58.933	58.70	63.546	65.38	69.72	72.59	74.922	78.96	79.904	83.80	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
	85.468	87.62	88.906	91.22	92.906	95.94	97.91	101.07	102.905	106.4	107.868	112.41	114.82	118.69	121.75	127.60	126.904	131.30	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
	132.905	137.33	138.905	178.49	180.948	183.85	186.21	190.2	192.22	195.05	196.966	200.59	204.37	207.2	208.98	[209]	[210]	[222]	
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
	[223.02]	[226.03]	[227.03]	[261.10]	[262.10]	[263.10]	[263.10]	[277.10]	[277.10]	[277.10]	[277.10]	[281.10]	[281.10]	[281.10]	[281.10]	[281.10]	[281.10]	[281.10]	
	Lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			138.905	140.12	140.907	144.24	[145]	150.4	151.96	157.25	158.925	162.50	164.930	167.26	168.934	173.04	174.967		
	Actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		
			[227.03]	232.038	231.035	238.029	[237.05]	[244.06]	[243.06]	[247.07]	[247.07]	[251.08]	[252.08]	[257.10]	[258.10]	[259.10]	[262.11]		

Figure 2: Tableau périodique des éléments modifié (71)

2-2-1 : Notions d'isotopes

Le terme « isotope » a été employé pour la première fois en 1913, par un radiochimiste anglais nommé Frederick Soddy. Il signifie « *same place* » en anglais, en référence au fait que les isotopes d'un même élément possèdent le même nombre de protons et ont la même position dans le tableau périodique des éléments (2).

Les isotopes d'un même élément diffèrent par leur nombre de neutrons : ils possèdent donc un nombre de masse différent.

Environ 300 isotopes stables sont reconnus (8).

Dans ce tableau, seuls 12 éléments sont monoisotopiques, donc ne possèdent qu'un seul isotope.

Les isotopes d'un élément sont retrouvés dans la nature dans des proportions différentes (9) :

Tableau 3: Abondance relative des isotopes des éléments les plus fréquemment analysés par IRMS d'après Benson et al, 2006 (9)

Elément	Isotope	Abondance relative (%)
Hydrogène (H)	¹ H	99,984
	² H	0,0156
Carbone (C)	¹² C	98,892
	¹³ C	1,108
Azote (N)	¹⁴ N	99,635
	¹⁵ N	0,365
Oxygène (O)	¹⁶ O	99,759
	¹⁷ O	0,037
	¹⁸ O	0,204
Soufre (S)	³² S	95,02
	³³ S	0,76
	³⁴ S	4,22
	³⁶ S	0,014

Chaque élément possède souvent un isotope léger dominant (par exemple le ¹²C, ¹⁶O), qui sont les plus abondants dans la nature, et des isotopes lourds, plus rares (¹³C, ¹⁷O) (9).

2-2-2 : Notion de radioactivité

On distingue aussi les isotopes stables des isotopes radioactifs, qui se désintègrent avec le temps pour donner d'autres isotopes.

Par exemple, le carbone 14 est un isotope radioactif du carbone, dont l'utilisation permet de dater des objets relativement récents grâce à son temps de demi-vie, appelé aussi période. Elle correspond au temps nécessaire à la désintégration de la moitié de la population des atomes radioactifs présents dans un objet d'étude.

Celle du ¹⁴C est de 5 760 ans (7).

2-2-3 - Notations

2-2-3-1 :Éléments non métalliques

La composition isotopiques des éléments non métalliques tels que H, C, N, O et S est exprimée généralement par le ratio R d'un isotope stable rare sur un isotope stable commun (par exemple $R = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}$, ou $R = \frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}}$) (2).

Puisque R est généralement un nombre très petit, et que les différences mesurées dans les ratios isotopiques à l'abondance naturelle sont aussi très faibles, on utilise la notation δ , qui est utilisée pour exprimer la variation de l'échantillon R par rapport à une norme standard de référence, en part par milles.

$$\delta = 1000 \times ((R_{\text{échantillon}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}),$$

où $R_{\text{échantillon}}$ est le rapport de l'isotope lourd sur l'isotope léger mesuré dans l'échantillon, et R_{standard} est le ratio équivalent pour la norme du laboratoire.
En général, les valeurs δ sont citées par rapport à une norme internationale reconnue.

2-2-3-2 : Éléments métalliques

Les isotopes stables d'intérêt pour les éléments métalliques du strontium (Sr) et du plomb (Pb) incluent des isotopes stables, et des isotopes radiogéniques stables (qui sont les isotopes qui sont le produit (stable) de désintégrations radioactives).

Par exemple, l'isotope stable radiogénique ^{87}Sr est le produit de désintégration de ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th , respectivement (2).

Lorsqu'elles sont mesurées avec les isotopes stables primordiaux (c'est-à-dire ^{86}Sr et ^{204}Pb), les compositions isotopiques des éléments métalliques sont généralement rapportées sous forme de $R_{\text{échantillon}}$, sans conversion en notation δ (par exemple $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) (2).

Bien que les normes de référence ne soient pas nécessaires pour rapporter les rapports isotopiques Sr et Pb en notation δ , il existe des matériaux de référence standard disponibles pour l'étalonnage et la vérification des rapports isotopiques Sr et Pb mesurés (2).

Il peut y avoir des différences de calculs des normes en fonction des laboratoires, car les instruments d'échantillonnages sont différents. Il y a actuellement des recherches pour créer des lignes directrices pour la sélection d'étalons de travail et un examen d'une stratégie visant à avoir des procédures de référencement communes entre les laboratoires pour les mesures isotopiques (10).

2-2-3-3 : Fractionnement isotopique

Les isotopes d'un même élément, du fait de leur même nombre d'électrons, ont un comportement similaire lors d'une réaction chimique.

Cependant, du fait de la différence de masse entre les isotopes lourds et légers, il existe une différence de vitesse lors des processus de réactions chimiques ou physiques (par exemple la condensation, l'évaporation..), ce qui permet de les différencier.

En effet, pour deux isotopes du même élément, la différence de masse induit une différence de force des liaisons présentes avec les autres éléments : l'isotope le plus lourd en aura une plus importante que celle de l'isotope léger, donc sera plus difficile à rompre (2,8).

On appelle cela le fractionnement isotopique.

Citons par exemple la molécule d'eau : H_2O . On appelle isotopologues les molécules qui sont faites avec les mêmes atomes, mais avec différents isotopes de ces atomes : H_2^{12}O , D_2^{16}O , H_2^{18}O etc.

Du fait de la masse différente et des différents isotopes qui composent la molécule, chaque molécule aura un comportement différent pendant, par exemple, l'évaporation : les molécules les plus lourdes auront tendance à moins s'évaporer que les plus légères, on les retrouvera donc plus souvent sous leur phase liquide (2,11).

2-3 : Notion d'anthropologie

L'anthropologie vient des termes grecs « anthropos » (homme), et « logos » (connaissance, discours), et signifie « discours sur l'Homme ». C'est une science qui se consacre à l'étude de l'être humain.

L'anthropologie peut être définie comme « une science intégratrice qui étudie l'Homme dans le cadre de la société et de la culture auxquelles il appartient, tout en associant des approches des sciences naturelles, sociales et humaines » (12).

L'anthropologie peut se diviser en 4 sous-disciplines principales (13) :

- l'anthropologie sociale et culturelle
- l'archéologie
- l'anthropologie biologique
- l'anthropologie linguistique.

Quatrehomme, dans son livre « Traité d'anthropologie médico-légale », est allé plus loin dans la description des branches de l'anthropologie culturelle et biologique (14):

Tableau 4: « Quelques exemples de branches de l'anthropologie », d'après le tableau de Quatrehomme (2014) modifié (14)

Disciplines		Contenu
Anthropologie dite culturelle		
Anthropologie sociale		Etude de la vie en société ; hiérarchies sociales, ; coutumes ; rites ; langues
Anthropologie historique		Formes sociales en relation avec l'histoire de la population étudiée
Anthropologie religieuse		Rites, mythes ; expressions sociales des religions
Anthropologie politique		Formes d'autorité, de pouvoir ; formations politiques
Anthropologie économique		Méthodes de production ; répartition des biens
Anthropologie écologique		Relation des êtres vivants entre eux et avec leur milieu
Anthropologie démographique		Etude quantitative des populations humaines, leur évolution et leurs mouvements
Anthropologie dite biologique		
Anthropologie physique		
Paléo-anthropologie	Anthropologie physique historique	Anthropologie médico-légale
		Étude des squelettes, os, fragments osseux, par l'observation, les mesures et divers examens complémentaires
	Anthropologie moléculaire (ADN)	Identification médico-légale ; étude de certains phénotypes ; parenté entre populations, migration des populations, mutations (horloges moléculaires).

L'anthropologie biologique, ou anthropobiologie, est née au 19^{ème} siècle, et se situe à l'interface de la biologie et des sciences humaines.

Ici, nous allons plus particulièrement nous intéresser à l'anthropologie physique et à l'anthropologie médico-légale, c'est-à-dire à l'étude des humains grâce aux fossiles, aux restes osseux et à leur environnement.

3 : Méthodes de mesures

Nous allons aborder maintenant un aspect plus pratique du sujet : les méthodes d'échantillonnage et de mesure des échantillons choisis pour l'analyse isotopique. Les techniques abordées ici ne sont pas les seules utilisées, mais le choix a été fait d'aborder l'échantillonnage du carbone et de l'oxygène, car mieux documenté, ainsi que la spectrométrie de masse à rapport isotopique comme outil d'analyse des échantillons des bio-éléments.

3-1 : Echantillonnage

Comme dit précédemment, l'analyse du carbone et de l'oxygène permettent de recueillir des informations à propos des apports alimentaires, du sevrage, et de la mobilité de l'individu concerné par l'échantillonnage.

Ici, nous allons faire un bref résumé des étapes de l'échantillonnage et du pré-traitement du C et de l'O.

Le protocole se décompose en plusieurs étapes (15) :

1. L'échantillonnage en vrac (parallèle à l'axe de croissance de la dent)
2. L'échantillonnage séquentiel (perpendiculaire à l'axe de la dent)
3. L'utilisation de la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) pour analyser l'échantillon : c'est une méthode de réflectance totale atténuée, peu coûteuse, rapide et relativement accessible pour étudier l'altération taphonomique ou diagenèse des tissus étudiés
4. Le pré-traitement à l'acide acétique simple
5. et la pesée et mesure des échantillons et des étalons.

3-2 : Spectromètre de masse

Abordons maintenant la méthode la plus utilisée pour effectuer des analyses isotopiques : la spectrométrie de masse.

La spectrométrie de masse est l'une des plus vieilles méthodes d'analyse instrumentale. Elle permet de séparer les molécules chargées en fonction de leur masse (2). Or nous avons vu que les isotopes d'un même élément ne possédaient pas le même nombre de protons, et qu'ils avaient par conséquent un nombre de masse différent : la méthode est donc adaptée pour les analyser.

Le Spectromètre de Masse à Rapport Isotopique (IRMS) fonctionne sur le même principe que le spectromètre de masse classique, mais est spécialement conçu pour mesurer précisément les petites différences dans l'abondance des rapports isotopiques comme $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (2,16) en mesurant la composition isotopique de deux gaz (un échantillon et un gaz de référence) l'un par rapport à l'autre (11).

Il permet de ioniser les molécules gazeuses et de séparer les ions dans le spectre grâce à leur rapport masse/charge en utilisant des champs électriques et magnétiques (17).

Ses applications sont nombreuses, que ce soit dans le domaine médico-légal, dans l'archéologie et la géoscience, les sciences biologiques (16)..

Un spectromètre de masse possède trois parties de base (11) :

- une source d'ions, où l'échantillon est ionisé, accéléré à une énergie donnée et collimaté en un faisceau bien focalisé
- un analyseur, qui agit pour dévier l'ion en fonction de la masse (= prisme du système)
- et un ensemble de collecteur pour mesurer les intensités relatives des différents faisceaux d'ions.

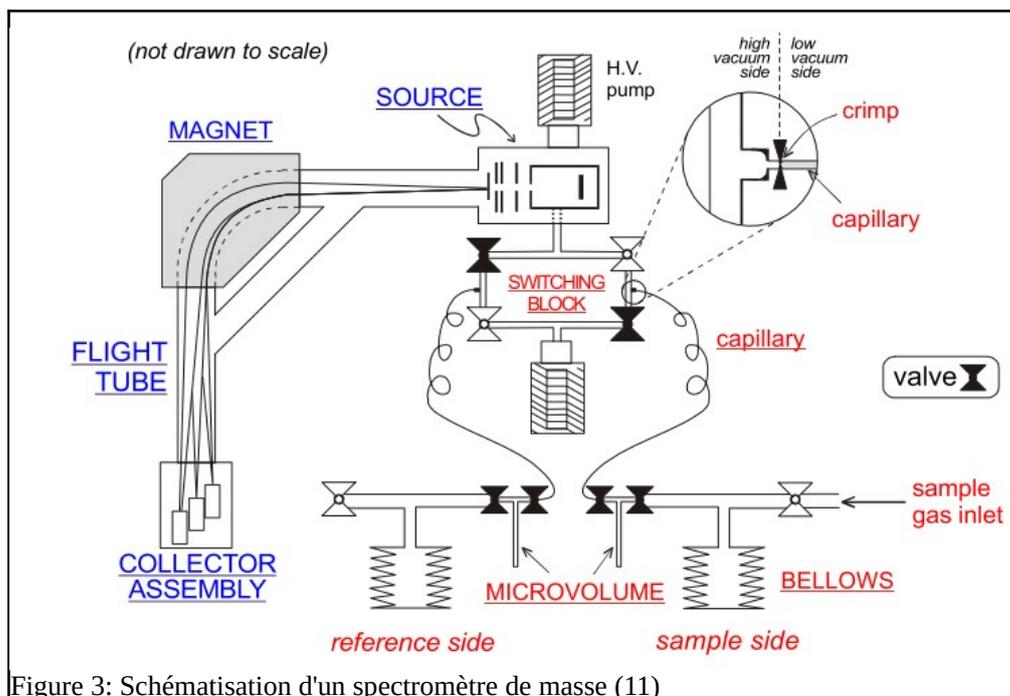


Figure 3: Schématisation d'un spectromètre de masse (11)

L'utilisation d'un IRMS nécessite l'incorporation des échantillons sous forme de gaz purs, tels que CO_2 , ou N_2 . Ces échantillons passent donc par une phase de transformation avant d'être inséré dans le spectromètre.

Il existe deux configurations pour l'utilisation d'un IRMS (16) :

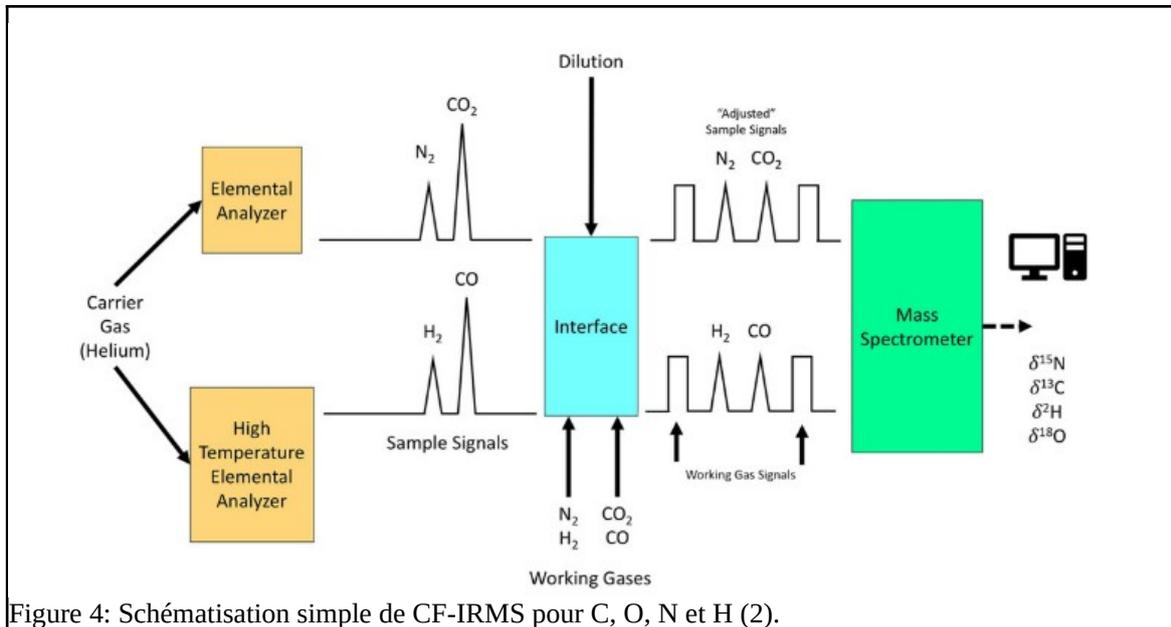
- Le continuous-flow IRMS (CF-IRMS) : le spectromètre de masse à rapport isotopique en flux continu,
- Le dual-inlet IRMS (DI-IRMS) : le spectromètre de masse à rapport isotopique à double entrée, non détaillé spécifiquement ici.

3-2-1 : DI-IRMS

En utilisant un système à double entrée, l'échantillon est d'abord transformé en gaz pur « hors ligne », avant d'être introduit dans l'IRMS. Il est ensuite admis par un soufflet (volume variable) en alternance avec un gaz de référence, de composition connue (18) (2).

3-2-2 : CF-IRMS

La particularité de l'IRMS à flux continu est que l'échantillon est directement transformé en gaz pur juste avant son introduction dans le spectromètre de masse, grâce à divers périphériques et un gaz vecteur (He) (2).



On se sert pour cette configuration d'analyseurs élémentaires, qui permet la combustion ou la conversion thermique d'un échantillon. Il existe deux types d'analyseurs élémentaires, selon que l'on veuille étudier le carbone et l'azote, ou l'oxygène et l'hydrogène (16).

L'analyse par Cf-IRMS peut être divisée en 4 étapes (16) :

- 1) Combustion ou conversion thermique de l'échantillon à l'aide de l'analyseur élémentaire
- 2) Introduction des gaz dégagés dans la source d'ions du spectromètre de masse via l'interface
- 3) Ionisation des molécules de gaz suivie d'une séparation et détection des ions dans le spectromètre de masse
- 4) Evaluation des données brutes.

3-2-3 : Choix des échantillons

Les analyses isotopiques peuvent s'effectuer sur plusieurs types de tissus.

On étudie le plus couramment les cheveux, les ongles, les os, et les dents.

- les cheveux et les ongles : ils sont composés de kératine et de collagène, et reflètent des informations récentes (quelques jours ou semaines) d'un individu du fait de leur renouvellement régulier (2,19,20).
- les os : ils sont constitués de collagène et de bioapatite, et leur renouvellement entier est plus lent que le cheveu : il peut prendre de 5-10 ans pour une côte ou 20-25 pour un fémur (2). Cela nous donne donc accès à des informations sur les dernières années de vie de l'individu étudié.
- les dents : comme dit précédemment (paragraphe 2-1-5), la fin de la minéralisation de l'émail d'une dent marque la fin de l'incorporation d'isotopes dans celui-ci. On peut donc dire que comme l'émail ne se renouvelle pas, étudier la composition d'une dent revient à étudier les premières années de vie d'un individu (2,20).

Contrairement à l'émail, la dentine est en contact avec un apport sanguin. Elle peut se renouveler, mais d'une manière très lente, de fait que même après des décennies elle conservera des signaux de la petite enfance (21).

3-2-4 : Biais possibles dans l'analyse isotopique

L'analyse isotopique est utile, mais il est utile de savoir que des biais sont possibles durant son utilisation.

Dans un premier lieu, il faut tenir compte de la diagenèse des échantillons étudiés. La diagenèse peut être définie comme l'altération chimique des restes biologiques, due à l'interaction avec l'environnement, y compris le sol et les eaux souterraines. Les tissus durs comme les dents (et les os dans une moindre mesure), sont peu soumis à cette diagenèse, mais elle doit être prise en compte, et calculée via des tests de dépistages diagénétiques (2) (15).

Ensuite, il faut prendre en compte les biais pouvant intervenir durant l'échantillonnage des tissus concernés : concernant le pré-traitement de l'émail (22), et particulièrement du fraisage dentaire (que ce soit pour des études inter-dentaires ou intra-dentaires) (15) (22).

Il faut aussi pouvoir interpréter les résultats des analyses avec prudence. Ils nous donnent des informations fiables dans leur ensemble, mais leur exactitude doit parfois être vérifiée et comparée aux données présentes dans l'environnement pour voir si elles ne sont pas aberrantes (23).

Enfin, le monde dans lequel nous vivons tend vers la mondialisation, et donc l'homogénéisation de la nourriture et de l'eau mondiale (eaux en bouteilles), en particulier avec les fast-food, et les supermarchés. Les données obtenues seront dans ces cas de mondialisation moins pertinentes pour l'évaluation des pays d'origine, c'est pourquoi les analyses utilisant plusieurs isotopes sont intéressantes, car elles permettent d'avoir plusieurs entrées et donc d'avoir plus de pertinence dans les résultats (24) (25).

4 : Les isotopes utilisés en anthropologie

Les isotopes stables les plus fréquemment utilisés dans les analyses isotopiques sont le carbone, l'azote, l'oxygène, l'hydrogène et le strontium. D'autres sont bien évidemment utilisés mais il est volontairement choisi ici de n'aborder que les plus fréquents.

4-1 : Le carbone

Il existe deux isotopes stables du carbone, le plus abondant étant le ^{12}C , et le plus rare étant le ^{13}C (9).

Le carbone est présent tout autour de nous : il est contenu dans l'air, l'eau et la terre. (20) Il est absorbé par les plantes, qui sont ensuite ingérées par les animaux, puis par les Hommes (ou directement par les Hommes). Ce sont les plantes consommées qui vont déterminer la composition isotopique des niveaux trophiques suivants (26,27).

4-1-1 : La photosynthèse

Les plantes traitent de manière différente le carbone qui les entoure lors de la photosynthèse, selon leurs caractéristiques et leur environnement. Nous aborderons ici majoritairement le cas des plantes terrestres.

La photosynthèse correspond à un processus qui transforme la lumière en énergie, et qui est utilisée par les plantes et par certaines bactéries. Le cycle de Calvin-Benson correspond aux successions de réactions chimiques se déroulant lors de la photosynthèse, et plus exactement aux réactions chimiques qui transforment le carbone inorganique en molécules organiques simples (28).

Le CO_2 atmosphérique est la source majeure de carbone pour les plantes terrestres, et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont déterminées à partir de la composition isotopique du CO_2 atmosphérique et le type de photosynthèse utilisé de la plante (29, 8).

Il existe trois types de photosynthèses pour les plantes terrestres :

- la photosynthèse en C3 (ou cycle de Calvin-Benson), qui concerne la majorité des végétaux terrestres (avoine, blé, riz, herbe et arbustes), soit environ 85 % des plantes (30). Pour ces plantes, les valeurs isotopiques en $\delta^{13}\text{C}$ retrouvées sont comprises entre -34 et -22 ‰ (26). On appelle ce type de photosynthèse la photosynthèse en C3, car la première étape pour les plantes C3 est de convertir le dioxyde de carbone de l'air en phosphoglycérate avec 3 atomes de carbones (29).
- la photosynthèse en C4 (ou cycle de Hatch Slack), qui concerne les végétaux dits tropicaux (maïs, millet, canne à sucre, sorgho). Elle concerne environ 5 % des plantes, qui occupent 17 % de la surface terrestre (30). Les valeurs isotopiques en $\delta^{13}\text{C}$ pour les plantes C4 sont comprises entre -19 et -6 ‰ (26). La première étape pour ces plantes est de convertir le CO_2 de l'air en phosphoglycérate à 4 atomes de carbone (29).

Les plantes C4 utilisent moins de temps et moins d'eau pour convertir un certain volume de CO₂ lorsqu'il fait jour, en relarguant de l'oxygène et de la vapeur d'eau (29).

- la photosynthèse CAM, qui concerne les plantes succulentes, soit environ 10 % des végétaux. Les plantes CAM adopteront une photosynthèse en C3 ou en C4 selon leurs conditions environnementales, mais le plus souvent celle en C4 (29,30).

Quant aux plantes aquatiques, elles utilisent plusieurs sources de CO₂, comme le CO₂ dissous, et les détritiques terrestres présents dans l'eau (8). Il y aura une différence dans les valeurs isotopiques de $\delta^{13}\text{C}$ entre les plantes aquatiques et terrestres, car la source en carbone utilisée en milieu aquatique présente une valeur isotopique de 0,0 ‰ alors que celle du carbone atmosphérique est de -7,0 ‰ (26).

4-1-2 : Le carbone et l'alimentation

Le carbone est un élément dépendant de l'alimentation (20) (27).

En observant le $\delta^{13}\text{C}$ d'un échantillon, il est possible d'étudier l'apport alimentaire en carbone que l'individu a eu durant une période de sa vie (27).

En effet, les différences dans les compositions isotopiques en carbone se transmettent le long des chaînes alimentaires, avec un enrichissement de 1‰ à chaque niveau trophique et un enrichissement de 5 ‰ entre la part protéique de l'alimentation et celle du collagène de celui qui le consomme (26).

DeNiro et Epstein, en 1976 ont affirmé : « You are what you eat » (31). Ce qui signifie que l'on peut déduire de la composition isotopique de l'alimentation d'un animal la composition isotopique de tout son corps à un moment T, grâce au $\delta^{13}\text{C}$ de l'échantillon étudié (27).

Il est possible de faire des analyses diététiques basées sur la détermination du ratio $\delta^{13}\text{C}$ du carbone animal terrestre, ou aquatique (marin ou eau douce) : en effet, celui-ci est déterminé par les plantes présentes dans leurs environnements respectifs (27).

4-2 : L'azote

4-2-1 : Assimilation de l'azote atmosphérique

L'azote existe sous deux formes stables : le plus abondant étant le ¹⁴N et le plus rare étant le ¹⁵N. Cet élément est présent à plus de 99 % sous forme de gaz N₂ dans l'atmosphère (8).

L'azote atmosphérique est assimilé selon deux processus majeurs (8) (26) :

- par les organismes fixateurs d'azote, qui utilisent directement l'azote disponible dans l'atmosphère : les algues bleues/vertes dans les milieux aqueux, et les plantes terrestres grâce aux nodules bactériens présents sur leurs racines. Les plantes terrestres qui utilisent ce procédé ont une valeur isotopique en azote comprise proche de 0 ‰.
- par les organismes non fixateurs d'azote, ce qui implique la décomposition, par des bactéries présentes dans le sol, de molécules complexes contenant de l'azote dans

la matière organique, après la mort des organismes. Les nitrates produits peuvent être utilisés directement par les plantes. Les valeurs isotopiques pour ces plantes seront comprises entre 0 et 6 ‰.

4-2-2 : Azote et alimentation

La teneur en azote reflète la part de protéine de l'alimentation (26,32).

Sa composition isotopique dans un échantillon diffère selon que l'individu étudié ait eu une alimentation marine, terrestre, végétarienne ou non. En effet, des études montrent que la teneur en azote est généralement plus élevée dans les milieux marins que dans les milieux terrestres ; et il a aussi été démontré que la teneur en azote d'un animal est toujours plus élevée que celle de son alimentation (33)(34).



Figure 5: Gamme de variation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ pour différents niveaux trophiques de chaînes alimentaires terrestres et aquatiques (26).

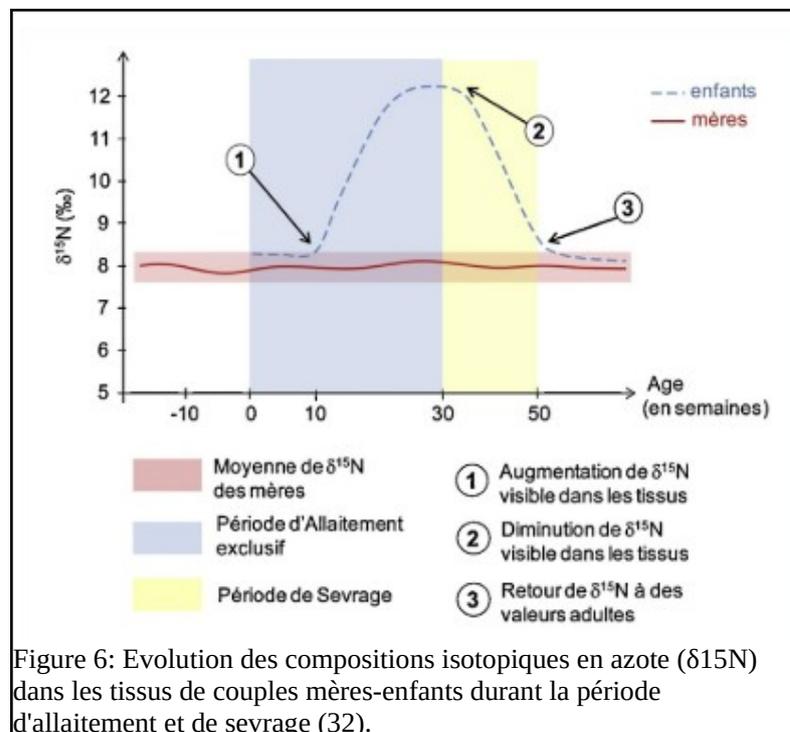
De part ce fait, les individus se nourrissant de plantes terrestres auront un $\delta^{15}\text{N}$ moins important que ceux se nourrissant de plantes aquatiques (26). De la même manière, on pourra déduire le « niveau trophique » d'un organisme, c'est à dire sa place dans la chaîne alimentaire (carnivore, omnivore ou herbivore), car leur organisme sera enrichie en azote par rapport à leur part alimentaire (environ 3 ‰) (26) (20).

4-2-3 : Azote et sevrage

La mesure de la composition isotopique en ^{15}N peut renseigner sur le moment et la durée du sevrage d'un enfant (35), le sevrage étant défini comme le moment où un enfant passe d'une alimentation lactée strictement maternelle à une alimentation semblable à celle des adultes (26,36).

Celle-ci reflète la teneur protéique d'un échantillon, et le niveau trophique d'un individu. (voir Azote et alimentation). En effet, la relation mère-enfant lors de l'allaitement peut s'apparenter à une relation « prédateur-proie » (32).

Plusieurs méthodes sont utilisables : pour définir la période de sevrage dans une population choisie, il est nécessaire d'étudier un échantillon par individu, en comparant les



tissus des squelettes des enfants à ceux des mères de cette population. Il en résultera une moyenne, et comme le montre le schéma de Herrscher en 2013 (32), une courbe en cloche où l'on identifiera une augmentation de $\delta^{15}\text{N}$ dans les tissus, qui correspondra à l'ingestion du lait maternel par l'enfant, et à une décroissance de ce taux de $\delta^{15}\text{N}$, qui correspondra à l'introduction d'alimentation non maternelle dans celle de l'enfant. La fin du sevrage sera caractérisée par un taux de $\delta^{15}\text{N}$ semblable à celui d'un adulte (32).

Une autre méthode est d'utiliser différents tissus d'un même individu, contemporains à la période de sevrage de celui-ci. Les os reflétant les dernières années de vie d'un individu, ce seront les dents qui seront utilisées, ce qui permettra d'étudier des tissus

adultes. En effet, la formation des dents suit un calendrier particulier, quasiment universel, et les tissus de celle-ci (émail et dentine), ne sont pas renouvelés dans le temps. Il est donc possible de cibler une période de la vie d'une personne en étudiant et en comparant les taux isotopiques de certaines dents. Ces analyses permettent d'établir des profils intra-individuels concernant le sevrage (32).

4-4 : Oxygène et l'hydrogène

L'oxygène et l'hydrogène présents dans un organisme peuvent être tous les deux rapportés aux valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^2\text{H}$ de l'eau consommée par celui-ci, que ce soit par l'eau bue ou ingérée indirectement par l'alimentation (2).

Ces valeurs changent en fonction de notre environnement géographique : on peut donc prédire grâce à l'analyse des isotopes d'oxygène et d'hydrogène d'un échantillon sa provenance, en se basant sur la période de vie de l'individu concernée par l'étude (37).

Les zones que l'on peut cibler sont larges, mais peuvent permettre d'éliminer d'autres hypothèses de provenance lors de recherches de l'origine d'un individu (2).

4-5 : Le strontium

Le strontium est un élément métallique, qui possède quatre isotopes stables : ^{88}Sr (82.53%), ^{87}Sr (7.04%), ^{86}Sr (9.87%), et ^{84}Sr (0.56%). Parmi ces quatre isotopes, seul le ^{87}Sr est radiogénique : en effet, il est le produit de la désintégration β du ^{87}Rb . Celui-ci possède donc deux formes : une primordiale, et une radiogénique provenant de la désintégration du ^{87}Rb (38).

Le ratio le plus utilisé dans les recherches isotopiques est le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, malgré que le ^{88}Sr soit la forme la plus répandue du strontium (38).

Le strontium est principalement retrouvé dans les roches. Les intempéries libèrent du Sr du substrat rocheux dans l'environnement local, où il se retrouve dans le sol et l'eau, et où il est ensuite absorbé par les plantes puis intégré par les animaux (2,39).

Les variations isotopiques de Sr dans l'environnement sont liées aux dépôts rocheux, à leurs âges et à leurs susceptibilités à l'altération. En effet en présence de gisements osseux avec des concentrations initiales élevées en ^{87}Rb et/ou en présence de gisements vieux, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevés que si l'on se trouvait en présence de roches jeunes (2).

Chez l'Homme, le Sr peut se substituer au Ca : il s'incorpore donc dans les dents et les os (2).

En comparant la composition isotopique en ^{87}Sr des dents et os d'un individu, à celle de son environnement (roche et eau locale), il est possible de savoir si l'origine géographique de cet individu est locale ou non (40).

4-6 : Isoscapes et bases de données

Pour pouvoir utiliser au mieux les analyses isotopiques de restes humains, et grâce aux informations présentes dans l'environnement, des isoscapes ont vu le jour : il s'agit de cartes représentant la distribution d'un certain isotope dans une zone donnée (41).

En effet, suite à l'extraction et à l'analyse des isotopes stables des échantillons étudiés, il est nécessaire de les comparer à une base de données, ou à des isoscapes, pour pouvoir en tirer les conclusions voulues.

Ces bases de données se font à l'aide d'échantillons de l'environnement ou provenant d'Hommes vivants à la même époque que l'échantillon étudié.

C'est le cas pour le strontium, dans une étude de Beard and Johnson, en 2000. L'objectif principal de ce modèle est d'illustrer les variations isotopiques de Sr qui se produisent sur la Terre en raison de l'âge des roches aux U.S.A. (38).

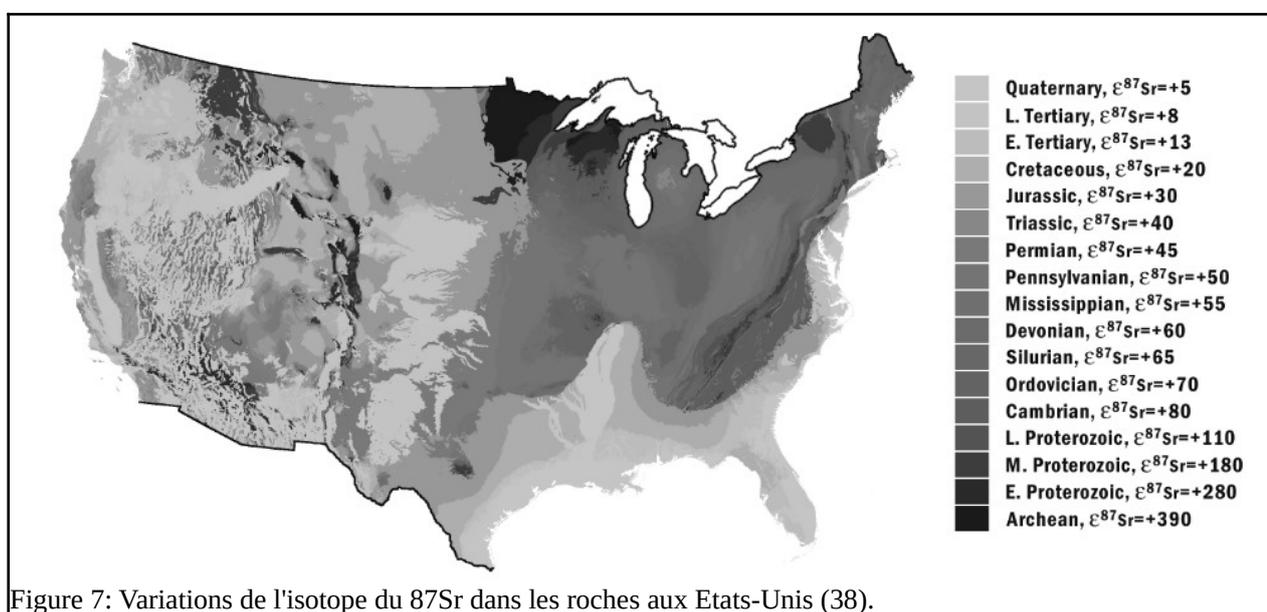


Figure 7: Variations de l'isotope du ^{87}Sr dans les roches aux Etats-Unis (38).

Ces bases de données ont été faites pour le strontium, (42)(43)(44)(45) pour le carbone et l'azote (46), pour l'oxygène et l'hydrogène, principalement en Amérique (47)(48).

En comparant les données obtenues à partir des analyses isotopiques des échantillons étudiés avec ces isoscapes, il est possible de cibler ou d'éliminer des zones géographiques lors d'enquêtes.

5 : Applications

5-1 : Utilisations principales de l'analyse isotopique en anthropologie

L'analyse des isotopes stables est utilisée dans de nombreux domaines, mais tend à s'utiliser de plus en plus en anthropologie. Il existe plusieurs utilisations, selon les isotopes étudiés.

5-1-1 : Alimentation (C, N)

L'étude de l'alimentation des populations anciennes, ou des individus plus récents, peut révéler beaucoup d'informations sur les modes de vie, et sur l'identification d'individus.

Comme dis précédemment, les $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ sont utiles pour déterminer quel type de nourriture l'individu étudié consommait (selon qu'il se nourrisse de plante C3 ou C4 avec le ratio de carbone), et sa place dans la chaîne alimentaire grâce à l'étude de l'azote.

Dans leur étude, Ventresca Miller et coll (2018) (15) ont réussi à mettre en évidence la différence de source alimentaire entre deux moutons grâce à l'analyse du carbone dans les dents de ceux-ci, ce qui a confirmé qu'ils vivaient dans deux environnements différents (l'un avait une nourriture à base de plantes C3, et l'autre à base de plantes C4).

Balasse (2002) (49) a effectué un séquençage intra-dentaire sur des dents de moutons, dont l'alimentation était contrôlée, pour voir si le changement de nourriture, d'une à base de plante C3 à une alimentation à base de plantes C4, se répercutait dans la dent durant sa formation. En effet, le $\delta^{13}\text{C}$ a progressivement augmenté dans les dents se rapportant à la période où l'alimentation en C4 s'est faite dominante.

Dans son travail, E.Herrscher (26) a entrepris de reconstituer les apports alimentaires d'une population médiévale française (Grenoble), à partir de l'analyse des isotopes stables du carbone et de l'azote contenus dans le collagène des os et des dents. Ceci dans le but d'effectuer une analyse de l'alimentation à l'échelle de la population et à l'échelle intra-individuelle. Elle a mis en évidence deux tendances à l'échelle de la population, une végétarienne et une à tendance carnée ou produits laitiers, et à l'échelle intra-individuelle, elle a permis de mettre en évidence la période de sevrage grâce à l'analyse des isotopes de l'azote, et une nourriture variée au long de la vie adulte grâce à la comparaison os/dent.

Drucker et Bocherens (2004) ont cherché à savoir si le passage du Néolithique moyen au Néolithique supérieur entraînait un changement de nourriture pour les Hommes de ces époques. Ils n'ont pas trouvé de différences notables entre l'alimentation des hommes de Néandertal (vivant au Néolithique moyen) et ceux anatomiquement plus « modernes » (vivant au Néolithique supérieur). Le passage d'une ère à l'autre s'étant fait progressivement, et les deux populations se nourrissant des mêmes herbivores, il est tenu pour hypothèse que les deux populations pouvaient être en concurrence pour se nourrir et chasser (50).

Herrscher et Le Bras-Goude (2010) se sont servis des analyses isotopiques du carbone dans plusieurs populations du Néolithique moyen, provenant de sept sites différents, dans le Languedoc et la Garonne, pour évaluer les différences de régimes alimentaires entre chaque sites. Les résultats ont montré des régimes alimentaires différents selon les sites, basés sur les écosystèmes locaux de chacun (51).

5-1-2 : Origine géographique, mobilité (O, H, Sr)

L'étude des variations isotopiques de l'oxygène et hydrogène chez un individu reflètent l'eau environnante, météorique et ingérée par les individus, et celles du strontium reflètent les teneurs isotopiques en celui-ci dans les roches environnantes, et dans les plantes qui en ont absorbé suite à l'usure des roches. Toutes ces données nous donnent des indications sur les zones géographiques côtoyées par l'individu au cours de sa vie, et donc sur sa mobilité (en comparant par exemple les données présentes dans l'émail, donc les informations sur le début de vie et adolescence, et celles dans l'os, ou les cheveux, qui sont les informations plus récentes d'un individu, ou même en comparant deux dents avec des périodes de minéralisation différentes).

Dans leur étude, Chesson et coll (52) ont étudié différents cas d'enquêtes judiciaires modernes non résolues, qui ont pu progresser grâce à l'étude isotopique sur les restes humains retrouvés dans ces affaires. Les isotopes du strontium et de l'oxygène ont été utilisés pour préciser les zones de provenances et les derniers lieux visités par ces personnes, pour réduire la zone de recherche.

En utilisant et en comparant les couples dent/os des individus retrouvés dans un site archéologique, Schweissing et Grupe (2003) (53) ont pu différencier les populations nées localement et celles non locales en Bavière, pour dresser un portrait des événements migratoires à la fin de la période romaine. Le même type d'enquête a été réalisé en Islande médiévale (1493-1554 après J.-C.), et a permis de différencier les gens natifs ou non natifs d'une région (54).

5-1-3 : Sevrage

Le sevrage est une forme spécifique de l'alimentation. La relation proie-prédateur se fait entre la mère et l'enfant, ce qui entraîne un saut trophique entre l'un et l'autre. Ceci peut se voir en étudiant l'azote chez l'enfant (et l'azote dans les dents se minéralisant dans les premières années de vie chez l'adulte) (32).

Etudier la période de sevrage peut se révéler intéressant pour déterminer les modes de vie des populations anciennes. C'est le cas dans l'étude de Dupras, Schwarcz et Fairgrieve (2001), qui ont mis en évidence les pratiques de sevrage d'une population pendant la période romaine en Egypte (35) et celui de Herrscher (2004) (36) qui a permis de lever le voile sur le sevrage de la population grenobloise lors de l'Ancien Régime.

5-1-4 : Classe sociale

La classe sociale d'une population peut se déduire de différentes manières.

Chez les Incas, par exemple, les populations étaient déplacées par groupes ou maisonnées, pour plusieurs raisons en fonction de leur classe sociale. C'est pourquoi Turner et coll (2009) (55) ont reconstruit des schémas d'immigration grâce à l'étude du Sr, de l'O et du Pb sur des squelettes retrouvés au Machu Picchu, pour déterminer les classes sociales dans les populations Inca, grâce aux dynamiques de mobilité de ces populations.

Une autre façon de déterminer un rang social est de regarder le type de nourriture consommée par un individu, la nourriture la plus rare étant considérée comme la plus précieuse. En effet, Knipper et coll (2015) (56) ont réussi grâce à l'analyse isotopique du collagène osseux à mettre en évidence une consommation différente des élites préhistoriques et médiévales d'Europe centrale par rapport aux non-élites, en se basant sur l'hypothèse que les membres de la société qui étaient favorisés consommaient une nourriture différente et plus rare que ceux non favorisés.

Knipper et coll (2015) ont étudié les restes de quatre individus des époques préhistorique et médiévale, connus pour être très importants dans l'Allemagne moderne, pour déterminer s'ils avaient une consommation alimentaire différente des individus non privilégiés. Un taux plus important d'azote a été retrouvé chez ces quatre personnalités par rapport aux non élites, et il a été déduit qu'ils avaient accès à une nourriture plus diversifiée, avec un taux de protéines supérieur (56).

5-2 : Applications à différentes périodes, multi-isotopiques

L'analyse isotopique individuelle est efficace, mais l'utilisation de plusieurs isotopes dans une même recherche permet une précision plus accrue dans les résultats. Le recoupement d'informations de ces différents isotopes permet de potentialiser les recherches, et d'en apprendre plus sur la ou les personnes étudiées (21).

Ces analyses multi-isotopiques peuvent s'effectuer dans le cas de recherches sur des sites anciens, mais aussi dans le cas d'enquêtes plus récentes ne pouvant pas se résoudre grâce aux méthodes scientifiques habituelles.

5-2-1 : Discrimination des soldats lors de grandes guerres.

Prenons pour exemple les restes humains sur d'anciennes zones de combat : après une guerre, sur le champs de bataille, les restes humains ne sont pas forcément tous identifiables, de par la violence des affrontements. Nombreux sont les soldats dont le corps ou morceau de corps n'a pas pu être identifié, par manque d'information. Or sur ce champs de bataille, ce sont plusieurs pays qui s'affrontent : les restes étudiés n'offre parfois pas de quoi différencier les origines des soldats, dont les corps ne peuvent donc pas être rapatriés dans son pays d'origine (57).

Dans ses travaux, Regan (2006) (25) a permis de mettre en évidence, en étudiant les isotopes du carbone et de l'oxygène de dents américaines et d'Asie du sud, des différences permettant de discriminer les restes américains des restes vietnamiens provenant de la guerre du Vietnam. Someda et coll (2016) (58) se sont basés sur les données des dents américaines de Regan (2006) et ont fait la même chose sur les japonais vivants entre les années 1878 et 1930, pour pouvoir effectuer les comparaisons entre américains et japonais sur des restes datant de la Seconde Guerre Mondiale.

Et c'est grâce à ces analyses isotopiques que l'origine de deux corps provenant de la Seconde Guerre Mondiale a pu être identifié parmi cinq nations (quatre nations alliées se battaient contre les allemands), et ont pu être rapatriés dans leur pays d'origine, aux Royaume-Unis (59).

5-2-2 : Enquêtes non résolues

Parmi les utilités des études multi-isotopiques, on peut retenir celle pour les enquêtes de meurtres récentes non résolues (60).

Quand un crime est commis et que le corps est retrouvé, les méthodes classiques ne suffisent pas toujours à résoudre l'enquête. Les analyses isotopiques ne permettent pas forcément de les résoudre, mais de donner des informations supplémentaires parfois cruciales pour le dénouement de ces affaires (61).

C'est le cas pour le corps d'un homme retrouvé en Allemagne, au bord de l'autoroute. L'analyse multi-isotopique de plusieurs de ses tissus (dont les dents) ont permis de déterminer qu'il provenait de Roumanie, et après recherche dans les bases de données roumaines, le rapprochement entre ce corps et la disparition d'un homme roumain a pu être fait. Le corps a pu être rendu à la famille, et les meurtriers arrêtés après enquête (62).

Plusieurs enquêtes de restes non identifiés ont pu être résolues ou ont pu avancer grâce à ces analyses (61) (63) (52) (64).

5-2-3 : Identification des corps des sans-papiers retrouvés à la frontière USA-Mexicaine

Un autre cas particulier de la nécessité d'utiliser les analyses isotopiques, concerne les difficultés d'identification des corps retrouvés à la frontière entre les USA et le Mexique.

Pour réduire l'immigration illégale des mexicains aux Etats-Unis, celle-ci a instauré des contrôles policiers « dissuasifs » à ses frontières. Malgré ces mesures, nombre sont les mexicains qui tentent de la passer, pas toujours avec succès. Avec la chaleur, beaucoup décèdent le long de la frontière, et il n'est pas souvent possible de les identifier (65).

Vers 2009, au point de contrôle frontalier de Falfurrias dans le comté de Brooks, faute de moyens pour les identifier (aucune mesure n'avait été déployée), les corps ont été tous enterrés au même endroit. Quelques années plus tard, ces mêmes corps ont été déterrés, pour identification, et pour être rapatriés dans leur pays d'origine. Les analyses ADN étant efficaces, mais trop longues, il a été entrepris d'utiliser les analyses multi-isotopiques en complément pour plus d'efficacité, en analysant les os et les dents des défunts (65).

Le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, et le strontium ont été utilisés pour effectuer une approche multi-isotopique des origines des défunts, ce qui a permis de les identifier (57) (43).

5-2-4 : Etude des populations anciennes

Enfin, reconstruire les modes de vie des populations anciennes pour les comprendre est un enjeu important de l'archéologie.

L'étude isotopique permet de retracer les schémas migratoires, les tendances alimentaires, et les classes sociales de ces populations.

Grâce à l'analyse isotopique des dents et des intestins d'un homme retrouvés dans les Alpes dans la glace (datant d'au moins 5200 ans), « the Alpine Iceman », il a pu être déduit sa région d'habitat, de son enfance à sa vie d'adulte, ce qui indique que ces vallées alpines étaient habitées durant le Néolithique terminal (66).

Schweissing et Grupe (2003), ont étudié les événements migratoires qui ont mené à l'apparition d'une tribu en Bavière, inconnue avant 551 après J.-C., en étudiant principalement le strontium de paires dent/os des défunts trouvés sur site. Ils ont déduit que 30 % de la population était immigrée, et que la population immigrée était principalement féminine, traduisant l'exogamie des femmes (le fait qu'elles quittent leurs communautés pour trouver conjoint dans une autre) (53).

Kusaka et coll (2012) ont étudié les événements migratoires dans l'ouest du Japon au cours de la période de Jomon moyenne (environ 5000–4000 ans BP) à tardive-finale (environ 4000–2300 ans BP), pour tester l'hypothèse que l'augmentation de la population sur ce site était liée à l'augmentation de la migration humaine à cette époque, en étudiant le strontium présent dans les dents des individus retrouvés sur place. Ils ont conclu, en observant les mêmes taux de Sr dans les dents des populations de Jomon moyenne et de Jomon tardive, que l'augmentation de la population n'était pas dû à des migrations de populations, mais à une augmentation intrinsèque de celle-ci (67).

Dufour et coll (2014) ont réalisé une étude visant à documenter les pratiques d'élevage sur la côte nord du Pérou au début de la période intermédiaire (200 avant J.-C. - 600 après J.-C.), en étudiant les dents de mouton de l'époque (68).

Comme dit précédemment, les analyses multi-isotopiques peuvent permettre, en utilisant plusieurs parties d'un squelette, de retracer l'histoire de vie d'un individu. C'est le cas d'une étude de Tsutaya et al (2016), qui ont étudié un squelette individuel féminin de la période Edo (1603–1868 après J.-C.) au Japon. Ils ont déduit de l'analyse isotopique sa période de sevrage, son régime alimentaire lors de l'enfance, et lors de sa vie adulte (69).

6 : Conclusion

Les dents sont un support important pour les analyses isotopiques, étant le tissu le plus résistant du corps humain. Les études isotopiques de celles-ci permettent non seulement de déterminer la période de sevrage, la localisation et le régime alimentaire dans l'enfance et adolescence, mais elles permettent surtout lors de comparaisons avec d'autres échantillons provenant du même individu de retracer la migration de celui-ci, en ayant un vrai point de comparaison entre début de vie (dents), milieu de vie (os), et fin de vie (cheveux et ongles).

Les utilités des analyses des isotopes stables en anthropologie sont multiples, que ce soit en médecine médico-légale, ou en archéologie ou étude des populations anciennes.

Nous n'avons abordé ici que les études des isotopes stables, mais il existe aussi des isotopes radioactifs qui apportent beaucoup aux recherches anthropologiques.

Pour ne citer que lui, le ^{14}C est un isotope radioactif très utilisé pour sa période de demi-vie longue. En effet, il permet de dater les restes organiques ou objets anciens contenant du carbone. Il permet principalement de discriminer les restes tenant d'un cadre judiciaire ou d'un cadre archéologique, permettant ainsi de cibler les recherches (70, 73).

Pour les restes humains, il permet de déterminer l'année de naissance des défunts en utilisant l'émail des dents. Ces informations combinées avec celles obtenues grâce aux isotopes stables permettent grandement de faciliter le travail d'identification des personnes.

Bibliographie

1. Laborier C, Danjard C, Rallon C, Collet G, Thomas H, Cérimo D. Odontologie Médico-légale, identification des personnes : des bases fondamentales aux experts de terrain. CdP Éditions Arnette : Rueil-Malmaison ; 2013. 87–225 p.
2. Bartelink EJ, Chesson LA. Recent applications of isotope analysis to forensic anthropology. *Forensic Sci Res.* 2019;4:29–44.
3. Pye K. Isotope and trace element analysis of human teeth and bones for forensic purposes. *Geol Soc Spec Publ.* 2004;232:215–36.
4. Stanley J. N, Major M. H, Tilotta F,. Mémo-fiches d’anatomie dentaire. Elsevier : Paris ; 2012. 119 p.
5. Piette E, Goldberg M. La dent normale et pathologique. Boeck Université : Louvain-la-Neuve ; 2001. 39 p.
6. Nanci A. Ten Cate’s, Oral Histology, Development, structure and function. 6th ed. Mosby; 2003. 2–3 p.
7. Brochard-Wyart F, Dandine CD, S.Griveau, R.Portier, Volatron F. Chimie générale, tout le cours en fiche. 2nd ed. Paris: Dunod; 2016.
8. Schoeninger MJ, Moore K. Bone stable isotope studies in archaeology. *J World Prehistory.* 1992;6(2):247–96.
9. Benson S, Lennard C, Maynard P, Roux C. Forensic applications of isotope ratio mass spectrometry - A review. *Forensic Sci Int.* 2006;157(1):1–22.
10. Werner RA, Brand WA. Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. *Rapid Commun Mass Spectrom.* 2001;15(7):501–19.
11. Sharp Z. Principles of Stable Isotope Geochemistry. Pearson : Londres; 2e ed., 2017, 360 p.
12. Définition anthropologie [Internet]. Available from: <https://lesdefinitions.fr/anthropologie>
13. CASCA. Société canadienne d’anthropologie [Internet]. Available from: <https://casca.ca/fr/a-propos-d-anthropologie/qu-est-ce-que-l-anthropologie>
14. Quatrehomme G. Traité d’anthropologie médico-légale. De Boeck: Louvain-la-Neuve ; 2015. 1–16 p.
15. Ventresca Miller A, Fernandes R, Janzen A, Nayak A, Swift J, Zech J, et al. Sampling and pretreatment of tooth enamel carbonate for stable carbon and oxygen isotope analysis. *J Vis Exp.* 2018;2018(138).
16. Carter JF, Barwick VJ (Eds). Good practice guide for isotope ratio Mass Spectrometry [Internet]. Firms. 2011. 48 p. Available from: http://www.forensic-isotopes.org/assets/IRMS_Guide_Finalv3.1_Web.pdf

17. Barrie S, Prosser SJ. Automated Analysis of Light-Element Stable Isotopes by Isotope Ratio Mass Spectrometry. In: Boutton TW, Yamasaki S, editors. *Mass Spectrometry of Soils*. Marcel Dek. England; 1996. p. 1–46.
18. Ehleringer JR, Cerling TE, West JB. Forensic Science Applications of Stable Isotope Ratio Analysis. *Forensic Anal Cut Edge New Methods Trace Evid Anal*. 2007;399–422.
19. A.Macko S, H.Engel M, Vladimir A, Lubec G, C.O’Connell T, E.M.Hedges R. Documenting the diet in ancient human populations through stable isotope analysis of hair. *R Soc*. 1999;354:65–76.
20. Demeter F. L’utilisation des isotopes en archéologie et en anthropologie. *Technè La Sci au Serv l’histoire l’art la préservation des biens Cult*. 2016;44:71–3.
21. Kamenov GD, Curtis JH. Using Carbon, Oxygen, Strontium, and Lead Isotopes in Modern Human Teeth for Forensic Investigations: A Critical Overview Based on Data from Bulgaria. *J Forensic Sci*. 2017;62(6):1452–9.
22. Balasse M. Potential biases in sampling design and interpretation of intra-tooth isotope analysis. *Int J Osteoarchaeol*. 2003;13(1–2):3–10.
23. Hedges REM, Reynard LM. Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. *J Archaeol Sci*. 2007;34(8):1240–51.
24. Kootker LM, Plomp E, Ammer STM, Hoogland V, Davies GR. Spatial patterns in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in modern human dental enamel and tap water from the Netherlands: Implications for forensic provenancing. *Sci Total Environ*. 2020;729:138992.
25. Regan LA. Isotopic determination of region of origin in modern peoples: applications for identification of United States war-dead from the Vietnam conflict [Internet]. ProQuest Dissertations and Theses. Florida; 2006. Available from: <https://search.proquest.com/docview/305326365?accountid=42404>
26. Herrscher E. Alimentation d’une population historique. *Bull Mem Soc Anthropol Paris*. 2003;15:145–320. Available from: <http://journals.openedition.org/bmsap/550>
27. DeNiro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. In: *Geochimica et Cosmochimica*. Pergamon Press : Oxford; 1978. p. 495–506.
28. Tipple BJ, Pagani M. The early origins of terrestrial C4 photosynthesis. *Annu Rev Earth Planet Sci*. 2007;35:435–61.
29. Van der Merwe NJ. Carbon Isotopes, Photosynthesis, and Archaeology: Different pathways of photosynthesis cause characteristic changes in carbon isotope ratios that make possible the study of prehistoric human diets. *Am Sci*. 1982;70(6):596–606.
30. Boutton TW. Stable Carbon Isotope Ratios of Soil Organic Matter and Their Use as Indicators of Vegetation and Climate Change. In: Boutton TW, Yamasaki S, editors. *Mass Spectrometry of Soils*. England: Marcel Dekker, Inc; 1996. p. 47–82.

31. DeNiro MJ, Epstein S. You are what you eat (plus a few ‰): the carbon isotope cycle in food chains. *Div Geol Planet Sci.* 1976;834–5.
32. Herrscher E. Détection isotopique des modalités d'allaitement et de sevrage à partir des ossements archéologiques. *Prat Psychol.* 2013;48(2):75–85.
33. Deniro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta.* 1981;45(3):341–51.
34. Schoeninger MJ, Deniro MJ, Tauber H. Stable nitrogen isotope ratios of bone collagen reflect marine and terrestrial components of prehistoric human diet. *Science.* 1983;220(4604):1381–3.
35. Dupras TL, Schwarcz HP, Fairgrieve SI. Infant feeding and weaning practices in Roman Egypt. *Am J Phys Anthropol.* 2001;115(3):204–12.
36. Herrscher E. Comportements socioculturels liés à l'allaitement et au sevrage : le cas d'une population grenobloise sous l'Ancien Régime [Internet]. Marseille; 2004. Available from: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00009315>
37. Ehleringer JR, Bowen GJ, Chesson LA, West AG, Podlesak DW, Cerling TE. Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2008;105(8):2788–93.
38. Beard B, Johnson C. Strontium Isotope Composition of Skeletal Material Can Determine the Birth Place and Geographic Mobility of Humans and Animals. *J Forensic Sci.* 2000;45(5):1049–61.
39. Balasse M, Ambrose SH, Smith AB, Price TD. The seasonal mobility model for prehistoric herders in the south-western Cape of South Africa assessed by isotopic analysis of sheep tooth enamel. *J Archaeol Sci.* 2002;29(9):917–32.
40. Crowley BE, Miller JH, Bataille CP. Strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in terrestrial ecological and palaeoecological research: empirical efforts and recent advances in continental-scale models. *Biol Rev.* 2015;92(1):43–59.
41. Bowen GJ. Isoscapes: Spatial pattern in isotopic biogeochemistry. *Annu Rev Earth Planet Sci.* 2010;38:161–87.
42. Hodell DA, Quinn RL, Brenner M, Kamenov G. Spatial variation of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in the Maya region: A tool for tracking ancient human migration. *J Archaeol Sci.* 2004;31(5):585–601.
43. Juarez CA. Strontium and geolocation, the pathway to identification for deceased undocumented Mexican border-crossers: A preliminary report. *J Forensic Sci.* 2008;53(1):46–9.
44. Bataille CP, Bowen GJ. Mapping $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in bedrock and water for large scale provenance studies. *Chem Geol.* 2012;304–305:39–52.
45. Chesson LA, Tipple BJ, Ehleringer JR, Park T, Bartelink EJ. Forensic applications of isotope landscapes (“isoscapes”): a tool for predicting region of origin in forensic

- anthropology cases. In: Boyd CC Jr, Boyd DC. *Forensic Anthropology: Theoretical Framework and Scientific Basis*. Wiley: New York ; 2018:127–48.
46. Hülsemann F, Lehn C, Schneiders S, Jackson G, Hill S, Rossmann A, et al. Global spatial distributions of nitrogen and carbon stable isotope ratios of modern human hair. *Rapid Commun Mass Spectrom*. 2015;29:2111–21.
 47. Bell LS, Lee-thorp J, Dobney K. Mapping Human Movement using Stable Oxygen Isotopic Ratio Mass Spectrometry: Potential Application to Forensic Science Demonstrated by a Modern Horse-Human Study. *J Can Soc Forensic Sci*. 2006;39(June):47–54.
 48. Bowen GJ, Winter DA, Spero HJ, Zierenberg RA, Reeder MD, Cerling TE, et al. Stable hydrogen and oxygen isotope ratios of bottled waters of the world. *Rapid Commun Mass Spectrom*. 2005;19(23):3442–50.
 49. Balasse M. Reconstructing Dietary and Environmental History from Enamel Isotopic Analysis: Time Resolution of Intra-tooth Sequential Sampling. *Int J Osteoarchaeol*. 2002;12(2002):155–65.
 50. Drucker D, Bocherens H. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers of change in diet breadth during Middle and Upper Palaeolithic in Europe. *Int J Osteoarchaeol*. 2004;14(3–4):162–77.
 51. Herrscher E, Le Bras-Goude G. Southern French Neolithic populations: Isotopic evidence for regional specificities in environment and diet. *Am J Phys Anthropol*. 2010;141:259–72.
 52. Chesson LA, Tipple BJ, Youmans L V, O'Brien MA, Harmon MM. Forensic identification of human skeletal remains using isotopes: a brief history of applications from archaeological dig sites to modern crime scenes. In: Latham KE, Bartelink EJ, Finnegan M. *New Perspectives in Forensic Human Skeletal Identification*. Academic Press-Elsevier: Cambridge; 2017:157–73.
 53. Schweissing MM, Grupe G. Stable strontium isotopes in human teeth and bone: a key to migration events of the late Roman period in Bavaria. *J Archaeol Sci*. 2003;30(11):1373–83.
 54. Walser JW, Kristjánssdóttir S, Gröcke DR, Gowland RL, Jakob T, Nowell GM, et al. At the world's edge: Reconstructing diet and geographic origins in medieval Iceland using isotope and trace element analyses. *Am J Phys Anthropol*. 2019;171(1):142–63.
 55. Turner BL, Kamenov GD, Kingston JD, Armelagos GJ. Insights into immigration and social class at Machu Picchu, Peru based on oxygen, strontium, and lead isotopic analysis. *J Archaeol Sci*. 2009;36(2):317–32.
 56. Knipper C, Held P, Fecher M, Nicklisch N, Meyer C, Schreiber H, et al. Superior in life — superior in death: dietary distinction of Central European prehistoric and medieval elites. *Univ Chicago Press Journals*. 2015;56(4):579–89.

57. Bartelink EJ, Berg GE, Chesson LA, Tipple BJ, Beasley MM, Prince-Buitenhuis JR, et al. Applications of stable isotope forensics for geolocating unidentified human remains from past conflict situations and large-scale humanitarian efforts. In: Latham KE, Bartelink EJ, Finnegan M. *New Perspectives in Forensic Human Skeletal Identification*. Academic Press-Elsevier: Cambridge; 2017:175–84.
58. Someda H, Gakuhari T, Akai J, Araki Y, Kodera T, Tsumatori G, et al. Trial application of oxygen and carbon isotope analysis in tooth enamel for identification of past-war victims for discriminating between Japanese and US soldiers. *Forensic Sci Int*. 2016;261:166.e1-166.e5.
59. Font L, Jonker G, Van Aalderen PA, Schiltmans EF, Davies GR. Provenancing of unidentified World War II casualties: application of strontium and oxygen isotope analysis in tooth enamel. *Sci Justice*. 2015;55(1):10–7.
60. Bartelink EJ, Berg GE, Beasley MM, Chesson LA. Application of stable isotope forensics for predicting region of origin of human remains from past wars and conflicts. *Ann Anthropol Pract*. 2014;38.1:124–36.
61. Bartelink EJ, Mackinnon AT, Prince-Buitenhuis J, Tipple BJ, Chesson LA. Stable isotope forensics as an investigative tool in missing persons investigations. In: Morewitz SJ, Colls CS, editors. *Handbook of Missing Persons*. Springer: Berlin; 2016. 443-62.
62. Rauch E, Rummel S, Lehn C, Bu A. Origin assignment of unidentified corpses by use of stable isotope ratios of light (bio-) and heavy (geo-) elements — A case report. *Forensic Sci Int*. 2007;168:215–8.
63. Font L, Peijl G Van Der, Leuwen C Van, Wetten I Van, Davies GR. Science and justice Identification of the geographical place of origin of an unidentified individual by multi-isotope analysis. *Sci Justice*. 2015;55:34–42.
64. Kamenov GD, Kimmerle EH, Curtis JH, Norris D. Georeferencing a cold case victim with lead, strontium, carbon, and oxygen isotopes. *Ann Anthropol Pract*. 2014;38.I:137–54.
65. Bartelink EJ, Chesson LA, Tipple BJ, Hall S, Kramer RT. Multi - isotope approaches for region -of- origin predictions of undocumented border crossers from the US – Mexico border: Biocultural perspectives on diet and travel history. In: Parra RC, Zapico SC, Ubelaker DH. *Forensic Science and Humanitarian Action: Interacting with the Dead and the Living*. Wiley : New York; 2020;369–84.
66. Müller W, Fricke H, Halliday AN, McCulloch MT, Wartho J-A. Origin and migration of the Alpine Iceman. *Science*. 2003;302:862.
67. Kusaka S, Nakano T, Morita W, Nakatsukasa M. Strontium isotope analysis to reveal migration in relation to climate change and ritual tooth ablation of Jomon skeletal remains from western Japan. *J Anthropol Archaeol*. 2012;31(4):551–63.

68. Dufour E, Goepfert N, Léon BG, Chauchat C, Jordán RF, Sánchez SV. Pastoralism in northern Peru during pre-Hispanic times: Insights from the Mochica period (100-800 AD) based on stable isotopic analysis of domestic camelids. *PLoS One*. 2014;9(1):e87559.
69. Tsutaya T, Miyamoto H, Uno H, Omori T, Gakuhari T, Inahara A, et al. From cradle to grave: Multi-isotopic investigations on the life history of a higher-status female from Edo-period Japan. *Anthropol Sci*. 2016;124(3):185–97.
70. Alkass K, Saitoh H, Buchholz BA, Bernard S, Holmlund G, Senn DR, et al. Analysis of Radiocarbon, Stable Isotopes and DNA in Teeth to Facilitate Identification of Unknown Decedents. *PLoS One*. 2013;8(7):1–12.
71. Arunpandian S, Dhenakaran S. A novel key and image concealing with static-dynamic pattern using modified periodic table. *Journal of Information Security and Applications*. 2021;63:103019.
72. Naji S, Gourichon L, Rendu W. La cémentochronologie. In: Balasse, M. and Brugal, J.-Ph. and Dauphin, Y. et al. *Messages d'os : archéométrie du squelette animal et humain*, Ed. des archives contemporaines, pp.217-240, 2015, Collection Sciences archéologiques, 2813001643.
73. Binois C, Intérêt des carbones 13 et 14 en médecine légale et en anthropologie. Mémoire de Diplôme d'université de pratiques expertales en odontologie légale mention identification médico-légale. : Médecine et odontologie légales. : Nantes, : 2020

Table des figures

Figure 1: Coupe longitudinale d'une molaire (72).....	10
Figure 2: Tableau périodique des éléments modifié (71).....	12
Figure 3: Schématisation d'un spectromètre de masse (11).....	17
Figure 4: Schématisation simple de CF-IRMS pour C, O, N et H (2).....	18
Figure 5: Gamme de variation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ pour différents niveaux trophiques de chaînes alimentaires terrestres et aquatiques (26).....	22
Figure 6: Evolution des compositions isotopiques en azote ($\delta^{15}\text{N}$) dans les tissus de couples mères-enfants durant la période d'allaitement et de sevrage (32).....	23
Figure 7: Variations de l'isotope du ^{87}Sr dans les roches aux Etats-Unis (38).....	25

Table des tableaux

Tableau 1: Constitution d'un émail humain mature (5).....	10
Tableau 2: Abondance relative des isotopes des éléments les plus fréquemment analysés par IRMS d'après Benson et al, 2006 (9).....	13
Tableau 3: « Quelques exemples de branches de l'anthropologie », d'après le tableau de Quatrehomme (2014) modifié (14).....	15

NANTES UNIVERSITÉ
UNITÉ DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE

Vu le Président du Jury,

VU ET PERMIS D'IMPRIMER

Vu le Doyen,

Pr Assem SOUEIDAN

ROLLAND (Clémence). - Apport de l'étude des isotopes présents dans l'organe dentaire en anthropologie : analyse de la littérature – 7 fig. ; ill. ; 3 tabl. ; 73 ref.
(Thèse : Chir. Dent. ; Nantes ; 2022)

RESUME

L'analyse des isotopes stables en anthropologie est une méthode récente permettant, à l'aide de comparaison entre les différents tissus du corps humain, de retracer l'histoire de vie d'un individu.

La dent est un tissu dur, qui ne s'altère que très peu, faisant d'elle un tissu pertinent et important pour ce type d'analyse.

Ce travail a pour objectif de réaliser une introduction sur les méthodes d'analyse des isotopes stables présent dans l'organe dentaire ainsi qu'un aperçu des utilisations de ces isotopes dans le large domaine qu'est l'anthropologie, que ce soit dans le cadre de recherches archéologiques ou d'enquêtes médico-légales plus récentes.

RUBRIQUE DE CLASSEMENT : Médecine et odontologie légales

MOTS CLEFS MESH

Odontologie - odontology

Anthropologie - anthropology

Biochimie - biochemistry

Médecine et odontologie légale – forensic medicine and odontology

JURY

Président : Pr LE GUEHENNEC Laurent

Assesseur : Dr AMADOR DEL VALLE Gilles

Assesseur : Dr CLOUET Roselyne

Directrice : Dr JORDANA Fabienne