

SOMMAIRE

HERRSCHER (E.), Alimentation d'une population historique : Analyse des données isotopiques de la nécropole Saint-Laurent de Grenoble (XIII^e-XV^e siècle, France)—<i>Diet of a Historic Population: Analysis of Isotopic Data from the Necropolis of Saint-Laurent de Grenoble (13th to 15th century, France)</i>	149-269
RÉSUMÉ	153
ABSTRACT	155
INTRODUCTION	157
ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES : BIOGÉOCHIMIE ISOTOPIQUE . .	163
BREF HISTORIQUE	163
LES TISSUS OSSEUX ET DENTAIRES	166
DOSAGES ISOTOPIQUES	168
Protocole de mesure	168
Protocole d'extraction du collagène	169
Vérification de l'intégrité du collagène	169
TRANSFERTS DE L'ISOTOPE STABLE DU CARBONE ET DE L'AZOTE AU SEIN DES CHAÎNES ALIMENTAIRES	170
UN SAUT TROPHIQUE PARTICULIER : LE CAS DU SEVRAGE	174
Limites de l'analyse transversale du sevrage	176
La stratégie du double échantillonnage	177
Protocole spécifique élaboré pour la population de Saint-Laurent : Stratégie de triple échantillonnage	180
ASPECTS MATÉRIELS	185
CONTEXTE HISTORIQUE	185
Contexte historique général	185
Contexte historique grenoblois	186
CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE	188
LES SQUELETTES DE L'ÉGLISE SAINT-LAURENT	192
ÉCHANTILLONNAGE DU MATÉRIEL OSSEUX HUMAIN ET ANIMAL POUR LES ANALYSES ISOTOPIQUES	196
RÉSULTATS ET DISCUSSION	201
VÉRIFICATION DE L'INTÉGRITÉ DU COLLAGÈNE	201
Ossements animaux	201

Ossements humains	202
<i>Sujets adultes impliqués dans l'analyse individuelle</i>	202
<i>Sujets immatures et adultes impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage</i>	203
ANALYSE DES RÉGIMES ALIMENTAIRES ADULTES À SAINT-LAURENT	205
Caractérisation de l'écosystème de Saint-Laurent	205
$\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ des animaux	205
<i>Transferts de $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ des animaux aux hommes</i>	207
Les tendances des régimes alimentaires adultes	208
Analyse de la variabilité inter-individuelle de $\delta^{15}N$	212
$\delta^{15}N$ en fonction de critères biologiques	212
$\delta^{15}N$ en fonction de critères chronologiques et archéologiques	214
MODIFICATIONS ALIMENTAIRES AU COURS DE LA VIE	215
Standardisation des données	216
Analyse des séquences isotopiques chronologiques individuelles	218
Discussion sur les comportements alimentaires au cours de la vie	223
<i>À propos du modèle théorique d'évolution des compositions isotopiques en azote</i>	223
<i>Évaluation du temps d'incorporation du signal alimentaire dans la composition isotopique des tissus</i>	228
$\delta^{15}N$ traceur du sevrage ou de l'arrêt de consommation d'une nourriture maternelle ?	229
<i>L'alimentation lactée maternelle et le sevrage au Moyen Âge</i>	229
CONCLUSION	231
ANALYSE DES RÉGIMES ALIMENTAIRES DES ADULTES	231
ANALYSE DES MODIFICATIONS ALIMENTAIRES AU COURS DE LA VIE	232
BIBLIOGRAPHIE	235
ANNEXES	257
INDEX DES FIGURES	263
INDEX DES TABLEAUX	267
RÉSUMÉS des Communications et Posters de la 1829^e réunion scientifique de la Société d'Anthropologie de Paris	271
SOMMAIRE 2003	311

**ALIMENTATION D'UNE POPULATION
HISTORIQUE : ANALYSE DES DONNÉES
ISOTOPIQUES DE LA NÉCROPOLE
SAINT-LAURENT DE GRENOBLE
(XIII^e-XV^e siècle, FRANCE)**

DIET OF A HISTORIC POPULATION: ANALYSIS
OF ISOTOPIC DATA FROM THE NECROPOLIS
OF SAINT-LAURENT DE GRENOBLE
(13th to 15th CENTURY, FRANCE)

Estelle HERRSCHER

UMR 6578 du CNRS, Unité d'Anthropologie, Université de la Méditerranée, Faculté de Médecine,
secteur Centre, 27 boulevard Jean Moulin, 13385 Marseille CEDEX 05, France
e-mail : Estelle.Herrscher@medecine.univ-mrs.fr

REMERCIEMENTS

Ce travail pluridisciplinaire a été mené dans le cadre de la formation doctorale du Muséum national d'histoire naturelle de Paris (ED 227). En cela, je remercie Monsieur le Professeur Henry de Lumley et Madame Marie-Antoinette de Lumley pour avoir permis que cette recherche se déroule au sein du laboratoire de Préhistoire. Je tiens à présenter mes remerciements à Madame Frédérique Valentin et Monsieur Hervé Bocherens pour avoir accepté de suivre ce travail. Je remercie également Madame Renée Colardelle, conservateur au Musée Archéologique de Saint-Laurent de Grenoble pour son autorisation à pratiquer des analyses isotopiques destructrices. Je remercie sincèrement Monsieur François Sémah et Madame Dominique Grimaud-Hervé de l'UMR 6569 du CNRS ainsi que Madame Anne Katzenberg de l'Université de Calgary pour leurs remarques et conseils. Pour leur assistance technique, je tiens à remercier Messieurs Daniel Billiou, Gérard Bardoux, Cyril Girardin et Madame Micheline Grably du Laboratoire de Biogéochimie Isotopique à l'Université Paris VI/Jussieu ainsi que son directeur Monsieur André Mariotti et Monsieur Hervé Guy (INRAP). Pour la détermination des espèces fauniques, je remercie Monsieur Frédéric Lamarque et Madame Marylène Patou-Mathis. Un grand merci à Marie Balasse, Gilles Berillon, Yves Fermon et Véronique Michel pour leurs nombreux enseignements et conseils. Mes remerciements vont également à l'Institut Danone pour son soutien financier à travers le « Prix de Projet de Recherche, Alimentation et Santé, 1998 » ainsi qu'à Monsieur le Professeur Matty Chiva(†) (psychologue de l'alimentation, Nanterre) pour ses nombreux commentaires et recommandations. Enfin, je voudrais qu'il me soit permis de rendre hommage à Monsieur le Professeur Jean-Louis Flandrin(†) (historien de l'alimentation, Université Paris VIII), pour son immense connaissance en matière d'alimentation et son engouement à la faire partager. Je tiens également à remercier le comité de rédaction de la revue pour ses conseils avisés lors de la réécriture du manuscrit.

RÉSUMÉ

L'usure dentaire, les caries et les atteintes alvéolaires constituent les lésions les plus communes et souvent les plus informatives sur l'alimentation des populations du passé. Toutefois, le développement des techniques chimiques basées sur l'analyse des éléments traces et des isotopes stables contenus dans les ossements, a ouvert de nouvelles voies de recherche. L'analyse des isotopes stables permet de cerner la nature des aliments consommés par les individus. Ce travail s'inscrit dans cette perspective et propose une reconstitution des comportements alimentaires d'une population médiévale, à partir de l'analyse des isotopes stables de l'azote ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) et du carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) contenus dans le collagène des os et des dents. Il a pour objectif de cerner l'évolution des régimes alimentaires à l'échelle de la population et au cours de la vie des individus et de discuter ses éventuelles relations avec des critères biologiques, archéologiques et chronologiques.

Les squelettes ont été mis au jour dans le cimetière de l'Église Saint-Laurent de Grenoble. Ce site archéologique se trouve dans un des faubourgs de la ville de Grenoble, dans les Alpes du Nord (Isère). Le matériel comprend 336 individus à partir desquels 55 ont été sélectionnés pour les analyses isotopiques. Il s'agit de 34 sujets adultes et 21 immatures répartis en trois phases d'inhumation (notées phases 13, 14 et 15) qui s'étendent du XIII^e s. au XV^e s.

Dans un premier temps, afin de retracer au mieux les relations entre l'environnement et les hommes de Saint-Laurent, les analyses isotopiques ont porté sur un échantillon d'ossements humains et animaux. Deux grandes tendances alimentaires ont été détectées, l'une à dominante végétarienne et l'autre à dominante carnée ou de produits laitiers. Les individus de Saint-Laurent se placent dans un spectre continu entre ces deux tendances. Un apport alimentaire à base de poisson d'eaux douces ou marines, sans être écarté complètement, n'existait vraisemblablement pas dans des proportions importantes. En dépit du fractionnement de l'effectif en fonction de critères biologiques et chronologiques qui incite à la prudence, l'analyse des données isotopiques a permis de souligner que l'augmentation de l'apport en protéines animales entre le XIV^e et le XV^e s. serait associée à une plus grande longévité et à une plus grande stature et que les

individus inhumés dans le cloître devaient avoir un accès plus aisé aux protéines animales que ceux inhumés sur la place de l'église. L'alimentation exclusivement à base de végétaux, signalée chez les ruraux à cette époque, n'est pas attestée à Saint-Laurent.

Dans un deuxième temps, afin de montrer les modifications alimentaires au cours de la vie, une stratégie d'échantillonnage impliquant plusieurs tissus squelettiques d'un même individu a été utilisée. La cinétique de renouvellement différente des tissus osseux et dentaires permet d'obtenir des signaux isotopiques correspondant à des moments différents de la vie de l'individu. Sur ces bases, les modifications alimentaires liées à l'allaitement et au sevrage ont été étudiées car les tissus en croissance d'un nourrisson allaité s'enrichissent en azote-15. Trois prélèvements par individu ont été étudiés, au niveau d'une racine dentaire en formation correspondant à un signal alimentaire contemporain du décès et au niveau de l'os alvéolaire proche d'un germe dentaire et proche de dents déjà sur arcade, correspondant à des signaux antérieurs à la mort. Le sevrage des enfants médiévaux de Saint-Laurent devait débiter entre 2,6 et 3,3 ans. L'extension de cette stratégie d'échantillonnage à des enfants âgés entre 5 et 11 ans a montré un phénomène particulier, caractérisé par un enrichissement en azote-15 au moment du décès, vraisemblablement induit par un stress.

Replacée dans le contexte historique, climatique et socio-politique de la fin du Moyen Âge pour la région de Grenoble, la large dispersion des signatures isotopiques en azote, au XIV^e s., indiquerait un accès diversifié aux ressources de l'écosystème. Cette diversité pourrait aussi relever de moyens de subsistance disparates en raison d'évènements comme la guerre de Cent Ans et l'épidémie de peste (1348). L'augmentation de l'apport en protéines animales entre le XIV^e s. et le XV^e s. et la faible diversité de l'alimentation au XV^e s. révéleraient une période de stabilité économique plus importante avec des conditions de vie plus uniformes caractérisant une économie alimentaire urbaine. Toutefois, ces observations pourraient également être induites par le niveau social plus élevé des individus inhumés dans le cloître, comparativement aux sujets inhumés sur la place de l'Église Saint-Laurent.

Mots-clés :

Alimentation, squelette, isotopes stables, azote, carbone, collagène, variabilité inter- et intra-individuelle, bas Moyen Âge, Église Saint-Laurent de Grenoble, France.

ABSTRACT

Tooth wear, caries, and alveolar modifications provide the most common and most informative evidence regarding the nutritional condition of past populations. However, the development of biochemical techniques such as the analysis of stable isotopes and trace elements now offers new perspectives for this research. The analysis of stable isotopes enables us to determine what types of food were consumed during an individual's life. Based on analyses of the stable isotopes of nitrogen ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) and carbon ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in bone and tooth collagen, this study reconstructs the dietary behaviour of a historical population excavated in the cemetery of the church of Saint-Laurent at Grenoble. This research evaluates the changes in dietary behaviour not only within the population, but also over the life span of individuals. An additional objective is to analyze the data according to different biological, archaeological and chronological criteria.

The archaeological site of Saint-Laurent is located in Isère, France, in the Northern Alps, in a suburb of the city of Grenoble. The osteoarchaeological material consists of 336 individuals, from which 55 were chosen for isotope analyses. There are 34 adults and 21 sub-adults divided into three burial phases—phase 13, phase 14, and phase 15—representing the late medieval period, from the 13th to the 15th centuries AD.

Isotope analyses were carried out on both human and animal bones, to evaluate the relationship between the environment and the individuals from Saint-Laurent. Two main dietary trends have been detected, one mainly vegetarian and the other based upon meat and dairy products. The consumption of fish, although not to be dismissed, does not appear to be significant. Although the samples were small, the data indicate an increase in protein consumption between the 14th and 15th centuries, which may correlate with greater longevity and taller stature; the individuals buried in the cloister may have had access to a diet richer in animal protein than those buried in the church square. An exclusively vegetarian diet, known from historical studies to be common for the rural populations of this period, has not been observed for the Saint-Laurent population.

In order to observe dietary changes within an individual's life span, a sampling strategy requiring analysis of three tissues from a skeleton was used. Because of differential bone and dental growth, it is possible to isolate isotope signals corresponding to specific points in an individual's life. Thus dietary changes related to breastfeeding and weaning periods were studied because maternal milk induces an increase in nitrogen-15 within the developing tissues of babies. Three kinds of tissues per individual were sampled: a growing tooth root, corresponding to a diet signal at the time of death, and two pieces of mandibular bone—one close to a tooth bud and the second close to an erupted tooth - both corresponding to different diet signals prior to the time of death. Isotope data indicates that weaning began between 2.6 and 3.3 years for the children in the medieval Saint-Laurent population. The application of this strategy for children aged between 5-11 years of age has indicated another phenomenon, an enrichment in nitrogen-15 at the time of death, most likely due to an unidentified source of stress.

The above data support evidence for economic, political and environmental changes occurring at the end of the medieval period in the Saint-Laurent population. A wide dispersion of isotope signals in the 14th century diet indicates access to a wider variety of food resources. This diversity could also indicate different means of subsistence induced by historical events such as the Hundred Years' War and the plagues of the mid-14th century AD. The increased consumption of animal protein between the 14th and 15th centuries, as well as a reduction in dietary diversity in the 15th century could indicate a period of greater economic stability with more uniform conditions characterizing a urban food economy. Despite the implication of a general increase in socio-economic stability, there is also the possibility that the individuals buried in the cloister of the church of Saint-Laurent were of a higher social level than those buried in the church square.

Key words:

Diet, skeleton, stable isotopes, carbon, nitrogen, collagen, inter- and intra-individual variability, late medieval period, church of Saint-Laurent in Grenoble, France.

INTRODUCTION

L'alimentation est universelle et indispensable pour assurer la régulation du bilan d'énergie au sein de l'organisme (Whitney, Rolfes 1999). En cela, elle est une des préoccupations majeures des hommes, qui, au-delà des besoins vitaux à satisfaire, ont également eu à contenter leurs préférences gustatives, qu'elles soient individuelles ou collectives (Heider 1972 ; Lee, Devore 1987 ; Harris, Ross 1988 ; Sharman *et al.* 1991 ; Goodman *et al.* 2000). Comme le souligne Bellisle : « Dans l'espèce humaine, le comportement alimentaire répond non seulement aux impératifs biologiques et aux sollicitations de l'environnement naturel, mais il s'inscrit dans une culture, dans un environnement social, dans un contexte économique. Ces derniers facteurs, qui modèlent tout comportement humain, imposent des règles d'exécution aux conduites alimentaires » (Bellisle 1999). Étudier les comportements alimentaires humains d'hier et d'aujourd'hui, c'est donc chercher à cerner la spécificité de chaque régime alimentaire à travers le(s) type(s) d'aliments consommés et les facteurs biologiques, environnementaux, économiques, historiques ou culturels à l'origine de la diversité des comportements alimentaires observés.

La « paléonutrition » constitue un domaine de recherche en expansion utilisant diverses disciplines complémentaires. L'alimentation du passé est essentiellement connue grâce aux historiens, dont les travaux reposent sur l'analyse de documents tels que des livres de cuisine, des récits, des registres, des livres de comptes, des iconographies (Alexandre-Bidon 1992 ; Flandrin, Montanari 1996 ; Laurieux 2002). Cette documentation permet d'aborder des thèmes généraux comme les modes alimentaires et culinaires (Montanari 1995 ; Flandrin 1999 ; Poulain 2000), l'histoire d'un groupe d'aliments en particulier (Laurieux 1985 ; Gillet 1994 ; Kaplan 1996) ou encore l'acheminement des denrées alimentaires au sein d'une région (Stouff 1970). L'archéologie contribue également, pour une large part, aux reconstitutions des « paléodiètes ». L'analyse des restes osseux animaux permet, à partir des fluctuations entre les diverses espèces consommées, d'aborder les comportements de subsistance (Perkins, Daly 1968 ; Claassen 1986 ; Patou-Mathis 1996), l'élevage (Greenfield 1988 ; Audoin-Rouzeau 1993 ; Desse, Audoin-Rouzeau 1993 ; Halstead 1996 ; Albarella 1999)

ainsi que les modes culinaires à partir de l'état de fracturation des ossements et de leur répartition dans les sites (Audoin-Rouzeau 1991, 1994 ; Grantham 2000 ; Hoffman *et al.* 2000). L'archéo-(ethno-)botanique étudie les « macrorestes » végétaux tels que les fruits, les feuilles, les noix, les graines, les racines ou les tubercules et permet tant d'identifier la consommation des différents fruits cultivés, récoltés ou importés que de restituer l'histoire des aliments (Crites 1987 ; Hather 1992 ; Ruhl 1997 ; Takamiya 2002). L'étude des microrestes végétaux, comme les pollens ou les phytolithes contenus dans les sols ou le ciment des dents, s'attache à comprendre la consommation des produits végétaux et le développement des cultures (Fox *et al.* 1996 ; Eubanks 1997 ; Warnock 1998 ; Horrocks *et al.* 2000). L'analyse des pollens et des parasites contenus dans les matières fécales ou coprolithes humains est originale et informative car, contrairement aux approches mentionnées ci-dessus, elle permet de considérer conjointement la composante végétale et animale (Fry 1985). Alors que la palynologie rend compte de la consommation de produits végétaux et de l'expansion de l'agriculture (Bryant 1974), la paléoparasitologie détecte la présence éventuelle de bétail par l'analyse des parasites intestinaux (Faulkner 1991 ; Holden 1991 ; Araujo *et al.* 1998). Une approche plus récente est l'analyse chimique des résidus contenus dans les poteries (Evershed *et al.* 1992). Ces analyses offrent la possibilité de discuter les pratiques culinaires (Evershed *et al.* 2003), l'exploitation des animaux (Dudd *et al.* 1999) ou de produits dérivés comme le lait (Dudd, Evershed 1998).

L'analyse des vestiges osseux humains, témoins biologiques directs des populations disparues, apporte également une large contribution à la reconstitution de la « paléonutrition ». Le squelette humain, en raison de sa plasticité, a la particularité d'exprimer des caractéristiques morphologiques et pathologiques en relation avec le type d'aliment consommé (Buikstra, Cook 1980 ; Huss-Ashmore *et al.* 1982 ; Goodman *et al.* 1984, 1988 ; Ortner, Putschar 1985 ; Larsen 1995, 1997, 2000 ; Aufderheide, Rodriguez-Martin 1998 ; Ortner, Theobald 2000 ; Larsen *et al.* 2001 ; Herrscher 2002). Deux types de marqueurs alimentaires peuvent être analysés au sein du squelette : ils sont soit osseux, soit chimiques. Les indicateurs ostéologiques les plus connus sont les lésions touchant la sphère bucco-dentaire : caries, atteintes de l'os alvéolaire, usures dentaires et dépôts de tartre dentaire (Patterson 1984 ; Hillson 1996 ; Larsen 1997, 2000 ; Prossinger, Willms 1998). L'analyse des usures dentaires permet d'estimer la nature des aliments consommés et le niveau technique de préparation des aliments (Molnar 1972 ; Wallace 1974 ; Walker 1978 ; Molleson, Jones 1991 ; Teaford 1991 ; Molleson *et al.* 1992 ; Teaford, Lytle 1996 ; Larsen *et al.* 2001). La présence de lésions alvéolaires et de caries indique une alimentation contenant une proportion importante d'hydrates de carbone ou de sucres (Hillson 1979 ; Turner 1979 ; Larsen 1987 ; Hartnady, Rose 1991 ; Larsen *et al.* 1991, 2001). D'autres marqueurs osseux tels que des anomalies des dimensions et de la

morphologie des os longs, la présence de défauts des surfaces externes de la boîte crânienne (*cribra cranii*, *cribra orbitalia*) et de la structure de l'émail des dents (hypoplasies linéaires de l'émail dentaire) sont utilisés pour évaluer l'état nutritionnel des individus (Carlson *et al.* 1974 ; Goodman *et al.* 1980 ; Buikstra, Cook 1980 ; Huss-Ashmore *et al.* 1982 ; Rose *et al.* 1985 ; Stuart-Macadam 1985, 1989 ; Walker, Erlandson 1986 ; Goodman, Rose 1990).

Les ossements enregistrent également de nombreux signaux chimiques relatifs à l'environnement dans lequel l'individu a vécu. L'analyse de leur contenu chimique, dans une perspective de reconstitution des « paléodiètes », est une recherche plus récente liée aux progrès des techniques (Buikstra, Cook 1980 ; Price *et al.* 1985 ; DeNiro 1987 ; Price 1989). Des aspects de l'alimentation passée comme l'importance des produits marins et terrestres, la contribution d'aliments végétaux et animaux et la présence de certaines espèces végétales et animales peuvent maintenant être estimées de façon rigoureuse à partir des techniques quantitatives impliquant l'analyse des éléments traces et des isotopes stables (Klepinger 1984, 1992 ; Bumsted 1985 ; Schoeninger, Moore 1992 ; Pate 1994 ; Katzenberg, Harrison 1997 ; Bocherens 1999 ; Katzenberg 2000 ; Sandford, Weaver 2000). Les éléments traces sont contenus dans la fraction minérale des os et des dents. Il s'agit principalement du strontium, du calcium, du barium, du magnésium, du manganèse, concentrés dans les tissus végétaux, mais également du zinc, du cuivre et du molybdène, concentrés dans les tissus animaux (Bumsted 1985 ; Price *et al.* 1985 ; Buikstra *et al.* 1989 ; Sillen *et al.* 1989 ; Pate 1994 ; Sandford, Weaver 2000). L'analyse des rapports Sr/Ca et Ba/Ca et des multi-éléments a permis de reconstituer les tendances des régimes alimentaires de nombreuses populations préhistoriques et historiques sur la base d'une distinction d'une part entre espèces herbivores et carnivores et, d'autre part, entre espèces marines et terrestres (Schoeninger 1979, 1982 ; Sillen 1981 ; Sillen, Kavanagh 1982 ; Katzenberg 1984 ; Sillen, Smith 1984 ; Klepinger *et al.* 1986 ; Polet 1996 ; Polet, Orban 2001). Des thèmes plus précis comme l'alimentation des hominidés (Sillen *et al.* 1995), la transition chasseurs-cueilleurs/horticulteurs (Buikstra *et al.* 1989), les relations entre régimes alimentaires, statut social et sexe (Lambert *et al.* 1979 ; Brown, Blakely 1985 ; Hatch, Geidel 1985 ; Polet 1996 ; Polet, Orban 2001) ou encore le développement des cultures (Lambert *et al.* 1979) ont également été abordés. Des intoxications liées aux pratiques alimentaires ont pu être révélées à partir de l'analyse du plomb (Aufderheide *et al.* 1981 ; Reinhard, Ghazi 1992 ; Keenleyside *et al.* 1996 ; Polet 1996) et des corrélations ont pu être établies entre éléments traces et indicateurs de stress (Sandford *et al.* 1983 ; Polet *et al.* 2000). Les isotopes stables sont contenus dans la fraction minérale (carbone, oxygène, strontium) et dans la fraction organique (carbone, azote) des ossements. Alors que les isotopes du carbone et de l'azote sont intimement liés à l'alimentation, l'oxygène et le strontium dépendent du milieu géologique, du climat et de l'eau. Les études basées sur

l'analyse des isotopes stables du carbone et de l'azote, dans une perspective paléo-alimentaire, sont couramment développées depuis les années 1990 dans des populations historiques américaines (Katzenberg *et al.* 1995 ; Ubelaker *et al.* 1995 ; Dupras, Schwartz 2001 ; Larsen *et al.* 2001) ou dans des populations européennes (Bocherens *et al.* 1991b ; Richards *et al.* 1998 ; Schutkowski *et al.* 1999 ; Herrscher *et al.* 2001, 2002 ; Polet, Orban 2001 ; Privat *et al.* 2002 ; Polet, Katzenberg 2003). En raison d'une meilleure conservation du collagène et d'un accès moins restrictif au matériel, les études isotopiques d'ossements humains de périodes historiques sont plus nombreuses. Au-delà des relations entre les groupes humains et leur environnement, ces études ont permis de préciser la relation entre certains aliments et les structures sociales (Bocherens *et al.* 1991b ; Ezzo *et al.* 1995 ; Ubelaker *et al.* 1995 ; Richards *et al.* 1998 ; Schutkowski *et al.* 1999), de cerner l'évolution des économies de subsistance (Johansen *et al.* 1986 ; White, Schwarcz 1994 ; Mays 1997) et de la consommation de lait maternel (Katzenberg 1993 ; Katzenberg *et al.* 1996 ; Herring *et al.* 1998 ; Dupras *et al.* 2001 ; Richards *et al.* 2002). Dans tous ces travaux, les reconstitutions des paléodiètes reposent sur l'analyse des variations des « signaux alimentaires » observés au sein de la population. Pourtant, une autre voie de recherche, concernant l'analyse des variations des signaux à l'échelle de l'individu, se distingue. Elle repose sur un protocole d'échantillonnage approprié qui permet de rendre compte de différents moments de la vie d'un individu. Cette démarche a notamment été utilisée dans le but d'étudier des migrations de populations (Ericson 1985 ; Sealy, Van der Merwe 1986 ; Price *et al.* 1994a, b ; Sealy *et al.* 1995 ; Grupe *et al.* 1997) ou encore de préciser la production laitière au Néolithique (Balasse *et al.* 1997, 1999 ; Balasse 1999 ; Balasse, Tresset 2002). En raison des propriétés chimiques des tissus osseux et dentaires, deux messages alimentaires sont recherchés, par exemple, l'un sur l'émail ou la dentine dont on sait que les compositions chimiques ne subissent plus de modification après maturation, et l'autre sur l'os dont le *turnover* de la phase organique assure *de facto* un renouvellement permanent de sa composition chimique. La mise en évidence de signaux différents entre les deux prélèvements atteste d'une modification de régime alimentaire au cours de la vie de l'individu. C'est notamment à partir de ce principe, mais en comparant deux signaux isotopiques provenant de deux fragments d'émail correspondant à un âge différent, que Wright et Schwarcz (1998, 1999) discutent les modalités d'allaitement et de sevrage de populations préhistoriques guatémaltèques. Dans cette même perspective, Bell *et al.* (2001) ont également réussi à obtenir différents signaux isotopiques permettant de discuter des modifications alimentaires au cours de la vie, à partir d'un protocole reposant sur un fractionnement par densité osseuse.

Le travail présenté ici propose une reconstitution des comportements alimentaires d'une population historique par l'analyse des signatures des isotopes stables de l'azote et du carbone. Il analyse des échantillons prélevés sur des squelettes de la population de Saint-Laurent de Grenoble (Isère, France), datés des XIII^e, XIV^e et XV^e s. Son objectif est de reconstituer les comportements alimentaires à l'échelle de la population et de détecter les modifications alimentaires au cours de la vie, à l'échelle individuelle. Ces deux aspects sont discutés en fonction de plusieurs critères biologiques (âge au décès, sexe), chronologiques et archéologiques (type et localisation des sépultures).

ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES : BIOGÉOCHIMIE ISOTOPIQUE

BREF HISTORIQUE

Les premières investigations paléobiogéochimiques pour étudier les régimes alimentaires passés se sont appuyées sur l'analyse du collagène des ossements, en raison des méthodes d'extraction déjà connues et utilisées en routine pour les datations radiocarbone (Sellstedt *et al.* 1966). D'un autre côté, Hall (1967) remarque que le maïs, ainsi que d'autres plantes, présentent des signatures isotopiques en carbone (^{13}C) plus élevées que tous les autres végétaux de régions tempérées, induisant un rajeunissement des datations ^{14}C . Quelques années plus tard, Smith et Epstein (1971) mettent en évidence les deux types de photosynthèse empruntés par les plantes (en C_3 et C_4), confirmant cette différence. Les travaux majeurs de DeNiro et Epstein (1978, 1981), sur des animaux de régime alimentaire isotopiquement connu, démontrent que les rapports isotopiques en carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) et en azote ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) des tissus sont intimement liés à leur alimentation. Ces découvertes fondamentales marquent le début de l'application des isotopes stables en archéologie et paléanthropologie. La première étude menée par Vogel et Van der Merwe, en 1977, sur les populations nord-américaines de Woodland, a permis de dater l'introduction significative du maïs dans l'alimentation (Van der Merwe, Vogel 1978). Des études ultérieures authentifient ces résultats, donnant une nouvelle vision de l'évolution des régimes alimentaires des populations historiques de l'est de l'Amérique du Nord (Bender *et al.* 1981 ; Schwarcz *et al.* 1985 ; Lynott *et al.* 1986 ; Buikstra *et al.* 1988). En 1981, Tauber montre une relation entre les rapports isotopiques en carbone et les produits marins, indiquant une baisse de consommation de poisson, des populations de pêcheurs mésolithiques aux populations d'agriculteurs-éleveurs néolithiques du Danemark (Tauber 1981). Une dépendance aux produits marins est également établie dans des populations canadiennes par une corrélation négative entre leur consommation et la distance au littoral (Chisholm *et al.* 1982 ; Lovell *et al.* 1986). De la même façon, Schoeninger *et al.* remarquent que l'analyse des rapports isotopiques en azote permet de discuter la consommation de poisson (Schoeninger *et al.* 1983 ; Schoeninger, DeNiro 1984). Dans cette perspective, menant une analyse combinée ou non des isotopes du carbone et de l'azote, de nombreux travaux ont été développés sur

des populations préhistoriques africaines et sur des populations historiques des Bahamas (Ambrose, DeNiro 1986 ; Sealy, Van der Merwe 1986 ; Keegan, DeNiro 1988). Une avancée importante est aussi la mise en évidence d'une nette différenciation des niveaux trophiques des herbivores et des carnivores grâce aux rapports isotopiques en azote (DeNiro, Epstein 1981 ; Minagawa, Wada 1984 ; Schoeninger, DeNiro 1984). Ces résultats, confirmés par d'autres travaux, ont permis une évaluation de la consommation de viande dans différentes populations (Ambrose, DeNiro 1986 ; Katzenberg 1989 ; Bocherens, Fizet, Mariotti, Olive *et al.* 1991). Par exemple, l'analyse des restes humains paléolithiques de Sclayn (Belgique) et Marillac (Charente, France) révèle une tendance alimentaire carnée chez les Néandertaliens en raison des signatures en azote similaires à celles de prédateurs contemporains (Bocherens, Fizet, Mariotti, Lange-Badré *et al.* 1991 ; Bocherens *et al.* 1997, 1999 ; Fizet *et al.* 1995). Enfin, l'avancée la plus récente est due aux travaux de Fogel *et al.* en 1989, qui démontrent, à partir d'une population actuelle, une corrélation entre absorption du lait maternel et augmentation en azote-15 dans les tissus nouvellement formés chez l'enfant. Depuis, l'azote-15 est largement utilisé pour discuter la durée de consommation de lait maternel et les modalités du sevrage. Les travaux cités ci-après présentent les développements en la matière dans diverses populations préhistoriques et historiques, canadiennes, américaines, africaines et européennes (Fogel *et al.* 1989 ; Katzenberg 1993 ; Katzenberg *et al.* 1993, 1996 ; Schurr 1997, 1998 ; Herring *et al.* 1998 ; Dupras *et al.* 2001 ; Richards *et al.* 2002). Toutefois, le collagène ne constitue pas le seul support des analyses isotopiques. Des investigations ont également été conduites sur la fraction minérale des os et des dents (fractions carbonate et phosphate). Des travaux de nutrition contrôlée ont confirmé que, contrairement au carbone du collagène qui reflète uniquement les protéines de l'alimentation, le carbone des carbonates renvoie à l'alimentation dans sa totalité, intégrant la partie glucidique, lipidique et protéique (Ambrose, Norr 1993 ; Tieszen, Fagre 1993). Depuis, la reconstitution des régimes alimentaires s'intéresse tant à la partie organique (collagène) qu'à la partie minérale (carbonate) (Garvie-Lok 2001 ; Prowse 2001). La fraction minérale contient également les isotopes de l'oxygène (^{18}O) et du strontium (^{87}Sr). Ces éléments sont liés au contexte géographique dans lequel les individus ont vécu. Bien qu'ils soient majoritairement utilisés pour discuter les migrations de populations (Ericson 1985 ; Price, Grupe *et al.* 1994 ; Price, Johnson *et al.* 1994 ; Ezzo *et al.* 1995 ; Sealy *et al.* 1995), leur analyse a également permis l'étude des comportements alimentaires à base de nourriture terrestre ou marine (Sealy *et al.* 1991) et celle de l'alimentation maternelle et adulte (Wright, Schwarcz 1998).

Actuellement, la biogéochimie isotopique appliquée à la restitution de l'alimentation des populations humaines repose sur l'analyse de l'azote et du carbone du collagène ainsi que sur celle du carbone, de l'oxygène et du strontium de la fraction

minérale des os et des dents (*fig. 1*). La reconstitution des comportements alimentaires à Saint-Laurent a utilisé l'analyse des compositions isotopiques du carbone et de l'azote contenus dans la fraction organique de l'os et de la dentine ¹.

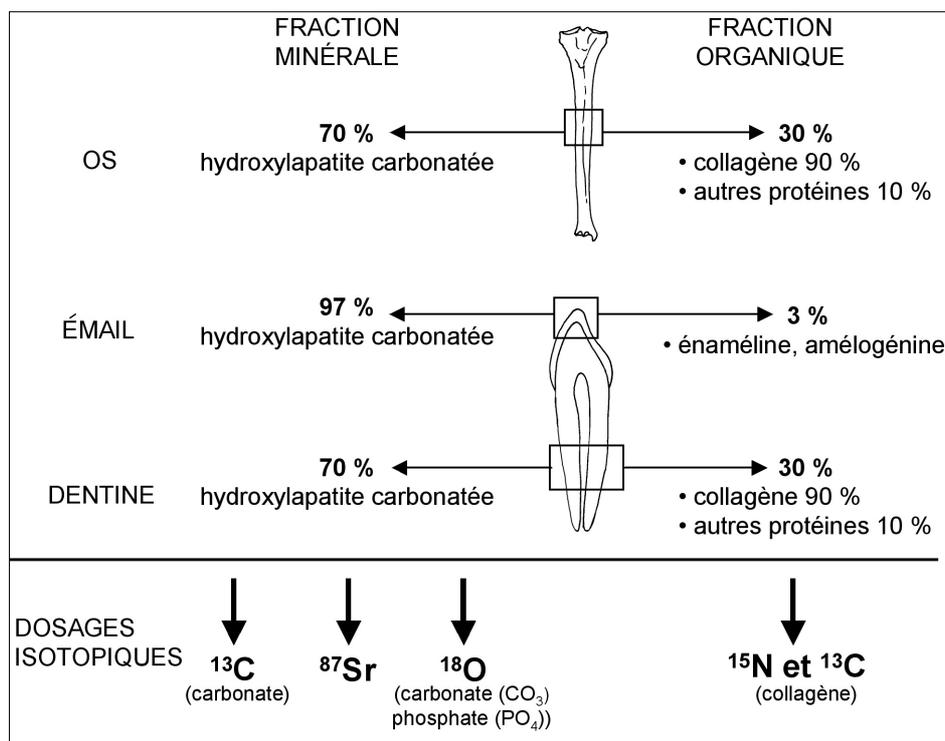


Fig. 1. - Constitution des tissus osseux et dentaires et éléments isotopiques dosables.

Fig. 1—Constitution of bone and dental tissues and measurable isotopic elements.

1. Les analyses isotopiques ont été réalisées au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique de l'Université Paris VI/Pierre et Marie Curie (directeur : Professeur André Mariotti) dans l'équipe de recherche dirigée par Hervé Bocherens.

LES TISSUS OSSEUX ET DENTAIRES

La phase minérale forme 70 % de l'os et de la dentine et 97 % de l'émail (en poids sec). Elle est essentiellement constituée d'hydroxylapatite carbonatée, encore appelée bioapatite. Cette dernière correspond à une famille de minéraux basée sur l'agencement différentiel des ions calcium et phosphate (Steele, Bramblett 1988). La composante organique est constituée à 90 % de fibres de collagène. Vingt acides aminés différents constituent les molécules de collagène. Environ 13 variétés de collagènes ont été identifiées, le type I est quantitativement le plus important. Il est formé de 3 chaînes : 2 chaînes identiques α_1 et une chaîne α_2 , enroulées en une triple hélice (Weiss, Ayad 1982). C'est dans les espaces laissés vides par la trame de collagène que prennent place les cristaux de bioapatite.

In vivo : Échanges dans un environnement cellulaire

L'activité des ostéoblastes/ostéoclastes et des odontoblastes est largement responsable du développement et du maintien des tissus squelettiques. Au niveau de la papille dentaire, les odontoblastes sécrètent la dentine constituée uniquement de collagène de type I (Birkedal-Hansen 1982). Les ostéoclastes participent à la résorption des tissus osseux et les ostéoblastes sont impliqués dans de nombreuses fonctions dont la synthèse du collagène de type I. Lors de la croissance ou du renouvellement des cellules osseuses, une action « couplée » entre ostéoblastes et ostéoclastes s'opère. Les cellules ostéoblastiques sont soumises à l'influence de nombreux facteurs hormonaux et locaux (Sakamoto 1982). Les hormones les plus importantes dans la synthèse des protéines sont l'hormone parathyroïdienne, la calcitonine et l'hormone de croissance. En plus des facteurs hormonaux, le tissu osseux semble soumis à des paramètres tels que l'âge, le sexe et les pathologies (Sakamoto 1982 ; Steele, Bramblett 1988). En outre, le renouvellement n'est pas rigoureusement identique dans les os et les dents. Alors que l'os est en perpétuel renouvellement, la dentine et l'émail, une fois « matures », ne subissent plus de modification de leur composition chimique (Borggreven *et al.* 1979). Cela signifie que le collagène dentaire contient des signaux contemporains du moment de sa formation et que le collagène osseux renferme des signaux en rapport avec la cinétique de renouvellement des protéines du collagène. Ces propriétés permettent de rendre compte, dans une perspective longitudinale, de différents moments de la vie d'un même individu (*fig. 2*). Il est toutefois difficile de savoir précisément à quelle période correspondent les signaux enregistrés par l'os. D'après les expériences portant sur le *turnover* des cellules osseuses, il apparaît que le collagène pourrait refléter les dix dernières années de la vie de l'adulte (Libby *et al.* 1964 ; Stenhouse, Baxter 1979). D'autres études ont montré que des prélèvements réalisés en plusieurs points d'un même os pouvaient donner des signatures isotopiques différentes (diaphyse/métaphyse : Fizet

1992 ; os compact/os spongieux : Sealy *et al.* 1995 ; os normal/os proche d'un germe dentaire : Balasse *et al.* 1997, 1999). Ces différences intra-individuelles s'expliquent par une cinétique différentielle de renouvellement du tissu osseux. Plus le renouvellement est rapide², plus les modifications isotopiques s'enregistrent rapidement (Tieszen *et al.* 1983 ; Fizet 1992 ; Balasse *et al.* 1997, 1999).

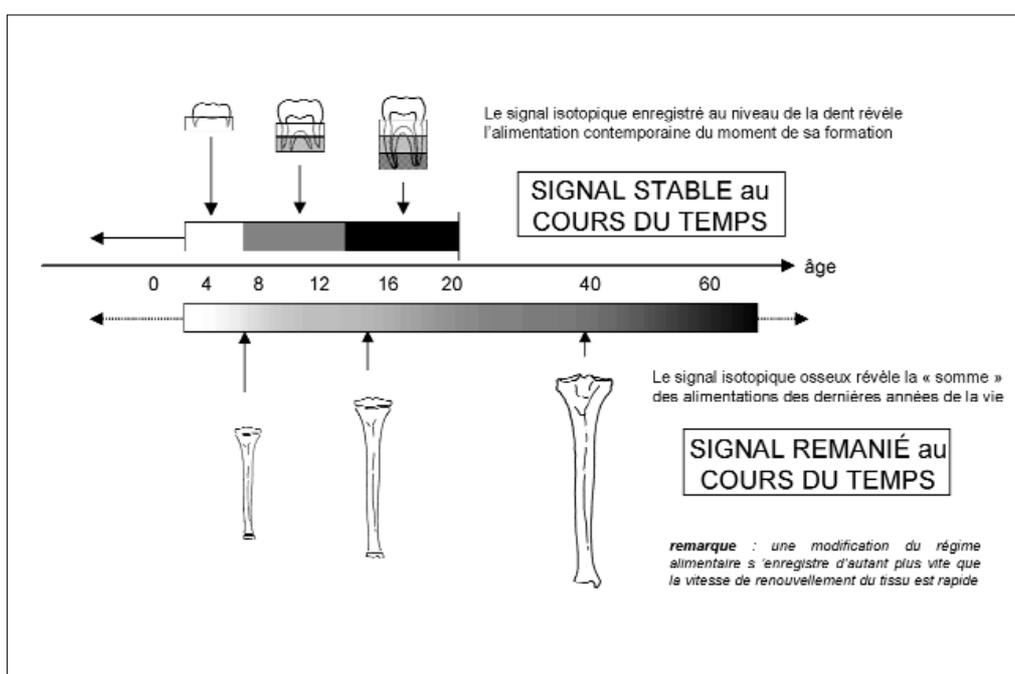


Fig. 2 - Modalités d'enregistrement des signaux alimentaires en fonction des tissus osseux et dentaires.

Fig. 2—Recording methods of dietary signals according to the bone and dental tissues.

2. Les enfants ont un métabolisme plus important induisant un renouvellement des cellules osseuses plus rapide que chez l'adulte. De même, les métaphyses (Fizet 1992) et l'os proche d'un germe dentaire (Balasse *et al.* 1997) ont un renouvellement plus rapide que les autres parties du squelette. La même remarque peut être faite pour l'os spongieux qui présente un renouvellement plus rapide que l'os compact (Sealy *et al.* 1995).

Post mortem : Échanges dans un environnement sépulcral

Quelles que soient les conditions d'enfouissement, la composition chimique des ossements est soumise à des phénomènes de dégradation et de contamination plus ou moins importants (von Endt, Ortner 1984 ; Sillen 1989 ; Koch *et al.* 1990 ; Pate 1994 ; van Klinken 1999). Des travaux sur les relations entre les conditions d'enfouissement et la préservation des signaux isotopiques ont montré des facteurs d'altération propres aux phases organique et minérale (Nelson *et al.* 1986 ; Schoeninger *et al.* 1989 ; Hare, von Endt 1990). Les modifications de pH du sol (Gordon, Buikstra 1981), les variations de température (Grupe *et al.* 1993) et l'attaque microbienne renforcée dans un contexte aérobie (Baud 1986 ; Grupe, Piepenbrink 1989) dénaturent les protéines du collagène. Des cristallisations de calcite, des substitutions des ions calcium et phosphate et des recristallisations des cristaux d'apatite (Buikstra *et al.* 1989 ; Sillen 1989 ; Iacumin 1996) peuvent altérer la phase minérale.

DOSAGES ISOTOPIQUES

Les isotopes stables de l'azote (^{15}N) et du carbone (^{13}C) ont la propriété de ne pas subir de modifications de concentration après la mort de l'individu, ainsi les teneurs mesurées aujourd'hui correspondent à celles accumulées de son vivant. Dans la nature, le carbone et l'azote présentent deux isotopes stables chacun : ^{12}C , ^{13}C et ^{14}N , ^{15}N . Les isotopes lourds (^{15}N et ^{13}C) sont nettement moins abondants dans la nature que les isotopes légers (^{14}N et ^{12}C). Parce que les différents isotopes d'un élément ont des masses différentes (nombre différent de neutrons), ils présentent des propriétés cinétiques et thermodynamiques particulières qui leur confèrent des modes de comportement déterminés et prévisibles au cours des réactions chimiques (Schwarcz, Schoeninger 1991). Ainsi, lors des réactions chimiques, on observe une participation préférentielle d'un des isotopes stables, ce « fractionnement isotopique » conduit à des teneurs de l'isotope étudié différentes entre le produit de la réaction et le substrat de la réaction (Hayes 1982 ; Tieszen *et al.* 1983 ; Kennedy, Krouse 1989 ; Roth, Hobson 2000).

Protocole de mesure

Afin de visualiser les très faibles variations qui s'opèrent lors du fractionnement isotopique, les mesures isotopiques sont exprimées en delta pour mille (δ ‰) et ne sont pas absolues mais correspondent au rapport de l'isotope lourd sur l'isotope léger de l'échantillon sur le même rapport établi pour l'étalon international, selon la notation suivante :

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ échantillon}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ standard}} \right) - 1 \right] \times 1000 \text{ ‰}$$

$$\delta^{15}\text{N} = \left[\left(\frac{^{15}\text{N}/^{14}\text{N} \text{ échantillon}}{^{15}\text{N}/^{14}\text{N} \text{ standard}} \right) - 1 \right] \times 1000 \text{ ‰}$$

Les dosages isotopiques commentés dans cette étude ont été réalisés sur un spectromètre de masse isotopique (VG Optima) couplé à un analyseur élémentaire (Carlo Erba Na1500) (Bocherens *et al.* 1997 ; Macko *et al.* 1997). La combustion de l'échantillon, 1 mg de collagène placé dans une capsule de zinc, est provoquée par un courant d'hélium enrichi en oxygène dans un four à une température de plus de 1000°C. Les gaz CO₂ et N₂ qui se dégagent de la combustion sont séparés par chromatographie, puis les concentrations de C et de N sont déterminées par l'analyseur élémentaire. Les abondances isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$) sont mesurées par le spectromètre de masse isotopique alternativement avec des standards internationaux. L'étalon international utilisé pour le carbone est PDB-1 (rostre calcaire d'une *Belemnitella americana* de la Pee Dee d'une formation crétacée de Caroline du sud). Le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ est de 0,0112372. L'étalon utilisé pour l'azote est l'azote moléculaire atmosphérique (Mariotti 1983) ; le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ est de 0,0036764. La précision analytique est de 0,1 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et de 0,2 ‰ pour le $\delta^{15}\text{N}$ (Bocherens, Fizet, Mariotti, Lange-Badré *et al.* 1991).

Protocole d'extraction du collagène

Un protocole d'extraction du collagène, à base d'acide chlorhydrique et de soude, simple et couramment utilisé, a été retenu. Inspiré du protocole établi par Longin (1971), il suit les modifications³ proposées par Bocherens, Fizet, Mariotti, Lange-Badré *et al.* (1991). Il nécessite une petite quantité, comprise entre 30 mg pour les sujets immatures et 250 mg pour les sujets adultes, de poudre d'os de granulométrie inférieure à 0,7 mm. Le collagène est obtenu après deux étapes de décalcification pour éliminer les ions minéraux, les acides fulviques et humiques⁴ et une étape de solubilisation⁵ et de lyophilisation.

Vérification de l'intégrité du collagène

L'interprétation des signatures isotopiques décelées dans le collagène peut être proposée une fois l'impact de tout facteur taphonomique écarté. Plusieurs indicateurs permettent de vérifier la pureté biochimique du collagène extrait. Le premier est le

-
3. Différents auteurs ont procédé à des améliorations de la méthode de Longin (Brown *et al.* 1988).
 4. Les échantillons sont (1) plongés dans une solution de HCl, 1M, pendant 20 minutes sur agitateur à température ambiante, puis filtrés et (2) plongés dans une solution de NaOH, 0,125 M, à température ambiante pendant 20 heures, puis filtrés.
 5. La solubilisation est réalisée dans une solution de HCl, pH = 2, à 100°C pendant 17 heures.

rendement d'extraction exprimé en mg.g^{-1} . Pour un os moderne, le rendement d'extraction de collagène est d'environ 220 mg.g^{-1} . En dessous de 10 mg.g^{-1} , le rendement de collagène est considéré « faible » (van Klinken 1999) ; de tels échantillons ont été éliminés de notre étude. Le deuxième, utilisé par de nombreux auteurs, est le rapport du carbone sur l'azote (C/N) qui révèle l'intégrité du collagène (DeNiro 1985 ; Schoeninger *et al.* 1989 ; Ambrose 1990 ; Bocherens, Fizet, Mariotti, Olive *et al.* 1991). DeNiro (1985) propose de ne considérer que les valeurs comprises entre 3,6 et 2,9. Cette norme, actuellement en vigueur, a été retenue ici. Par ailleurs, le collagène d'os moderne contient approximativement 49 % de carbone et 15 % d'azote, avec un rapport C/N de 3,2 (Hare, von Endt 1990). Les collagènes présentant des pourcentages nettement inférieurs à 10% d'azote et à 30 % de carbone n'ont pas été retenus dans la discussion.

TRANSFERTS DE L'ISOTOPE STABLE DU CARBONE ET DE L'AZOTE AU SEIN DES CHAÎNES ALIMENTAIRES

Ce sont les plantes, à la base des chaînes alimentaires, qui déterminent les compositions isotopiques en carbone et azote (notées respectivement $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$) des individus des niveaux trophiques suivants. Les différences observées dans les compositions isotopiques en carbone des végétaux résultent du type de photosynthèse utilisé. La majorité des végétaux terrestres (avoine, blé, riz, herbes et arbustes) réduit le carbone atmosphérique en empruntant le cycle de Calvin-Benson ou la photosynthèse en C_3 ; ces végétaux présentent des valeurs isotopiques comprises entre -34 et -22 ‰⁶. En revanche, les végétaux dits de milieux tropicaux (maïs, millet, canne à sucre, sorgho), qui utilisent le cycle de Hatch-Slack ou la photosynthèse en C_4 , présentent des valeurs variant de -19 à -6 ‰ (Smith, Epstein 1971 ; DeNiro, Epstein 1978 ; Deines 1980 ; DeNiro, Hastorf 1985). Des différences sont observées entre les plantes aquatiques marines et terrestres car la source de carbone utilisée en milieu aquatique présente une valeur isotopique de 0,0 ‰ alors que celle du carbone atmosphérique est de -7,0 ‰. Les plantes marines présentent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus positives que les plantes en C_3 , dont les valeurs sont comprises entre -18 et -10 ‰⁷ (Tauber 1981 ; Chisholm *et al.* 1982 ;

-
6. La plupart des valeurs isotopiques en carbone sont négatives car le standard utilisé (formation calcaire PDB) est plus enrichi en ^{13}C que la plupart des matériaux analysés.
 7. Un chevauchement important peut être observé entre les signatures des plantes terrestres et aquatiques (Deines 1980 ; Tauber 1981 ; Schoeninger, Moore 1992). La discrimination entre les consommateurs de ces deux types reste toutefois visible sous réserve que les consommateurs terrestres puisent leurs aliments dans un environnement en C_3 (Tauber 1981 ; Schoeninger *et al.* 1983).

Van der Merwe 1989). Ces différences de composition isotopique en carbone se transmettent le long des chaînes alimentaires avec un enrichissement de 1 ‰ à chaque niveau trophique (Minson *et al.* 1975 ; DeNiro, Epstein 1978 ; Bender *et al.* 1981 ; Tieszen *et al.* 1983 ; Schoeninger, DeNiro 1984) et un enrichissement de 5 ‰ entre la part protéique de l'alimentation et celle du collagène du consommateur⁸ (Teeri, Schoeller 1979 ; Chisholm *et al.* 1982 ; van der Merwe 1982 ; Krueger, Sullivan 1984 ; Ambrose, Norr 1993). L'analyse des compositions isotopiques en carbone permet donc de préciser la nature, à la fois des végétaux consommés, et de l'environnement dans lequel ils ont été puisés (Vogel, van der Merwe 1977 ; Schwarcz *et al.* 1985 ; Sealy, Van der Merwe 1988 ; Larsen *et al.* 1992 ; Katzenberg *et al.* 1995 ; Mays 1997) (fig. 3).

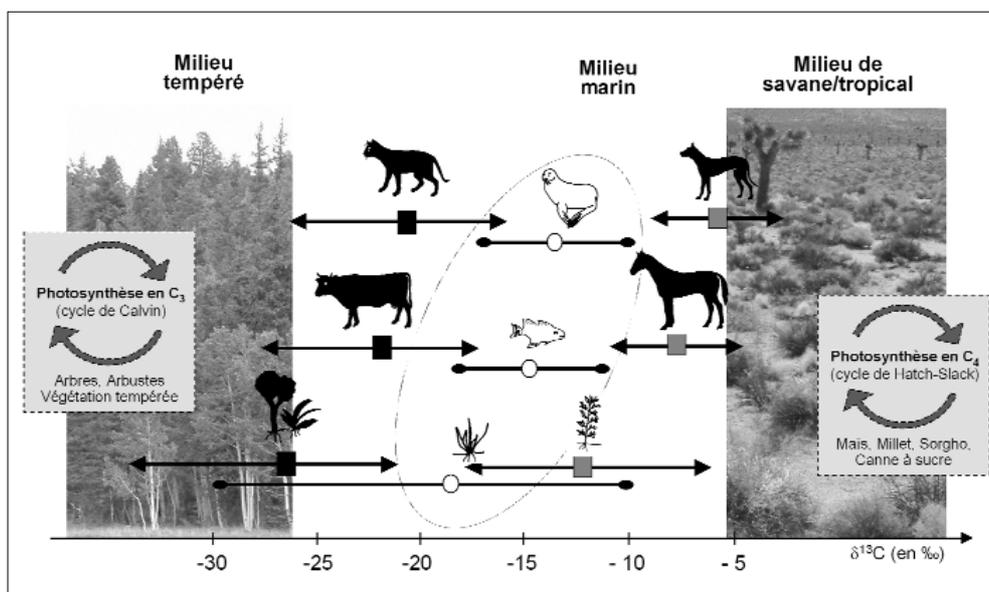


Fig. 3 - Gamme de variation des valeurs de $\delta^{13}C$ pour différents niveaux trophiques de chaînes alimentaires terrestres et aquatiques (DeNiro, Epstein 1978 ; Deines 1980 ; Tauber 1981 ; Schoeninger, DeNiro 1984 ; DeNiro, Hastorf 1985 ; Chisholm 1989).

Fig. 3—Variation range of $\delta^{13}C$ values for different trophic levels of terrestrial and aquatic food chains (DeNiro, Epstein 1978; Deines 1980; Tauber 1981; Schoeninger, DeNiro 1984; DeNiro, Hastorf 1985; Chisholm 1989).

8. Cet enrichissement est appelé, par de nombreux auteurs, le « collagen enrichment factor ». Il concerne uniquement le fractionnement isotopique du carbone.

Les plantes présentent également des compositions isotopiques en azote différentes selon le milieu dans lequel elles se développent (Delwiche, Steyn 1970). Les végétaux fixent l'azote atmosphérique selon deux procédés. Les légumineuses ou « plantes fixatrices d'azote » utilisent directement l'azote atmosphérique grâce à une réaction symbiotique qui se déroule au niveau de leurs racines (Mariotti *et al.* 1980). Ces plantes présentent des valeurs isotopiques en azote proches de 0 ‰, comprises entre -2 et 2 ‰ (Virginia, Delwiche 1982 ; Hastorf, DeNiro 1985). En revanche, les « plantes non-fixatrices d'azote » utilisent une forme dérivée de l'azote atmosphérique produite par les bactéries du sol (par exemple : les nitrates) ; leurs compositions isotopiques sont comprises entre 0 et 6 ‰ avec une moyenne de l'ordre de 3 ‰ (Virginia, Delwiche 1982 ; Hastorf, DeNiro 1985). Les compositions isotopiques des nitrates en milieu aquatique sont plus élevées qu'en milieu terrestre, les plantes marines présentent donc des valeurs plus élevées, proches de 7 ‰⁹ (DeNiro 1987 ; Heaton 1987). Ces différences, en se répercutant dans les niveaux trophiques supérieurs, confèrent aux « mangeurs de plantes terrestres » des valeurs isotopiques plus faibles que celles des « mangeurs de plantes aquatiques » (Mariotti *et al.* 1980 ; Peterson, Fry 1987 ; Katzenberg 1989). Par ailleurs, un enrichissement systématique d'environ 3 ‰ en azote-15 est enregistré entre la proie et son prédateur¹⁰ (DeNiro, Epstein 1981 ; Minagawa, Wada 1984 ; Schoeninger, DeNiro 1984). Ainsi, plus les chaînes alimentaires sont longues, plus l'individu qui se trouve en fin de chaîne présente des valeurs isotopiques en azote élevées. En milieu terrestre, les compositions isotopiques des herbivores sont comprises entre 2 et 7 ‰ et celles des carnivores entre 7 et 12 ‰. En milieu marin, les compositions isotopiques des vertébrés sont comprises entre 12 et 22 ‰ (DeNiro, Epstein 1981 ; Schoeninger, DeNiro 1984) (*fig. 4*). Toutefois, en cas d'environnement particulier (côtier, aride, sous-bois), les plantes peuvent présenter des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ très différentes de celles attendues, différences qui vont se répercuter le long de la chaîne alimentaire, affectant l'ensemble des différents consommateurs (Ambrose, DeNiro 1986 ; Heaton 1987 ; Sealy *et al.* 1987 ; Rodière *et al.* 1996). C'est pourquoi ces valeurs ne constituent pas des références absolues. Par exemple, les plantes côtières et d'environnement salin peuvent présenter des valeurs plus élevées que les mêmes plantes vivant dans un environnement différent (Virginia, Delwiche 1982 ; Heaton 1987). De même, des espèces animales soumises à des conditions environnementales drastiques, comme la sécheresse, peuvent présenter des valeurs plus

9. Même si les moyennes des signatures isotopiques des plantes terrestres et aquatiques présentent une différence de l'ordre de 4 ‰, un chevauchement des intervalles de variation est observé (Heaton 1987 ; DeNiro 1987).

10. Des amplitudes plus importantes ont été mises en évidence dans différents écosystèmes (voir la revue *in* Bocherens, Drucker 2003).

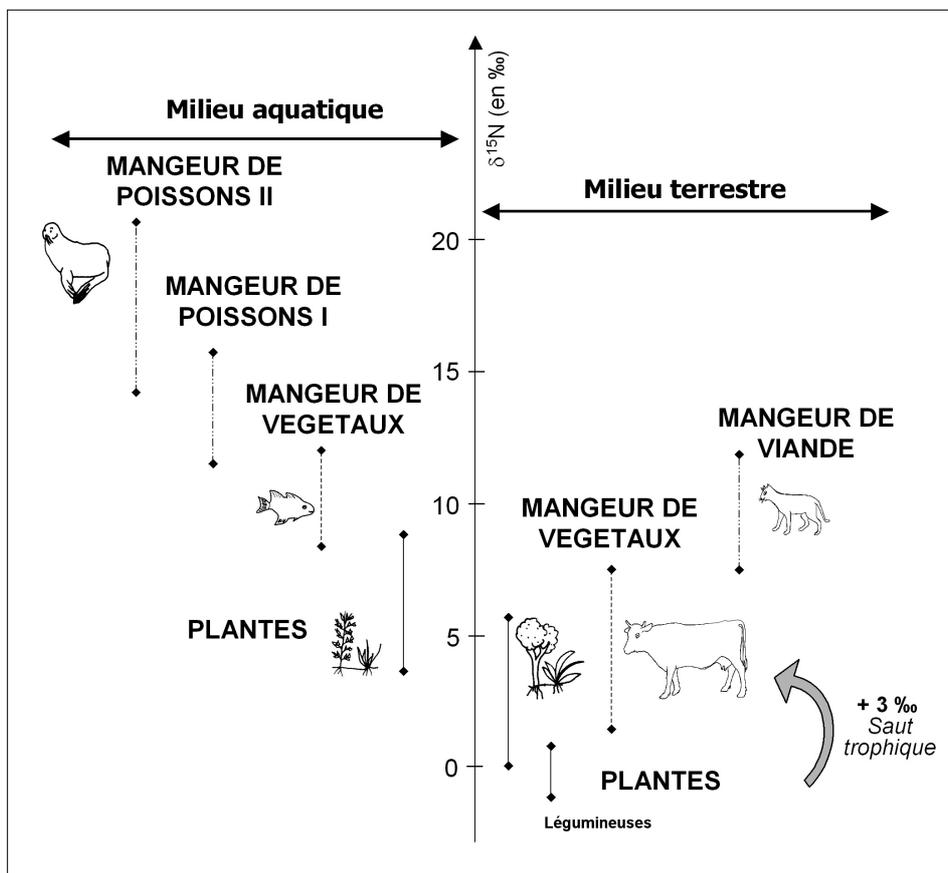


Fig. 4 - Gamme de variation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ pour différents niveaux trophiques de chaînes alimentaires terrestres et aquatiques (DeNiro, Epstein 1981 ; Schoeninger et al. 1983 ; Minagawa, Wada 1984 ; Schoeninger, DeNiro 1984 ; DeNiro, Hastorf 1985).

Fig. 4—Variation range of $\delta^{15}\text{N}$ values for different trophic levels of terrestrial and aquatic food chains (DeNiro, Epstein 1981; Schoeninger et al. 1983; Minagawa, Wada 1984; Schoeninger, DeNiro 1984; DeNiro, Hastorf 1985).

élevées en azote-15 que les mêmes espèces vivant en milieu tempéré (Schoeninger, DeNiro 1984 ; Sealy *et al.* 1987 ; Ambrose 1991). L'analyse des compositions isotopiques en azote permet donc de cerner la nature des végétaux et le milieu dans lequel ces derniers ont poussé. Elle permet également d'estimer la quantité de protéines animales consommée et, par conséquent, de distinguer les espèces végétariennes des espèces plus carnivores, voire des espèces piscivores (Schwarcz *et al.* 1985 ; Ezzo 1992 ; Bocherens *et al.* 1997, 1999 ; Schutkowski *et al.* 1999 ; Larsen *et al.* 2001 ; Polet, Katzenberg 2003).

L'analyse des signatures isotopiques de l'azote et du carbone présente un intérêt particulier pour la reconstitution des différents niveaux trophiques d'une chaîne alimentaire. Toutefois, les interprétations sont d'autant plus pertinentes qu'un maximum d'espèces participant à cette chaîne alimentaire est considéré. C'est pourquoi des espèces animales mises au jour dans les tombes de Saint-Laurent ont été intégrées à l'étude. Le but est de vérifier si les signatures isotopiques rendent compte, d'une part d'une unité géographique signifiant qu'animaux et humains ont vécu dans le même environnement et, d'autre part, d'une relation trophique impliquant la consommation de ces animaux.

UN SAUT TROPHIQUE PARTICULIER : LE CAS DU SEVRAGE

Le sevrage est une modification du régime alimentaire correspondant au passage progressif d'une alimentation lactée maternelle vers une alimentation supposée identique à celle des adultes (Dettwyler, Fishman 1992 ; Stuart-Macadam, Dettwyler 1995 ; Herring *et al.* 1998). Il ne s'agit pas d'un événement instantané mais d'une période caractérisée par l'âge auquel elle débute et par sa durée. Toutefois, l'« âge au sevrage », expression couramment utilisée, correspond généralement à l'âge à partir duquel l'enfant est sevré (Dettwyler, Fishman 1992 ; Herring *et al.* 1998). Le mot « sevrage », dans cette expression, marque donc un événement particulier : l'arrêt de la consommation de lait maternel. La difficulté qu'il y a à apprécier les données issues de la littérature repose, bien souvent, sur le fait que ce mot présente plusieurs définitions. Dans cette étude, le sevrage a été considéré comme un processus ayant une durée, et non comme un événement. Dans un tel contexte, l'expression « âge au sevrage » correspond à l'âge à partir duquel le lait maternel ne constitue plus la part prépondérante de l'alimentation du jeune enfant. Compte tenu des prédispositions biologiques de notre espèce et des travaux réalisés chez les primates, le sevrage pourrait se poursuivre jusqu'à l'âge de 7 ans. Un cas exceptionnel de prise de nourriture maternelle a même été rapporté chez un adolescent de 15 ans (Dettwyler 1995). Le sevrage se déroule entre 2 et 4 ans dans de nombreuses sociétés traditionnelles. Avant l'utilisation répandue des laits de substitution, les enfants étaient globalement sevrés entre 3 et 4 ans (Dettwyler 1995 ; Fildes 1995).

D'un point de vue trophique, une mère allaitante correspond à un « producteur » et le lait maternel à la « proie » ingérée par le jeune enfant ou « consommateur ». Cette période de la vie de l'enfant peut être étudiée grâce à plusieurs éléments chimiques. Ceux-ci peuvent être sensibles au passage de l'alimentation lactée à celle de sevrage comme les éléments traces, c'est le cas du rapport strontium/calcium (Sillen, Smith 1984) ou des isotopes stables de l'oxygène et du carbone (Katzenberg *et al.* 1993 ;

Wright, Schwarcz 1998, 1999 ; Dupras *et al.* 2001), ou être sensibles à la diminution de la nourriture maternelle comme l'isotope stable de l'azote (Fogel *et al.* 1989 ; Katzenberg *et al.* 1993 ; Dupras *et al.* 2001). Ce dernier est le marqueur le plus utilisé dans les études sur l'homme. Durant la période d'allaitement, l'enfant devrait disposer de lait maternel enrichi en azote-15 de 2 à 3 ‰ comparativement à l'alimentation de la mère (Steele, Daniel 1978 ; Minagawa, Wada 1984). Étant dans le cas d'un saut trophique, un enrichissement d'environ 3 ‰ en azote-15 est donc attendu entre le collagène de la mère et celui de l'enfant (Minagawa, Wada 1984 ; Schoeninger, DeNiro 1984). En 1989, Fogel *et al.* testent cette hypothèse à partir d'analyses réalisées sur les ongles de 16 couples « mère-enfant » actuels et montrent un enrichissement moyen en azote-15 de 2,4 ‰ chez les enfants, à partir de l'âge de 3 mois (Fogel *et al.* 1989). Chez l'homme, à la naissance, tous les tissus ont la même signature isotopique en azote, celle de la mère. Au cours de l'allaitement, le collagène osseux prénatal va progressivement être remplacé par du collagène osseux synthétisé à partir de l'alimentation lactée maternelle ; puis, durant le sevrage, le « collagène-lacté » va progressivement être remplacé par le collagène synthétisé à partir des nouveaux aliments ingérés. La composition isotopique en azote, au cours des périodes d'allaitement et de sevrage, suit une courbe en cloche dont le sommet marquerait le début de la diminution d'une alimentation exclusivement maternelle (*fig. 5*). L'âge, ainsi donné par le sommet de

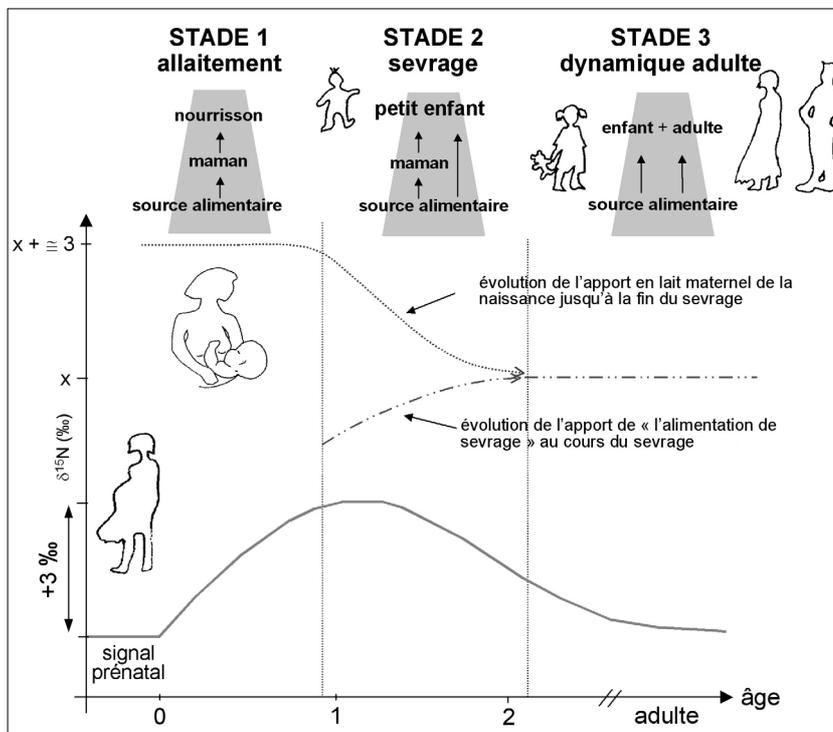


Fig. 5 - Évolution de la composition en azote-15 dans le collagène osseux, au cours des phénomènes d'allaitement et de sevrage (courbe en tracé plein).

Fig. 5—Changes in the composition of nitrogen-15 in bone collagen during breastfeeding and weaning (full curve).

la courbe assorti de la fourchette d'âge au décès estimé, permet d'apprécier l'âge des enfants au début du sevrage. De nombreuses études ont suivi cette démarche analogique pour obtenir un âge au sevrage (*tabl. I*). Toutefois ces analyses, de nature transversale, ont leurs limites.

Références	Datation	$\Delta^{15}\text{N}^*$	Âge au sevrage
AMÉRIQUE DU NORD			
Fogel <i>et al.</i> 1989			
Tennessee Valley Site (Tennessee, USA)	5500-2000 BC	4,0 ‰	entre 18 et 20 mois
Sully (South Dakota, USA)	1650-1700 AD	2,5 ‰	entre 18 et 20 mois
Katzenberg <i>et al.</i> 1993 ; Katzenberg 1993			
MacPherson (Ontario, Canada)	1530-1580 AD	3,0 ‰	entre 8 et 12 mois
Katzenberg 1993 ; Katzenberg et Pfeiffer 1995 ; Katzenberg <i>et al.</i> 1996			
Prospect Hill (Ontario, Canada)	1824-1879 AD	1,7 ‰	avant 2 ans
Herring <i>et al.</i> 1998			
St-Thomas (Ontario, Canada)	1821-1874 AD	1,7 ‰	avant 14 mois
Schurr 1997, 1998			
Angel (Ohio Valley, USA)	1300-1450 AD	1,8 ‰	avant 2 ans
AFRIQUE			
Dupras <i>et al.</i> 2001			
Dakhleh Oasis (Égypte)	ca 250 AD	3,0 ‰	entre 6 mois et 3 ans
EUROPE			
Richards <i>et al.</i> 2002			
Wharram Percy (Angleterre)	X ^e -XVI ^e s.	2,5 ‰	avant 2 ans

* $\Delta^{15}\text{N}$ = enrichissement moyen en ^{15}N entre adultes et immatures.

Tabl. I - Âge au sevrage estimé d'après l'analyse des compositions isotopiques en azote dans 8 populations historiques.

Table I—Age at weaning estimated from the analysis of nitrogen isotopic compositions in 8 historical populations.

Limites de l'analyse transversale du sevrage

Conclure sur le statut de chaque enfant par rapport au sevrage n'apparaît pas si évident à plusieurs titres :

– dans le cas d'un enfant présentant une valeur proche du sommet de la courbe en cloche, il est difficile de savoir s'il se trouve en amont ou en aval du « pic de $\delta^{15}\text{N}$ observé » signifiant qu'il est en cours d'allaitement ou bien que son sevrage a commencé ;

– la variabilité isotopique inter-individuelle observée au sein de la population adulte peut parfois recouvrir largement celle des enfants (*tabl. II*). Même si l'amplitude du « pic de $\delta^{15}\text{N}$ » reste visible malgré ce chevauchement, les conclusions peuvent parfois être erronées. Herring *et al.* (1998) écrivent, au sujet de 6 enfants en âge d'être allaités et présentant des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ plus faibles que l'ensemble des autres enfants

de ce groupe d'âge : « *This suggests that they were not breast-fed or stopped nursing earlier than the majority of individuals examined here* ». Une autre hypothèse, selon laquelle ils pourraient être allaités mais présenter des valeurs faibles en raison des faibles signatures prénatales héritées de leur mère, pourrait être proposée. Les données adultes n'étant pas disponibles, aucune conclusion ne peut être valablement avancée dans cet exemple.

C'est notamment pour pallier ces difficultés que Balasse *et al.* (1997) ont mis au point un protocole d'échantillonnage spécifique. Ce dernier utilise la variabilité isotopique intra-individuelle afin d'obtenir, pour chaque individu, une séquence chronologique alimentaire de deux valeurs issues d'un double échantillonnage (Balasse *et al.* 1997, 1999 ; Balasse 1999).

Références	Datation	Adultes			Immatures (0 à 2,5 ans)		
		Maximum	Minimum	Δ	Maximum	Minimum	Δ
Katzenberg 1993							
MacPherson	1580 AD	14,7	10,5	4,2	15,0	12	3,0
Harvie	1825-1894 AD	12,7	11,7	1,0	14,1	11,5	2,6
Prospect Hill	1824-1879 AD	13,8	12,1	1,7	14,6	11,0	3,6
Fogel <i>et al.</i> 1989							
Population actuelle	-	11,9	9	2,9	13,5	9,8	3,7
Sully	1650-1700 AD	11,9	10,5	1,4	14	9,9	4,1
Schurr 1997							
Angel	1300-1450 AD	8,3 (moyenne)			11,3	6,7	4,6
Herring <i>et al.</i> 1998							
St Thomas	1821-1874 AD	-	-	-	14,2	9,3	4,9
Dupras <i>et al.</i> 2001							
Dakhleh Oasis*	ca 250 AD	20,5	14,2	6,3	23,2	18	5,2
Richards <i>et al.</i> 2002							
Wharram Percy*	x ^e -xvi ^e s.	10,9	6,0	4,9	13,1	7,0	6,1

*valeurs extrapolées à partir des graphes.

Tabl. II - Variations inter-individuelles des compositions isotopiques en azote entre adultes et immatures, dans 9 populations actuelles et historiques.

Table II—Inter-individual variations of nitrogen isotopic compositions between adults and sub-adults, in 9 present and historical populations.

La stratégie du double échantillonnage

Ericson, en 1985, est le premier à montrer l'intérêt d'analyser des tissus de nature différente pour préciser la mobilité de groupes humains. Sur la base du principe « ... *the human body produces a variety of biogeochemical records during the lifetime of an individual* », l'analyse des isotopes du strontium d'une deuxième molaire et d'un fragment d'os a permis à l'auteur de discuter les déplacements impliqués lors des mariages chez trois indiens Chumash de la côte de l'Océan Pacifique (Ericson 1985). À

cette même époque, au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique de l'Université Paris VI, la stratégie de double échantillonnage se développe. Bocherens *et al.* montrent des différences entre les $\delta^{15}\text{N}$ d'os et de dents d'ours des cavernes (Bocherens *et al.* 1990), différences auxquelles les auteurs n'accordent pas d'importance (*tabl. III*). Toutefois, grâce à l'avancée des recherches, ils établissent que ces différences isotopiques, enregistrées pour différentes espèces animales, correspondent, en réalité, à la mémorisation du signal lacté au niveau des tissus dentaires formés le plus précocement dans la vie de l'individu ¹¹ (Bocherens 1992 ; Fizet 1992 ; Bocherens *et al.* 1994 ; Bocherens, Mariotti 1997). Parallèlement, Fizet (1992) prouve qu'au niveau d'un même os, sur un même individu, selon la zone de prélèvement analysée, des variations en azote-15 peuvent s'enregistrer ; ces variations résulteraient « de la persistance de l'empreinte du régime alimentaire antérieur au sevrage, soit un signal lacté » dans la partie de l'os où le renouvellement est le plus lent. C'est notamment sur la base de ces résultats que les recherches entreprises au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique, ont été poursuivies avec les travaux de Rodière (1995) et de Balasse (Balasse *et al.* 1997, 1999) qui présentent la particularité d'être conduits sur des individus dont l'histoire alimentaire est connue.

Références	Espèces	$\delta^{15}\text{N}$ -dent	$\delta^{15}\text{N}$ -os	Conclusions
Bocherens <i>et al.</i> 1990	Ours*	5 ‰	2,4 ‰	?
Bocherens 1992	Ours*	6,2 ‰ (Aldène)	3,1 ‰	Mémorisation
Bocherens <i>et al.</i> 1994	Ours*	7,7 ‰ (Mialet)	2,8 ‰	du signal lacté
Fizet 1992	Renne*	$\Delta = 1,9 \text{ ‰}$ $\Delta = 4,2 \text{ ‰}$	$\Delta i = 1,9 \text{ ‰}$ $\Delta i = 1,1 \text{ ‰}$	Mémorisation
	Cheval*			du signal lacté
	Cheval*			Variations intra-individuelles
	Humain			
Bocherens <i>et al.</i> 1995	Chevreuil*	$\Delta i = 1,5 \text{ ‰}$		Mémorisation
	Hyène*	$\Delta i = 0,8 \text{ ‰}$		du signal lacté
Rodière 1995	Chevreuil	$\Delta i = 1,2 \text{ ‰}$		Essai de validation des variations intra-individuelles
Bocherens, Mariotti 1997	Chevreuil	$\Delta i = 1,4 \text{ ‰}$		
Balasse <i>et al.</i> 1999	Bovidés	$\Delta i = 1,1 \text{ ‰}$	$\Delta i = 0,5 \text{ ‰}$	Validation des variations intra-individuelles
Balasse 1999				

(* = espèces fossiles, Δ = Variations inter-individuelles des $\delta^{15}\text{N}$, Δi = Variations intra-individuelles des $\delta^{15}\text{N}$).

Tabl. III - Travaux à l'origine de la stratégie du double échantillonnage initiée au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique de l'Université Paris VI.

Table III—Work at the origin of the strategy of double sampling initiated at the Laboratoire de Biogéochimie Isotopique de l'Université Paris VI.

11. Ces résultats importants avaient été formulés dans le but de saisir la communauté scientifique des erreurs qui pouvaient être introduites lors de l'interprétation de données isotopiques provenant de tissus animaux de nature différente.

Depuis les années 1990, des stratégies similaires, doubles ou multiples, sont utilisées chez les populations humaines. Les travaux s'attachent à des problématiques variées : migrations, saisonnalité d'un événement comme la mort, ou modifications alimentaires au cours de la vie (Sealy *et al.* 1993, 1995 ; White 1993 ; Price, Grupe *et al.* 1994 ; Price, Johnson *et al.* 1994 ; White, Schwarcz 1994 ; Grupe *et al.* 1997 ; Bell *et al.* 2001). Le sevrage, qui n'est qu'un cas particulier de modification, a fait l'objet de travaux portant sur un échantillonnage entre différentes dents (Wright, Schwarcz 1998, 1999) et entre os et dents (Richards *et al.* 2002) (*tabl. IV*). Les populations animales sont impliquées plus fréquemment dans les études de stratégie d'échantillonnage « multiple » (Koch *et al.* 1989 ; Bryant *et al.* 1996 ; Fricke, O'Neil 1996 ; Balasse *et al.* 1997, 1999, 2001, 2002, 2003 ; Stuart-Williams, Schwarcz 1997 ; Hobson, Sease 1998 ; Balasse 1999 ; Weidemann *et al.* 1999 ; Balasse, Tresset 2002) (*tabl. IV*). Ces dernières abordent des thèmes tels que les modifications climatiques, les migrations de populations ou la saison des naissances d'une espèce et présentent une large variété de stratégies. La plus récente repose sur la notion de variabilité intra-individuelle à l'échelle de la dent (Balasse 1999, 2002, 2003 ; Weidemann *et al.* 1999 ; Balasse *et al.* 2001, 2002, 2003). Enfin, la nouvelle technique, proposée par Bell *et al.* (2001) pour apprécier les

Références	Objectifs	Tissus	Éléments
HUMAINS			
Ericson 1985	Résidence et mariage	os/dent	⁸⁷ Sr
Sealy <i>et al.</i> 1993, 1995	Mobilité et alimentation	os/dent	¹³ C, ¹⁸ O, ¹⁵ N et ⁸⁷ Sr
Price <i>et al.</i> 1994a, b Grupe <i>et al.</i> 1997	Migration	os/dent	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
White 1993 ; White <i>et al.</i> 1994	Migration et saisonnalité	os/cheveux	¹³ C et ¹⁵ N
Wright, Schwarcz 1998, 1999	Sevrage	inter-dent	¹³ C, ¹⁸ O, ¹³ C et ¹⁵ N
Bell <i>et al.</i> 2001	Migration/Méthodologie	intra-os	¹³ C
Richards <i>et al.</i> 2002	Sevrage	os/dent	¹³ C et ¹⁵ N
ANIMAUX			
Koch <i>et al.</i> 1989	Saisonnalité	intra-dent	¹⁸ O
Hobson, Sease 1998	Sevrage	intra-dent	¹⁵ N
Bryant <i>et al.</i> 1996	Climat	intra-dent	¹⁸ O
Fricke, O'Neil 1996	Climat	inter- et intra-dent	¹⁸ O _p
Stuart-Williams, Schwarcz 1997	Climat	os/dent	¹⁸ O
Weidemann <i>et al.</i> 1999	Saisonnalité et climat	intra-dent	¹³ C et ¹⁸ O
Balasse <i>et al.</i> 1997, 1999, 2001	Sevrage/Production laitière	os/dent	¹³ C, ¹⁸ O, ¹³ C et ¹⁵ N
Balasse 1999		intra-os	
Balasse, Tresset 2002		intra-dent	
Balasse <i>et al.</i> 2002	Mobilité et saisonnalité	intra-dent	¹³ C, ¹⁸ O et ⁸⁷ Sr
Balasse <i>et al.</i> 2003	Saisonnalité	intra-dent	¹⁸ O

Tabl. IV - Études isotopiques reposant sur le prélèvement de plusieurs tissus d'un même individu.

Table IV—Isotopic studies based on the sampling of several tissues from the same individual.

modifications alimentaires au cours de la vie, repose sur le fractionnement par densité osseuse. Les fractions osseuses les plus denses correspondraient aux moments les plus anciens de la vie contrairement aux fractions les plus légères qui révéleraient les derniers moments de la vie. Cette approche a été appliquée à des sujets humains sud-africains dont les données sur la variabilité inter-tissus étaient déjà disponibles (Sealy *et al.* 1995).

Les travaux de Balasse *et al.* (1997) et Balasse (1999) constituent une référence puisqu'ils sont seuls à présenter une validation d'un modèle théorique sur l'évolution des compositions isotopiques au moment du sevrage, impliquant trois prélèvements osseux et dentaires. Le renouvellement du collagène se fait au rythme de la croissance et du remaniement des tissus osseux, or celui-ci « n'affecte pas au même moment les différentes parties du squelette, ni les différentes régions d'un même os » (Balasse *et al.* 1997). Ainsi, lors d'un changement de régime alimentaire, le matériel synthétisé dans une zone présumée à renouvellement rapide intégrera plus vite le nouveau signal qu'une zone où le renouvellement est plus lent. C'est la différence des compositions isotopiques entre ces deux zones qui permet, « non seulement de mettre en évidence ce changement récent, mais également de déterminer le sens du changement de régime d'un pôle alimentaire à l'autre » (Balasse *et al.* 1997 ; Balasse 1999).

Protocole spécifique élaboré pour la population de Saint-Laurent : stratégie de triple échantillonnage

Suivant cette même logique et pour affiner les résultats concernant l'alimentation durant les premières années de la vie dans les populations du passé, une stratégie de triple échantillonnage a été élaborée, conduisant à une séquence chronologique qui représente trois moments de la vie de l'individu (Herrscher 2001). Les prélèvements sont réalisés sur la mandibule, en deux endroits distincts, et à l'apex d'une racine dentaire en cours de formation (*fig. 6*). La notation adoptée est la suivante :

- rF : prélèvement au niveau d'une racine dont la croissance n'est pas achevée. Le degré de calcification des dents sur lesquelles les prélèvements ont été réalisés est compris entre les stades $R_{1/4}$ et R_c définis par Moorrees *et al.* (1963) ;
- osR : prélèvement au niveau d'une zone osseuse entourant un germe dentaire ;
- osN : prélèvement au niveau du rebord alvéolaire entourant des dents déjà sur arcade.

Pour ces trois tissus, le modèle théorique d'évolution des signatures isotopiques de l'azote au cours des processus d'allaitement et de sevrage est illustré par la *figure 7*. Au niveau d'un tissu en formation (rF) n'ayant pas de signal prénatal, on observera l'enregistrement le plus fidèle des modifications alimentaires. En revanche, la cinétique

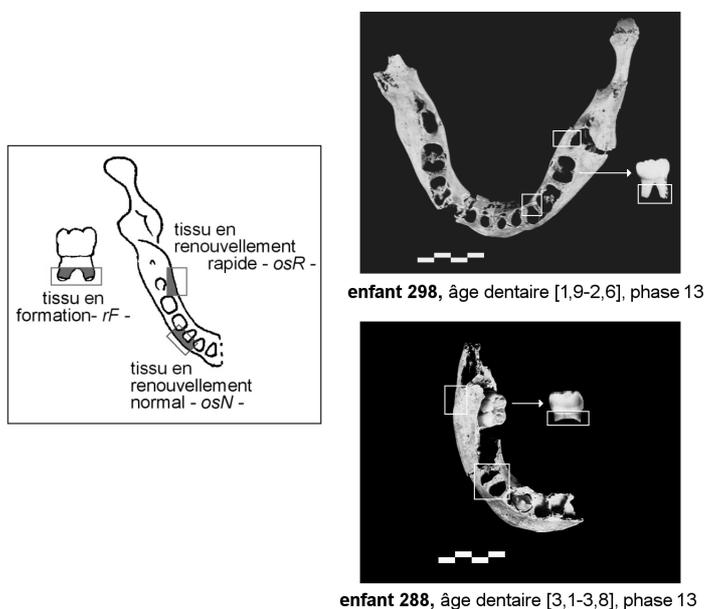


Fig. 6 - Procédure d'échantillonnage des trois tissus squelettiques. Cas des individus 288 et 298 de Saint-Laurent.

Fig. 6—Sampling procedure for the three skeletal tissues. Examples of individuals 288 and 298 at Saint-Laurent.

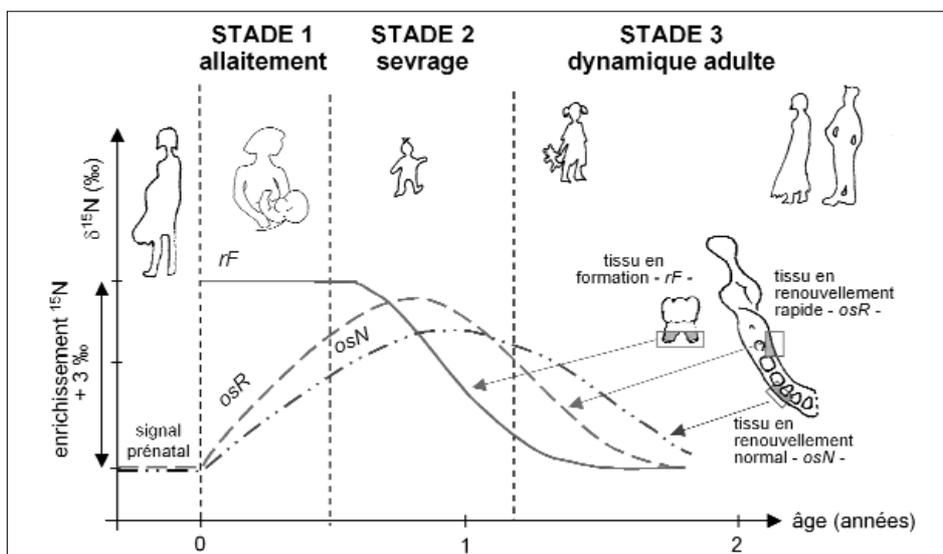


Fig. 7 - Modèle de l'évolution des compositions en azote-15 des trois tissus squelettiques au cours des phénomènes d'allaitement et de sevrage.

Fig. 7—Model of changes in composition of nitrogen-15 in the three skeletal tissues during breastfeeding and weaning.

du renouvellement du tissu osseux étant plus rapide dans le tissu entourant un germe dentaire (osR) qu'au niveau du rebord alvéolaire, le signal d'un nouveau régime alimentaire apparaîtra plus rapidement sur le germe dentaire. Dans les tissus du rebord alvéolaire proche des dents sur arcade (osN), l'intégration normale du signal conduira à une « conservation en mémoire » de l'ancien signal. Chez l'adulte, l'application de cette stratégie ne présente *a priori* aucun intérêt. Dans le cas d'un développement normal, la croissance des dents est achevée, l'apex des racines est fermé et les dents sont sur l'arcade. Une telle stratégie appliquée à l'adulte devrait donner des signatures identiques pour les deux prélèvements osseux (os au niveau de la racine de la troisième molaire et os proche des dents antérieures). Les prélèvements de racines de troisième molaire devraient révéler la proportion de protéines animales ingérée au moment de la fermeture de l'apex. Quatre sujets adultes ont été intégrés à l'étude intra-individuelle dans le but de vérifier le modèle proposé.

Ce modèle repose sur quatre postulats :

- chez l'homme, à la naissance, tous les tissus ont la même signature isotopique en azote, celle de la mère (Fogel *et al.* 1989) ;
- l'introduction d'une alimentation lactée maternelle provoque un enrichissement en ^{15}N dans les tissus synthétisés sur ce nouveau régime alimentaire (Fogel *et al.* 1989 ; Katzenberg 1993) ;
- l'incorporation du nouveau signal alimentaire dans le collagène suit la cinétique du renouvellement de chaque tissu osseux ou dentaire (Tieszen *et al.* 1983 ; Hobson, Clark 1992 ; Balasse *et al.* 1997, 1999) ;
- les aliments de sevrage sont puisés dans le même environnement et globalement dans les mêmes niveaux trophiques que les alimentations adultes ; leur composition isotopique est considérée comme identique à celle des adultes.

L'utilisation de substituts du lait maternel influence ce modèle. Les principaux produits de remplacement employés dans le passé sont les laits animaux et le lait d'une nourrice. Le fait de boire uniquement du lait de vache, par exemple, conduit à un signal alimentaire de type carnivore. Le lait de vache induirait donc des compositions isotopiques similaires à celles de l'alimentation consommée par la mère, c'est-à-dire proches du signal prénatal. Le collagène synthétisé sur un régime à base de lait de vache devrait, par conséquent, présenter des teneurs isotopiques en azote identiques à celles du signal prénatal et conduire à des déviations de $\delta^{15}\text{N}$ nulles ou, du moins, non significatives. La mise en nourrice de l'enfant dès la naissance va conduire, quant à elle, à deux cas de figure. Dans le premier, la nourrice présente une signature isotopique identique ou supérieure à celle de la mère et l'évolution des compositions isotopiques des tissus suivra une dynamique similaire à celle de la mère biologique. Dans le second, la nourrice présente une signature inférieure à celle de la mère biologique. Dans ce cas,

plus la nourrice est appauvrie en ^{15}N (par rapport à la mère biologique), plus les teneurs isotopiques des tissus nouvellement formés seront proches de celles du signal prénatal ; les déviations de $\delta^{15}\text{N}$ seront alors proches de 0.

ASPECTS MATÉRIELS

CONTEXTE HISTORIQUE

Contexte historique général

Le Moyen Âge (v^e-xv^e s.) est une période importante de l'histoire de l'Europe. C'est, en effet, à cette époque que se constituent les principaux fondements des sociétés européennes contemporaines. D'un point de vue politique, la première moitié du Moyen Âge, ou haut Moyen Âge, est marquée par la concurrence qui oppose plusieurs civilisations issues de l'Antiquité gréco-romaine et des peuples du Nord comprenant les Celtes et les Germains (Genet 1991 ; Demurger 1995). La seconde partie du Moyen Âge, ou bas Moyen Âge, à partir de 1250, voit de faibles modifications du territoire européen ; son découpage géo-politique est sensiblement identique à celui établi lors du traité de Verdun (en l'an 843). Le fait le plus marquant est la guerre de Cent Ans, de 1340 aux environs de 1450, qui résulte du tiraillement entre l'Angleterre et l'Empire.

D'un point de vue économique, la ville, jusqu'au viii^e-ix^e s., reste très « rurale ». Les champs, les potagers, les prés, les bois pénètrent dans les cités selon une logique de consommation directe. Dans son ensemble, la société du haut Moyen Âge suit cette règle. Trois grandes innovations, visant au développement de l'agriculture et à l'amélioration de ses modes de production/consommation, caractérisent le haut Moyen Âge occidental. Il s'agit de la mise en culture intensive, des progrès technologiques de l'outillage agricole et du développement de nouveaux axes commerciaux facilitant le transport des denrées alimentaires (Delort 1982 ; Duby 1991 ; Demurger 1995). Ainsi, au cours des x^e et xi^e s., l'économie de subsistance traditionnelle se transforme en une économie de marché entraînant une modification des modes de production (Flandrin, Montanari 1996 ; Montanari 1996 ; Riera-Melis 1996). Ce modèle économique induit une augmentation de la production agricole assurant une quantité suffisante d'aliments disponibles. À la fin du haut Moyen Âge, 90 % de la population vivent de l'agriculture : l'agriculture de subsistance est née. Conjointement, l'Occident médiéval connaît une expansion démographique importante, d'environ 35 % entre 1100 et 1300, associée à un réchauffement général ou « petit optimum climatique » qui débute vers le x^e s. et se

poursuivit jusqu'au XII^e s. (Le Roy-Ladurie 1983 ; Jones 1990 ; Demurger 1995). Toutefois, dès le XIII^e s., retentissent les méfaits de la coexistence entre l'économie de marché et l'accroissement de la population, provoquant une rupture de l'équilibre du couple « population-production ». Les premiers indices d'une crise sont présents. La production céréalière continue de croître mais moins rapidement que la population et au détriment de l'élevage (Demurger 1995). Les systèmes de production deviennent insuffisants pour satisfaire les besoins de l'ensemble de la population. À cette même époque, un incident climatique violent, encore appelé la « poussée glaciaire du XIII^e s. », retentit, suivi de nombreuses périodes d'instabilité climatique entre les XIV^e et XV^e s. (Le Roy-Ladurie 1983 ; Jones 1990). Ces événements coïncident avec la fin de l'essor agraire, la diminution de la productivité agricole, l'apparition de périodes d'instabilité politique et économique et l'expansion, dès 1270, de famines et d'épidémies (Debié 1995 ; Dupâquier 1995). Ces faits sont à l'origine d'une différenciation des régimes alimentaires, selon les classes sociales, et entre ruraux et citadins. Contrairement à ce qui se passe dans les villes, protégées par une politique d'approvisionnement, les restrictions, affectant autant l'exploitation des terres incultes que les droits de chasse et de pâturage, ont pour conséquence de réduire la quantité de viande des tables de la campagne sur lesquelles une alimentation exclusivement à base de céréales et de légumes secs ou verts la remplace (Flandrin, Montanari 1996). Ainsi, les populations du bas Moyen Âge, à l'instar de celles ayant vécu à Grenoble aux XIII^e, XIV^e et XV^e s., ont dû faire face à un contexte particulier caractérisé par des périodes d'instabilité politique, économique et climatique, et trouver un nouvel ajustement entre modes de consommation et systèmes de production (Montanari 1996 ; Riera-Melis 1996).

Contexte historique grenoblois

Grenoble, ville des Alpes du Nord, occupe un site à la confluence des vallées du Drac et de l'Isère, dans un environnement de moyenne montagne entre les massifs du Vercors à l'ouest, de la Chartreuse au nord et de Belledonne au sud-est (*fig. 8*). L'agglomération s'est installée sur une légère éminence, protégée des crues des cours d'eau, proche d'un gué qui, plus tard, sera remplacé par un pont. Au Moyen Âge, l'importance commerciale de Grenoble est faible. L'artisanat, les foires achalandées et l'industrie sont peu développés (Dreyfus 1961). Le faubourg Saint-Laurent, où se développe la nécropole étudiée, comprend principalement des artisans et des petits commerces plaçant ainsi ses habitants dans un contexte suburbain.

À partir du XII^e s., la ville de Grenoble et l'ensemble de la région dauphinoise sont ballottés entre une autorité laïque et une autorité ecclésiastique. Durant cette période, Grenoble est le théâtre de nombreux conflits politiques et sociaux et subit des pertes

humaines importantes, en 1374, suite à l'assaut des Grandes Compagnies ¹². Charles VII monte sur le trône et réunit enfin le Dauphiné au Royaume de France en 1461. Ainsi, le Dauphiné, comme les autres régions du Royaume de France, se trouve sous une seule et même autorité, celle du Roi, mettant fin à une longue période d'instabilité politique et libérant le territoire national de la présence des Anglais.

Douze ans avant la peste noire de 1348, l'ensemble des pays alpins et subalpins affichent des densités de population élevées voire très élevées, surtout dans les vallées. Les Alpes constituent « une chaîne profondément humanisée où nombre de terroirs devaient être surchargés » (Dupâquier 1995). Puis, entre 1339 et 1474, le Dauphiné aurait perdu 60 % de sa population (Demurger 1995). Et Joanne (1870) nous apprend que « la ville de Grenoble n'est pas épargnée » par la peste, en particulier la première vague de 1348.

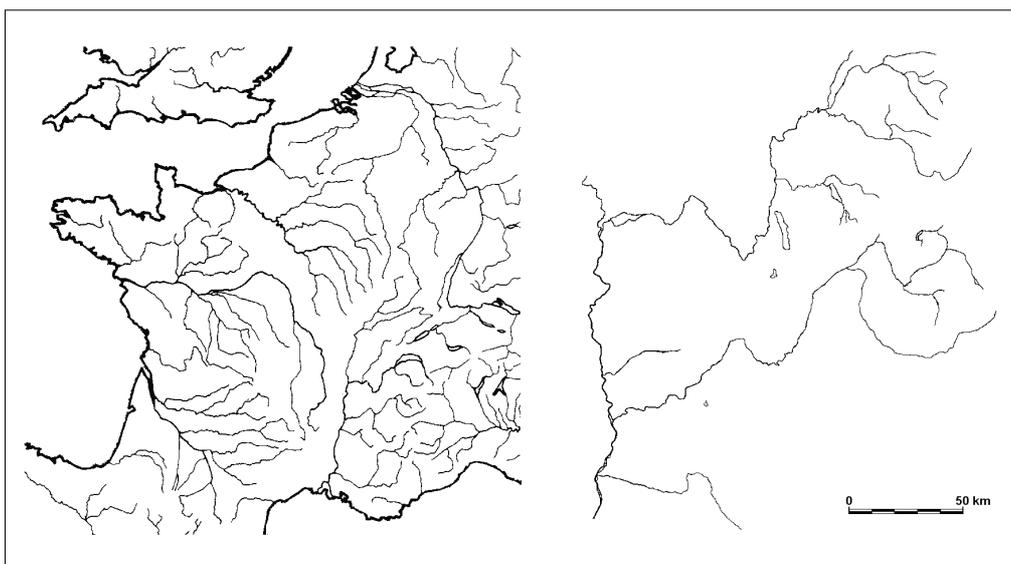


Fig. 8 - Carte de situation de la région de Grenoble.

Fig. 8—Map of the Grenoble region.

12. Les Grandes Compagnies sont des bandes de mercenaires de tous pays, recrutées par la France pendant la première partie de la guerre de Cent Ans.

CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE

Le site archéologique de l'Église Saint-Laurent de Grenoble se trouve dans un des faubourgs de la ville : le quartier Saint-Laurent, localisé sur la rive droite de l'Isère (fig. 9). Dès le XI^e s., l'essor urbain s'est traduit à Grenoble par la construction progressive de faubourgs, à proximité des remparts et dans le voisinage des édifices religieux suburbains. Saint-Laurent est le plus précoce et possède, dès 1100, une paroisse urbaine (fig. 10) (Colardelle 1996). Hormis le fait que l'Église Saint-Laurent compte parmi les édifices funéraires, monastiques et paroissiaux les plus spectaculaires en France, son originalité et son intérêt résident dans la succession d'ensembles de bâtiments d'une ampleur exceptionnelle sur une période d'occupation ininterrompue du IV^e au XVIII^e s. (Colardelle 1985, 1999b). La forme actuelle de l'Église Saint-Laurent



Fig. 9 - Vue aérienne du quartier et de l'Église Saint-Laurent de Grenoble sur la rive droite de l'Isère (cliché ville de Grenoble).

Fig. 9—Aerial view of the quarter and the church of Saint-Laurent in Grenoble on the right bank of the Isère (photo Ville de Grenoble).

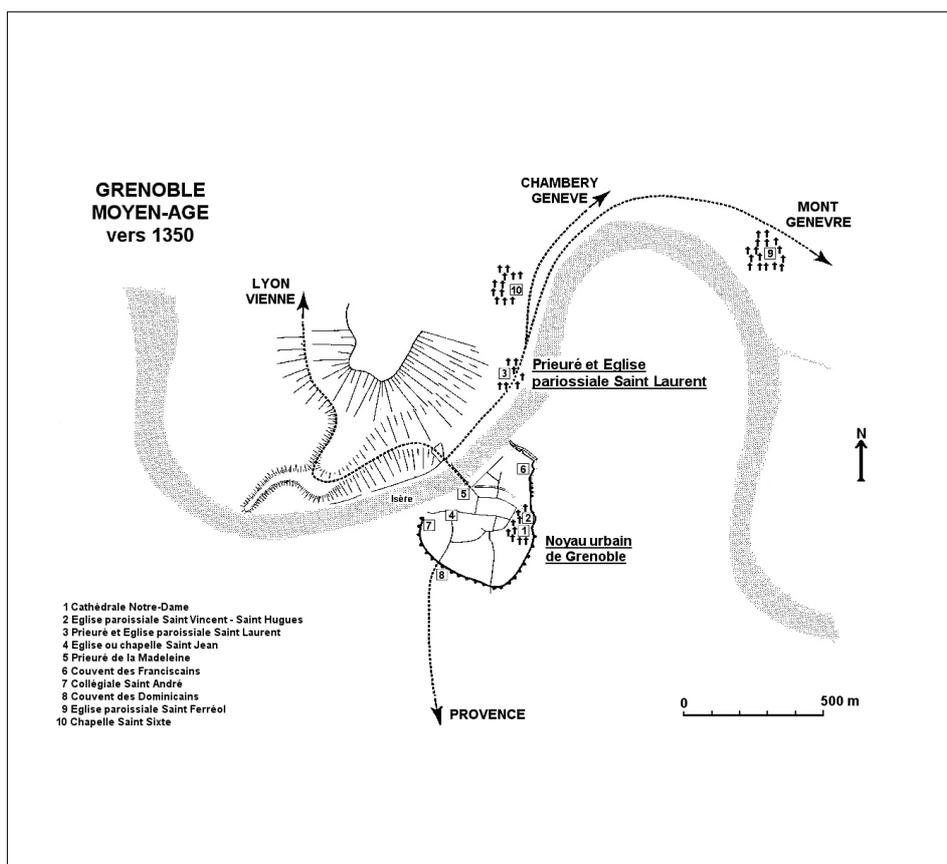


Fig. 10 - Plan de Grenoble, vers 1350 (dessin de M.-T. Pio, d'après Montjoye 1990 in Colardelle 1996).

Fig. 10—Plan of Grenoble, about 1350
(drawing by M.-T. Pio, after Montjoye 1990 in Colardelle 1996).

remonte au XII^e s. et comprend un mausolée, une nef, un chœur et un cloître (*fig. 11, 12*). Du XI^e s. au XIV^e s., le cimetière paroissial se met véritablement en place. Des tombes occupent la nef mais c'est surtout dans l'espace qui jouxte l'église, au niveau du cloître au sud de l'église et sur la place Saint-Laurent, que les sépultures s'installent en rangs serrés et superposés (Colardelle 1999a).



Fig. 11 - Nef et chœur de l'Église Saint-Laurent de Grenoble (cliché E. Herrscher).

Fig. 11—Nave and choir of the church of Saint-Laurent in Grenoble (photo E. Herrscher).

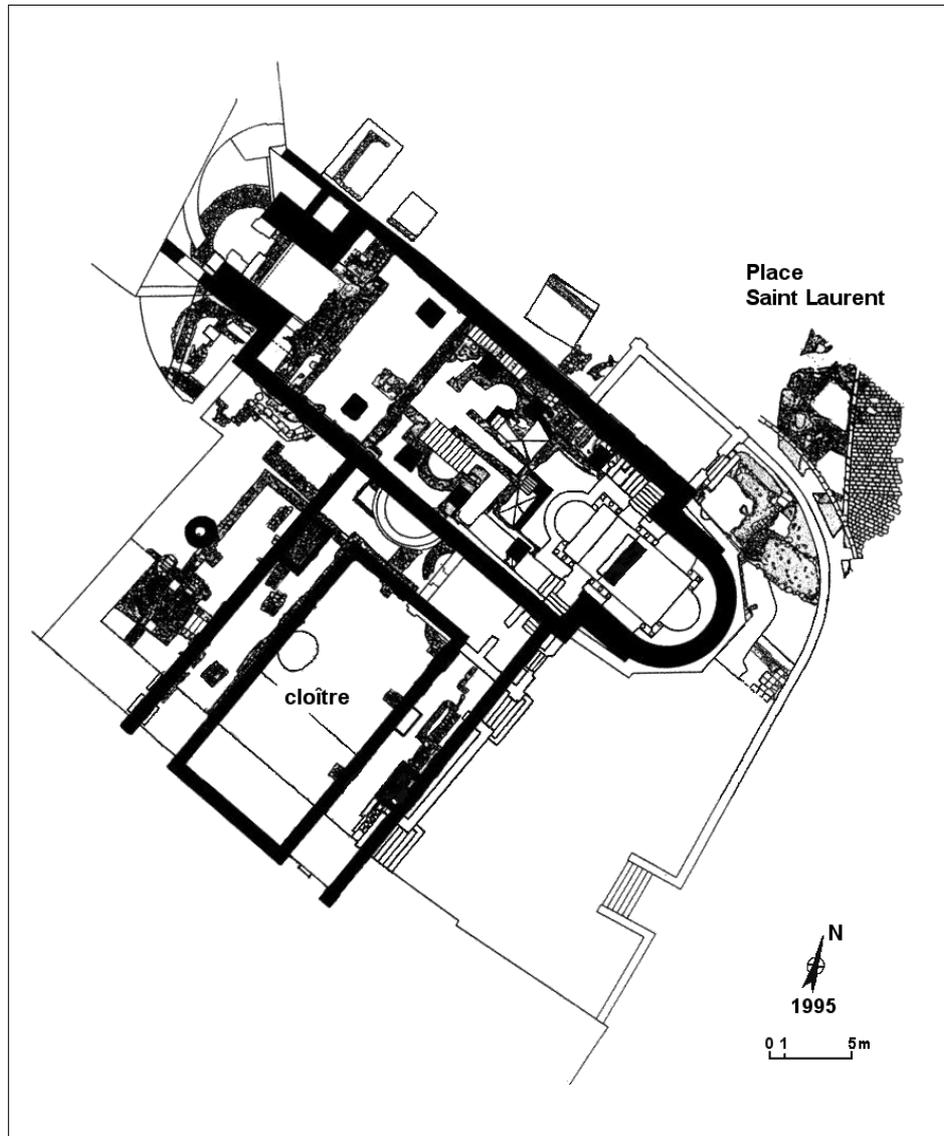


Fig. 12 - Plan général de la nécropole Saint-Laurent de Grenoble (extrait de Colardelle 1999a).

Fig. 12—General plan of the necropolis of Saint-Laurent in Grenoble (from Colardelle 1999a).

Les premières fouilles archéologiques ont été entreprises entre 1959 et 1974 par Raymond Girard. Elles ont été reprises par Renée Colardelle en 1978 pour s'achever en 1995. Elles avaient pour but de terminer une étude largement entamée à l'intérieur de l'église. Cependant, devant l'importance des découvertes, l'Architecte en Chef des Monuments Historiques, Jean-Louis Taupin, les autorités municipales et le clergé décidèrent, en 1981, de désaffecter l'église et de conserver les différentes architectures visibles afin de les présenter au public dans un musée de site : le Musée Archéologique de l'Église Saint-Laurent dont Renée Colardelle assure actuellement la direction. Le site a été fouillé zone par zone, avec, pour chaque période, des études stratigraphiques et architecturales systématiques des tombes et autres structures. Plus de 1500 sépultures ont été mises au jour sur l'ensemble du site et documentées par des relevés au vingtième et au dixième ainsi que par des photographies noir et blanc.

La chronologie du site repose sur la stratigraphie (relative) des phases architecturales et des phases d'inhumation. Ces dernières, au nombre de 18, ont été définies à partir de la position des tombes les unes par rapport aux autres (Colardelle 1999a). Elles ont été calées chronologiquement grâce à 25 datations radiocarbone, réalisées sur des ossements humains prélevés sur des squelettes en connexion anatomique (Colardelle 1999a). Les restes humains étudiés ici datent de la fin du Moyen Âge. Ils appartiennent à trois phases d'inhumation allant du XIII^e au XV^e s. et notées respectivement : phase 13 (1220-1310/1320 ap. J.-C.), phase 14 (1320-1430 ap. J.-C.) et phase 15 (1430 ap. J.-C.-début XVI^e s.).

LES SQUELETTES DE L'ÉGLISE SAINT-LAURENT

Les trois phases d'inhumation comptent au total 282 tombes. Ces dernières sont de deux types : des *sépultures individuelles* contenant les ossements d'un individu retrouvé en connexion anatomique et des *sépultures contenant les restes de plusieurs sujets*. Celles-ci ont livré des ossements rassemblés de part et d'autre d'un squelette en connexion anatomique ; les ossements disloqués correspondent, d'après Renée Colardelle (communication personnelle), à des « réinhumations ». L'attribution chronologique des restes humains « réinhumés » est, d'après l'étude archéologique, identique à celle du squelette en connexion. Ont été dénombrées 245 sépultures individuelles et 37 sépultures contenant les vestiges de plus d'un individu (*tabl. V*)¹³. Le Nombre Minimum d'Individus (N.M.I.) est de 336. Il se divise en 279 squelettes en connexion anatomique et 57 squelettes « réinhumés » (*tabl. VI*).

13. Le test choisi ici est le test du Chi2 ; seules les différences au seuil de 5 % ont été discutées. Les proportions des sépultures à un sujet et à plusieurs sujets sont similaires dans les trois phases d'inhumation (P13/P14 : $\chi^2 = 0,088$, $p = 0,766$; P13/P15 : $\chi^2 = 0,163$, $p = 0,685$; P14/P15 : $\chi^2 = 0,407$, $p = 0,523$).

	Phase 13		Phase 14		Phase 15		Nb sépultures	
	1220-1310/1320		1320-1430		1430-début XVI ^e s.		N	%
	N	%	N	%	N	%		
Sép. à un sujet	107	86,9	76	88,3	62	84,9	245	86,9
Sép. à plusieurs sujets	16	13,1	10	11,6	11	15	37	13,1
Nb sépultures	123	42,5	86	30,4	73	25,8	282	-

Tabl. V - Répartition des sépultures à un seul sujet et des sépultures à plus d'un sujet par phase d'inhumation (Sép = sépulture).

Table V—Distribution of the graves containing only one subject and the graves containing more than one subject, by burial phase (Sép = grave).

Les données archéologiques permettent de répartir les squelettes selon deux critères correspondant à la nature de l'inhumation et à la localisation de la sépulture au sein de la nécropole. Le premier comprend quatre groupes¹⁴ : inhumations en « pleine terre », inhumations associées à la présence de clous, les inhumations de type « autre » incluant caveaux, tombes anthropomorphes, cercueils avec ferrures et coffrages de planches non clouées et un dernier groupe « non identifiable ». Les sépultures sont localisées dans trois secteurs distincts de la nécropole¹⁵ : au sud (dans le cloître), au nord-est du chevet (sur la place Saint-Laurent) et à l'ouest du clocher, sous le porche d'entrée, dans l'axe de la porte réaménagée (fig. 12, tabl. VI).

	Phase 13		Phase 14		Phase 15		NMI total	
	N	%	N	%	N	%	N	%
NMI total	149		97		90		336	
Squelettes en connexion anatomique	123	82,6	86	88,7	70	77,8	279	83,0
Squelettes « réinhumés »	26	17,4	11	11,3	20	22,2	57	17,0
Type de sépulture								
Pleine terre	60	40,3	32	33,0	28	31,1	120	35,7
Inhumation associée à des clous	19	12,8	18	18,6	5	5,6	42	12,5
Autre	4	2,7	1	1,0	13	14,4	18	5,4
Non identifiable	66	44,3	46	47,4	44	48,9	156	46,4
Localisation de la sépulture								
Place	47	31,5	29	29,9	-	-	76	22,6
Sud	102	68,5	68	70,1	89	98,9	259	77,1
Ouest	-	-	-	-	1	1,1	1	0,3

Tabl VI - Répartition des squelettes en fonction de la nature de leur inhumation, du type de sépulture et de la localisation des sépultures dans la nécropole, selon les phases d'inhumation.

Table VI—Distribution of skeletons according to the nature of their burial, the type of grave, and the location of the graves in the necropolis, by burial phase.

14. Seule une différence significative de la répartition des squelettes inhumés en « pleine terre » et des squelettes associés à des clous apparaît entre les phases 14 et 15 (P14/P15 : $\chi^2 = 4,315$, $p = 0,037$). Les inhumations associées à des clous sont moins fréquentes dans la phase 15 que dans les deux autres phases. Toutefois, 46,4 % des sépultures sont de type « non identifiable » ce qui réduit les interprétations relatives à ce critère.
15. La proportion d'individus inhumés sur la place Saint-Laurent est identique dans les phases 13 et 14, aucune sépulture de la phase 15 n'a été mise au jour sur la place.

Répartition par âge au décès et par sexe

Toutes phases d'inhumation confondues, la série étudiée comprend 252 adultes des deux sexes et 84 enfants et adolescents. Trois méthodes ont été appliquées pour estimer le sexe des adultes : la méthode morphologique de Bruzek (1991a, b, 2002) utilisant l'os coxal, des fonctions discriminantes propres à la population de Saint-Laurent¹⁶ et la technique proposée par Ferembach *et al.* (1979) pour les individus ne possédant que le crâne¹⁷. Les répartitions sont données dans le *tableau VII*. En raison des nombreuses difficultés rencontrées lors de l'estimation de l'âge au décès¹⁸, les adultes de Saint-Laurent ont été simplement classés les uns par rapport aux autres en partant

	Phase d'inhumation				Sexe		
	Phase 13	Phase 14	Phase 15	Total	Femmes	Hommes	Total
Nb individus	109	69	74	252	82	80	162
<i>Sex ratio</i>	1,3	0,82	0,72	0,97			
Femmes	30	23	29	82			
Hommes	40	19	21	80			
Adultes jeunes	9	7	6	22	15	4	19
Adultes jeunes ou matures	19	10	16	45	16	21	37
Adultes matures	10	6	8	24	11	13	24
Adultes matures ou vieux	4	2	1	7	4	1	5
Adultes vieux	19	10	20	49	25	21	46

Tabl. VII - Répartition des individus adultes en fonction des phases d'inhumation, du sexe et des groupes d'âge.

Table VII—Distribution of adult individuals according to burial phase, sex and age group.

16. Compte tenu du dimorphisme sexuel particulier à chaque population, des fonctions discriminantes propres à Saint-Laurent ont été recherchées en suivant les recommandations de Murail *et al.* (1999). Quatre fonctions discriminantes ont été établies à partir de 46 dimensions du squelette post-crânien impliquant les os longs des membres supérieur et inférieur et la clavicule (Herrscher 2001).
17. L'analyse de 122 coxaux a permis d'identifier 60 coxaux appartenant à des sujets féminins et 58 à des sujets masculins. À partir de cet échantillon de référence, les fonctions discriminantes ont été calculées et la concordance entre les méthodes morphologiques appliquées au coxal et au crâne a été vérifiée.
18. Aucun consensus n'existe quant à la méthode de détermination de l'âge au décès individuel à appliquer (Saunders *et al.* 1992 ; Molleson *et al.* 1993 ; Fairgrieve, Oost 1995 ; Bocquet-Appel, Masset 1996) que ce soit avec un seul indicateur (Todd 1920 ; Hanihara, Suzuki 1978 ; Iscan *et al.* 1984 ; Lovejoy 1985 ; Lovejoy *et al.* 1985 ; Katz, Suchey 1986 ; Dreier 1994) ou plusieurs (Acsadi, Nemeskeri 1970 ; Bedford *et al.* 1993 ; Theureau 1998). La difficulté d'estimer un âge au décès pour un sujet adulte est réelle à deux titres. D'une part, l'état de conservation du matériel osseux constitue le plus souvent le facteur limitant l'application. Et d'autre part, l'incertitude demeure sur les processus de sénescence, *a priori* différents de ceux de la population de référence ayant servi à l'élaboration des méthodes. Faute de mieux, c'est généralement la combinaison de plusieurs indicateurs d'âge tels que l'usure dentaire, le coefficient de synostose des sutures crâniennes et l'arthrose vertébrale qui est retenue (Castex 1994 ; Sansilbano-Collilieux 1994 ; Signoli 1998).

« d'un pôle biologiquement jeune vers un pôle biologiquement vieux ». Dans la pratique, ils ont été répartis dans quatre catégories (catégorie 1 : adulte jeune/AJ, catégorie 2 : adulte mature/AM, catégorie 3 : adulte vieux/AV, catégorie 4 : indéterminé-indéterminable/I) après examen de deux indicateurs d'âge : l'évolution des travées osseuses des fémurs et des humérus (Acsadi, Nemeskeri 1970 ; Bergot, Bocquet 1976) et le coefficient de synostose des sutures crâniennes (Broca 1875 ; Vallois 1937 ; Masset 1982). Une telle démarche, même si elle est critiquable, présente au moins l'avantage de respecter l'unité populationnelle de l'assemblage étudié, sous réserve que tous les squelettes proviennent bien du même pool de population (Crubézy, Sellier 1990 ; Crubézy *et al.* 1999).

Les méthodes basées sur les indicateurs d'âge dentaire ont été privilégiées pour estimer l'âge des enfants et des adolescents (Iscan 1989 ; Ubelaker 1989 ; Smith 1991 ; Liversidge *et al.* 1993 ; Liversidge 1995, 1998). En l'absence de restes dentaires, les calendriers de soudures diaphyso-épiphysaires (Stevenson 1924 ; Paturet 1951 ; Rouvière 1974 ; Ferembach *et al.* 1979 ; Sempé 1979 ; Sobotta 1994) ainsi que les tables de longueurs diaphysaires de Fazekas et Kósa (1978) ont été utilisés. 58 enfants sur 84 ont été répartis dans les 5 classes d'âge proposées en démographie : 0-<1 an, 1-4 ans, 5-9 ans, 10-14 ans et 15-19 ans (*tabl. VIII*). Ce découpage peut paraître arbitraire mais il respecte toutefois les grandes étapes du développement : période périnatale, petite enfance et période pubertaire (Eveleth, Tanner 1976, 1990 ; Hägg, Taranger 1991). Les 26 squelettes immatures restants présentent un large intervalle d'âge qui chevauche plusieurs classes, rendant leur classement délicat. Cette difficulté est récurrente (Castex 1994 ; Cunha 1994 ; Sansilbano-Collilieux 1994 ; Murail 1996) et influence les études paléodémographiques (Sellier 1996 ; Sellier *et al.* 1997). Pour la surmonter, Sellier (1996) propose une technique selon laquelle la classe d'âge à attribuer est celle qui permet l'obtention du profil de mortalité le plus « *en conformité* » avec le schéma de mortalité dit archaïque (qui est celui des populations pré-jennériennes

	Phase 13	Phase 14	Phase 15	Total
[0-1]	4	1	2	7
[1-4]	9	6	4	19
[5-9]	7	7	3	17
[10-14]	8	3	-	11
[15-19]	2	1	1	4
[I]	10	10	6	26
Total	40	28	16	84

Tabl. VIII - Répartition des individus immatures par classe d'âge démographique et par phase d'inhumation.

Table VIII—Distribution of immature individuals by demographic age class and by burial phase.

de Bocquet-Appel et Masset, 1977). D'autres auteurs prennent simplement la moyenne de l'intervalle d'âge (notamment Signoli 1998). Dans la présente étude, les enfants concernés ont été rangés dans la sixième classe d'âge, dite indéterminée, et notée [I]. Bien que des méthodes d'estimation du sexe des immatures existent (Schutkowski 1993), celui des enfants de Saint-Laurent n'a pas été estimé en raison de la controverse non résolue entourant cette question (Majo *et al.* 1993 ; Coqueugniot *et al.* 2000).

ÉCHANTILLONNAGE DU MATÉRIEL OSSEUX HUMAIN ET ANIMAL POUR LES ANALYSES ISOTOPIQUES

En vue des analyses isotopiques, trois types d'échantillonnage ont été effectués : un échantillonnage d'ossements animaux et deux échantillonnages d'ossements humains, adultes et immatures.

Ossements animaux

Plusieurs espèces animales¹⁹, provenant des remblais des sépultures, ont été choisies sur la base de leur régime alimentaire. Cinq genres regroupant des herbivores et des omnivores ont été sélectionnés. Il s'agit du bœuf, du mouton et de la chèvre pour les herbivores et du poulet et du cochon pour les omnivores (*tabl. IX*). Aucun reste faunique attribuable à une espèce carnivore n'a pu être identifié. Les masses d'os total prélevées sont comprises entre 250 et 280 mg.

Ossements humains

Deux facteurs tendent à limiter la validité des informations biologiques extraites à partir d'un échantillon de squelettes humains : il s'agit du nombre minimum d'individus

	Phase 13	Phase 14	Phase 15	Total
HERBIVORES	3	3	2	7
<i>Bos sp.</i>	1	1	1	3
<i>Capra sp.</i>	1	1	-	2
<i>Ovis aries</i>	1	1	1	3
OMNIVORES	2	2	1	5
<i>Gallus sp.</i>	1	1	1	3
<i>Sus scrofa</i>	1	1	-	2
Total	5	5	3	13

Tabl. IX - Répartition des ossements animaux analysés par phase d'inhumation.

Table IX—Distribution of animal bones analysed according to burial phase.

19. La détermination a été réalisée par Frédéric Lamarque et Marylène Patou-Mathis (Laboratoire de Préhistoire, Muséum national d'histoire naturelle).

constituant l'échantillon et de l'état de conservation (Dutour 1989 ; Castex *et al.* 1993 ; Castex 1994 ; Sansilbano-Collilieux 1994 ; Bruzek 1995 ; Murail 1996 ; Guillon 1997 ; Signoli 1998). C'est pourquoi, au-delà de l'estimation du Nombre Minimum d'Individus (N.M.I.), une attention particulière a été portée à la description quantitative du matériel. Différentes méthodes d'évaluation de l'état de conservation du squelette ont été proposées (Meiklejohn, Constandse-Westermann 1978 ; Dutour 1989 ; Guillon 1997 ; Bello 2000). La méthode retenue ici est celle de Dutour (1989). L'Indice de Conservation Anatomique moyen (noté ICA) de l'ensemble de la série, de 30 %, est considéré comme un « assez bon état de conservation »²⁰. Les squelettes adultes (N = 252) apparaissent significativement mieux conservés que ceux des immatures²¹ (N = 84). Il semblerait qu'à Saint-Laurent, comme dans de nombreux sites historiques, les squelettes immatures aient souffert d'une altération *post mortem* conduisant à un défaut de conservation plus important que les squelettes adultes. Cependant, le fait qu'aucune différence ne soit significative, lorsque l'on considère la répartition en classes d'indice de conservation, permet de relancer le débat relatif à la question d'une réelle conservation différentielle des ossements des enfants (Guy *et al.* 1997). En effet, bien que Guy *et al.* aient démontré une fragilité plus importante des ossements immatures en raison d'une moins bonne minéralisation, ces auteurs avaient également souligné que les différences entre les répartitions observées et attendues pourraient provenir, tant d'idées préconçues étayées par des études démographiques en contexte pré-jennérien, que de l'inhumation des immatures en dehors des secteurs réservés aux adultes et uniquement fouillés. Cette analyse de la conservation quantitative des ossements, bien qu'importante pour optimiser la sélection des os pour les analyses, ne rend pas compte de la conservation du collagène, aussi d'autres indicateurs sont-ils nécessaires.

Parmi les 336 individus identifiés, 55 sujets ont été sélectionnés pour les analyses isotopiques : 34 adultes et 21 immatures.

– *Ossements adultes impliqués dans l'analyse inter-individuelle*

Concernant les adultes, comme c'est généralement le cas (Ezzo *et al.* 1995 ; Ubelaker *et al.* 1995 ; Richards *et al.* 1998 ; Schutkowski *et al.* 1999), l'étude isotopique porte sur un faible effectif de 34 individus. Ces 34 squelettes présentent un Indice de Conservation Anatomique moyen de 39,5 %, supérieur à celui de l'ensemble des adultes de la série. Ils ont été sélectionnés en raison de la conservation de leur coxal, pour une

20. Les scores individuels de conservation de chaque pièce osseuse sont reportés dans les annexes de la thèse (Herrscher 2001).

21. L'indice de conservation moyen des squelettes adultes est de 29,8 % contre 23 % pour les squelettes immatures (test T : t = 2,54, p = 0,012).

estimation du sexe, et de la présence d'une phalange de la main ou du pied pour les analyses isotopiques ²². Les prélèvements d'os, environ 250 mg, ont été effectués au niveau de la corticale. Pour 4 sujets adultes ²³, les prélèvements, environ 100 mg, ont été réalisés sur la mandibule. La répartition des 20 femmes et des 14 hommes selon les phases d'inhumation, l'âge au décès, le type d'inhumation et la localisation des tombes est reportée dans les *tableaux X et XI*.

	Phase 13	Phase 14	Phase 15	Total
SEXE				
Femmes	6	8	6	20
Hommes	7	4	3	14
GROUPE D'ÂGE				
Adultes jeunes	2	3	0	5
Adultes jeunes ou matures	2	3	0	5
Adultes matures	4	1	4	9
Adultes matures ou vieux	0	1	0	1
Adultes vieux	3	0	3	6
Indéterminé	2	4	2	8
LOCALISATION DES SÉPULTURES				
Place	5	5	0	10
Sud	8	7	9	24
Ouest	0	0	0	0
TYPE DE SÉPULTURE				
Pleine terre	10	5	7	22
Cercueils avec clous	2	0	1	3
Non identifiable	1	7	1	9
Total	13	12	9	34

Tabl. X - Répartition des sujets adultes analysés par phase d'inhumation, selon différents critères biologiques et archéologiques.

Table X—Distribution of adults analysed by burial phase, according to different biological and archaeological criteria.

Indiv.	Phase	Âge	Sexe
255	14	adulte jeune	féminin
668	15	adulte mature	féminin
1187	14	adulte jeune	féminin
1330	13	adulte mature	masculin

Tabl. XI - Sujets adultes impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage.

Table XI—Adult individuals involved in the triple sampling strategy.

-
22. Les phalanges des mains ou des pieds ont été sélectionnées en fonction de l'intégrité de l'os.
 23. Il s'agit des sujets 255, 668, 1187 et 1330.

– *Ossements immatures et adultes impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage*

L'échantillon se compose de 21 enfants dont l'âge est compris entre la naissance et 12 ans et de 4 adultes (*tabl. XII, XI*). Les enfants analysés présentent un Indice de Conservation Anatomique moyen de 25 %, légèrement supérieur à celui de l'ensemble des immatures de la série. Trois prélèvements par individu ont été effectués sur 24 d'entre eux (deux prélèvements seulement ont pu être réalisés sur l'enfant 273). Ils suivent les recommandations énoncées dans la partie méthodologique. Les prélèvements d'os mandibulaire sont compris entre 15 et 213 mg et les prélèvements de dentine, au niveau des racines, varient de 26 à 134 mg. Les 21 séquences chronologiques immatures obtenues sont discutées dans la perspective de préciser le statut des enfants par rapport au sevrage. L'analyse conjointe des 21 séquences immatures et des 4 séquences adultes permet d'aborder la dynamique de l'alimentation au cours de la vie dans la population médiévale de Saint-Laurent.

Indiv.	Phase	U,1989	S,1991	L, 1993, 1995	Conclusion	[0-<1]	[1-4]	[5-9]	[10-14]	[15-19]
273	14	1A+/-4m			[0,7-1,3]	*	*			
553	15	1A+/-4m			[0,7-1,3]	*	*			
1327	15	18m+/-6m	[0,7-1,4]	[1,3-1,7]	[1,3-1,7]		*			
1350	13	18m+/-6m	[1,3-1,9]		[1,3-1,9]		*			
289	13	2A+/-8m	[1,3-1,9]		[1,3-1,9]		*			
540	14	2A+/-8m		[1,6-2,0]	[1,6-2,0]		*			
301	13	18m+/-6m	[1,9-2,5]		[1,9-2,5]		*			
298	13	2A+/-8m	[1,9-2,6]		[1,9-2,6]		*			
673	15	4A+/-12m	[2,5-3,2]	[2,7-3,1]	[2,7-3,1]		*			
275	14	3A+/-12m		[3,0-4,1]	[3,0-4,1]		*			
286	13	3A+/-12m		[3,0-4,1]	[3,0-4,1]		*			
288	13	4A+/-12m	[3,1-3,8]		[3,1-3,8]		*			
1164	15	4A+/-12m	[4,9-5,6]	[3,8-4,2]	[3,8-4,2]		*			
123	13	4A+/-12m	[4,3-4,9]	[4,3-4,7]	[4,3-4,7]		*			
274	14	5A+/-16m	[5,0-5,2]		[5,0-5,2]		*			
112	14	7A+/-24m	[6,0-6,6]		[6,0-6,6]		*			
159	15	8A+/-24m	[7,2-7,7]		[7,2-7,7]		*			
1309	14	9A+/-24m	[7,5-8,2]		[7,5-8,2]		*			
182	13	9A+/-24m	[8,9-9,5]		[8,9-9,5]		*			
71	14	12A+/-30m	[10,5-11,2]		[10,5-11,2]				*	
168	13	12A+/-30m	[10,6-11,3]		[10,6-11,3]				*	

U 1989 : stades d'éruption dentaire (Ubelaker 1989) ; S 1991 : intervalle d'âge estimé à partir des stades de calcification des dents permanentes (Smith 1991) ; L 1993, 1995 : intervalle d'âge estimé à partir des stades de minéralisation et de calcification des dents déciduales et permanentes (Liversidge et al. 1993 ; Liversidge 1995, 1998).

Tabl. XII- Répartition par âge au décès des sujets immatures impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage.

Table XII—Distribution by age at death of immature individuals involved in the triple sampling strategy .

RÉSULTATS ET DISCUSSION

VÉRIFICATION DE L'INTÉGRITÉ DU COLLAGÈNE

Ossements animaux

L'extraction de collagène a été menée à bien pour 12 échantillons sur 13 (moyenne ± 1 écart-type, $56,4 \pm 31,4$ mg.g⁻¹, *annexe I*). Seule l'extraction de collagène sur le poulet (*Gallus sp.*, n° 499) a échoué. La validité des mesures isotopiques a été vérifiée à partir des teneurs en azote et en carbone. Globalement, les 12 échantillons présentent des teneurs en azote supérieures à 12,4 % ($14,2 \pm 0,8$ %) et des teneurs en carbone supérieures à 33,4 % ($38,3 \pm 2,4$ %). Les rapports C/N sont compris entre 3,1 et 3,2 ($3,15 \pm 0,05$). Seul l'échantillon de mouton (*Ovis sp.* n° 159, C/N = 2,5), en dehors des limites proposées par DeNiro (2,9-3,6, DeNiro 1985), a été exclu de la discussion (*fig. 13*). L'absence de corrélation entre le rapport C/N, les abondances isotopiques et le rendement d'extraction du collagène indique que les échantillons n'ont pas subi d'effet diagénétique significatif (*tabl. XIII*). Les variations isotopiques en carbone et en azote mesurées ont donc bien une autre cause qu'une dégradation due à leur enfouissement.

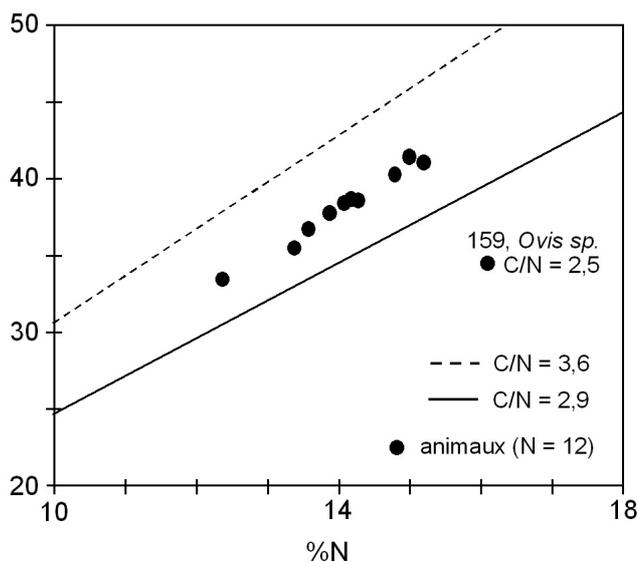


Fig. 13 - Quantités de C et N conservées dans le collagène osseux des animaux.

Fig. 13—Quantities of C and N preserved in animal bone collagen.

	N	RDT (mg.g ⁻¹)					C/N				
		r(X,Y)	R ²	p	constante	pente	r(X,Y)	R ²	p	constante	pente
δ ¹³ C	11	-0,55	0,30	0,07	-20,2	-0,0	-0,06	0,00	0,87	-18,7	-0,6
δ ¹⁵ N	11	-0,08	0,00	0,79	5,0	-0,0	0,63	0,39	0,03	-34,8	12,5
C/N	11	0,54	0,29	0,08	3,1	0,0					

r : coefficient de corrélation de Pearson, R² : coefficient de régression, p : probabilité associée à R². La droite de régression est de la forme Y = aX + b, avec a la pente de la droite et b la constante)

Tabl. XIII - Corrélations entre le rapport C/N, les compositions isotopiques en carbone et azote et les rendements d'extraction des ossements animaux.

Table XIII—Correlations between C/N ratio, isotopic compositions of carbon and nitrogen and extraction yields in the animal bones.

Ossements humains

Sujets adultes impliqués dans l'analyse individuelle

L'extraction de collagène a été possible sur les 34 adultes (91,4 ± 45,1 mg.g⁻¹, *annexe I*). Les rendements sont compris entre 38 et 199 mg.g⁻¹. Les teneurs en carbone sont supérieures à 29,3 % (40,4 ± 2,8 %) et les teneurs en azote supérieures à 11,2 % (15 ± 0,95 %). Tous les échantillons présentent des rapports C/N compris dans les limites proposées par DeNiro (3,15 ± 0,06, DeNiro 1985) (*fig. 14*). Aucune corrélation n'a été trouvée entre le rapport C/N, les abondances isotopiques et le rendement d'extraction du collagène (*tabl. XIV*). Comme précédemment, d'autres facteurs sont responsables de la variabilité isotopique inter-individuelle enregistrée par ces 34 sujets.

	N	RDT (mg.g ⁻¹)					C/N				
		r(X,Y)	R ²	p	constante	pente	r(X,Y)	R ²	p	constante	pente
δ ¹³ C	34	0,31	0,09	0,07	-20,1	0,0	-0,04	0,00	0,80	-19,0	-0,2
δ ¹⁵ N	34	0,41	0,17	0,01	7,9	0,0	0,01	0,00	0,91	7,6	0,3
C/N	34	0,24	0,06	0,16	3,1	0,0					

r : coefficient de corrélation de Pearson, R² : coefficient de régression, p : probabilité associée à R². La droite de régression est de la forme Y = aX + b, avec a la pente de la droite et b la constante).

Tabl. XIV - Corrélations entre le rapport C/N, les compositions isotopiques en carbone et azote et les rendements d'extraction des ossements humains adultes.

Table XIV—Correlations between C/N ratio, isotopic compositions of carbon and nitrogen and extraction yields in the adult human bones.

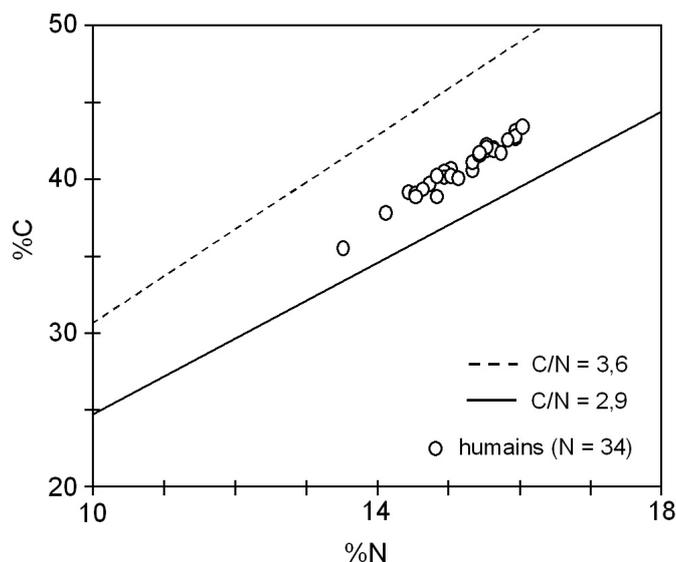


Fig. 14 - Quantités de C et N conservées dans le collagène osseux des humains.
 Fig. 14—Quantities of C and N preserved in human bone collagen.

Sujets immatures et adultes impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage

Soixante quatorze prélèvements ont été réalisés sur les 25 sujets. L'extraction de collagène a été possible sur 73 d'entre eux ²⁴ (*annexe II*). Tous prélèvements confondus, les rendements sont compris entre 11,9 et 159,1 mg.g⁻¹ et les teneurs en carbone entre 24,2 et 41 % (35,3 ± 4,0 %). Les teneurs en azote varient de 8,6 à 15,2 % (13,2 ± 1,4 %).

Les rapports C/N sont compris entre 2,4 et 3,4 (3,1 ± 0,1, *fig. 15*). Trois échantillons, se trouvant en dehors des limites acceptables (C/N < 2,9), ont été exclus de la discussion (301-rF, 301-osR et 286-rF). Après l'exclusion de quatre prélèvements, l'analyse des rapports entre le C/N, les abondances isotopiques et le rendement d'extraction du collagène ne révèlent pas de corrélations significatives (*tabl. XV*). Ainsi, d'autres facteurs, biologiques ou alimentaires, pourront être légitimement évoqués dans la discussion.

24. L'extraction de l'échantillon 288-osR a échoué.

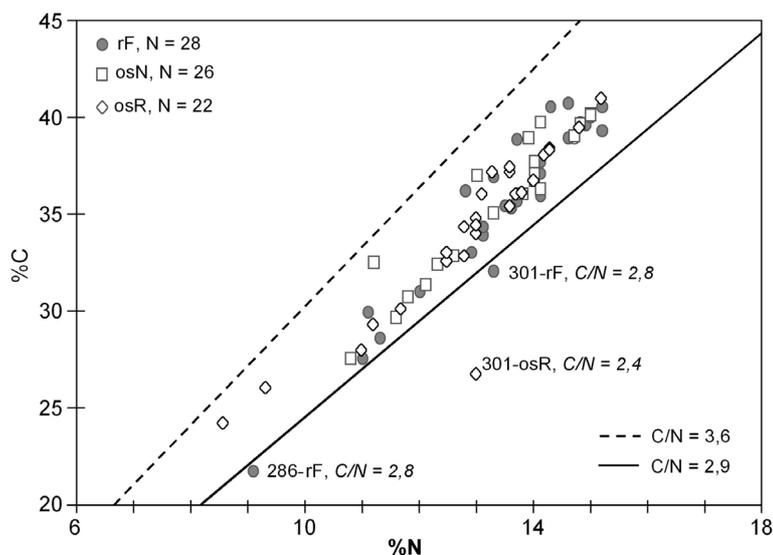


Fig. 15 - Quantités de C et N conservées dans le collagène osseux mandibulaire (osN et osR) et dans le collagène des racines en formation (rF).

Fig. 15—Quantities of C and N preserved in the mandibular bone collagen (osN and osR) and in the growing tooth root collagen (rF).

	N	RDT (mg.g ⁻¹)					C/N				
		r(X,Y)	R ²	p	constante	pente	r(X,Y)	R ²	p	constante	pente
Prélèvement dentaire rF											
δ ¹³ C	26	0,05	0,00	0,79	-19,87	0,00	0,35	0,12	0,08	-23,31	1,11
δ ¹⁵ N	26	0,46	0,21	0,02	7,93	0,01	-0,15	0,02	0,44	14,52	-1,77
C/N	26	-0,34	0,12	0,08	3,17	-0,00					
Prélèvement osseux osR											
δ ¹³ C	21	0,33	0,11	0,14	-20,36	0,00	0,27	0,07	0,24	-22,4	0,72
δ ¹⁵ N	21	0,54	0,29	0,01	7,43	0,02	-0,09	0,00	0,69	11,8	-1,0
C/N	21	-0,26	0,07	0,24	3,18	-0,00					
Prélèvement osseux osN											
δ ¹³ C	25	0,09	0,00	0,66	-20,18	0,01	0,38	0,14	0,06	-24,7	1,4
δ ¹⁵ N	25	0,49	0,24	0,01	7,51	-0,00	-	0,00	0,80	10,5	-0,6
C/N	25	0,20	0,04	0,32	3,14	0,001					

r : coefficient de corrélation de Pearson, R² : coefficient de régression, p : probabilité associée à R². La droite de régression est de la forme Y = aX + b, avec a la pente de la droite et b la constante).

Tabl. XV - Corrélations entre le rapport C/N, les compositions isotopiques en carbone et azote et les rendements d'extraction des tissus osseux et dentaires des sujets impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage.

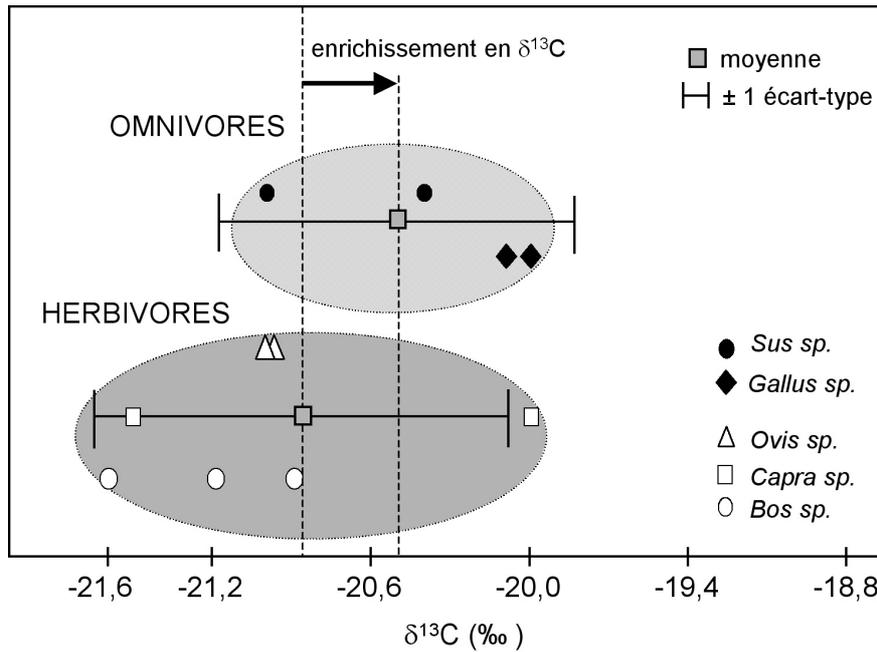
Table XV—Correlations between C/N ratio, isotopic compositions of carbon and nitrogen and the extraction yields of bone and dental tissues from individuals involved in the triple sampling strategy.

ANALYSE DES RÉGIMES ALIMENTAIRES ADULTES À SAINT-LAURENT

Caractérisation de l'écosystème de Saint-Laurent

 $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des animaux

Tous genres confondus, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des animaux sont comprises entre $-21,6\text{‰}$ et -20‰ ; la moyenne est de $-20,8 \pm 0,4\text{‰}$ (fig. 16). Ces valeurs entrent dans les gammes typiques de variation des mammifères terrestres d'un écosystème tempéré, constitué d'une végétation à photosynthèse de type C_3 (Schoeninger, DeNiro 1984 : $\delta^{13}\text{C} = -18,8 \pm 2,9\text{‰}$, $n = 23$). Les valeurs pour les herbivores sont similaires à celles enregistrées dans les sites médiévaux de Koksijde en Belgique (Polet et Katzenberg, 2003) et de Wally Corner en Angleterre (Privat *et al.* 2002). Même si l'on observe un enrichissement en ^{13}C des moyennes, des herbivores ($-21,0 \pm 0,5\text{‰}$) aux omnivores ($-20,4 \pm 0,5\text{‰}$), la différence n'est pas significative.

Fig. 16 - $\delta^{13}\text{C}$ du collagène osseux des espèces animales.Fig. 16— $\delta^{13}\text{C}$ of bone collagen from animal species.

Tous genres confondus, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ oscillent entre 3,3 et 6,6 ‰ (fig. 17). La valeur moyenne ($4,9 \pm 1,0$ ‰) est comparable à celle obtenue pour des herbivores terrestres (Bocherens *et al.* 1991a ; Fizet *et al.* 1995 ; Bocherens 1999). Toutefois, les $\delta^{15}\text{N}$ de cinq herbivores, à Saint-Laurent, présentent des valeurs significativement plus faibles (entre 1 et 2 ‰) qu'à Koksijde et Wally Corner (Privat *et al.* 2002 ; Polet, Katzenberg 2003). Rodière *et al.* (1996) ont montré que la présence d'un sol acide pouvait être à l'origine d'un appauvrissement important des $\delta^{15}\text{N}$ (entre -2,8 et 0,4 ‰). Des variations environnementales locales pourraient-elles être à l'origine des plus faibles valeurs enregistrées à Saint-Laurent ? L'analyse de la terre contenue dans les remblais des sépultures pourrait apporter des informations nouvelles. Comme pour les $\delta^{13}\text{C}$, on note un léger enrichissement en ^{15}N des moyennes des herbivores ($4,6 \pm 1,0$ ‰) par rapport à celles des omnivores ($4,0 \pm 0,7$ ‰), mais cette différence n'est pas significative.

Finalement, les variations isotopiques des animaux de Saint-Laurent sont caractéristiques de réseaux trophiques de milieu tempéré. Ces résultats sont en accord avec la provenance géographique des ossements : la moyenne montagne.

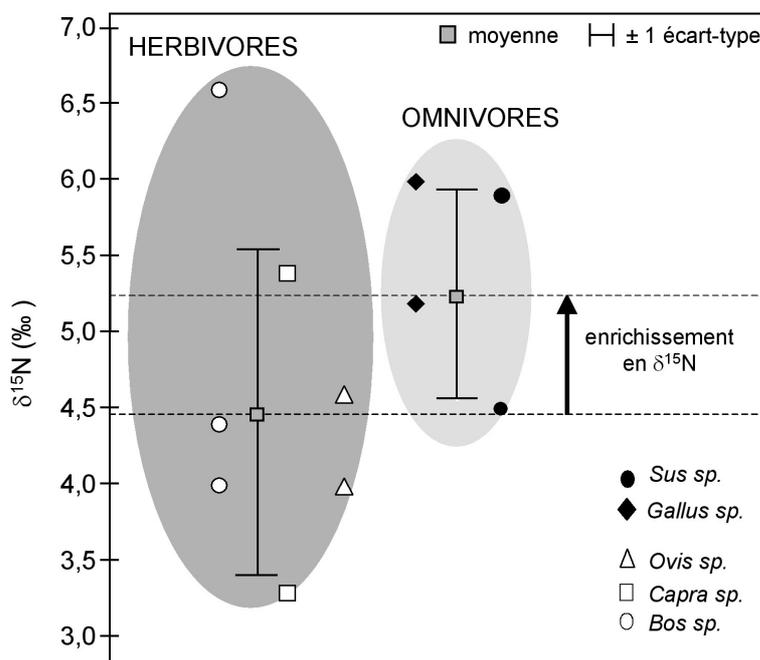


Fig. 17 - $\delta^{15}\text{N}$ du collagène osseux des espèces animales.

Fig. 17— $\delta^{15}\text{N}$ of bone collagen from animal species.

Transferts de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des animaux aux hommes

Entre deux niveaux trophiques successifs, il existe un enrichissement en moyenne de 3 à 3,5 ‰ des $\delta^{15}\text{N}$ (DeNiro, Epstein 1981 ; Schoeninger, DeNiro 1984) et de 0 à 2 ‰ pour les $\delta^{13}\text{C}$ (DeNiro, Epstein 1978 ; Schoeninger, DeNiro 1984). À Saint-Laurent, le fait qu'aucune différence significative n'apparaisse entre les animaux herbivores et omnivores atteste d'une utilisation de ressources alimentaires isotopiquement semblables. Par ailleurs, un enrichissement moyen de 0,9 ‰ en ^{13}C et de 3,8 ‰ en ^{15}N s'observe des animaux aux humains (fig. 18). Il est compatible avec une relation de type alimentation-consommateur. Les gammes de valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ indiqueraient qu'hommes et animaux ont vécu dans le même écosystème et que ces derniers ont constitué le pool alimentaire carné dans lequel les hommes ont puisé leur nourriture.

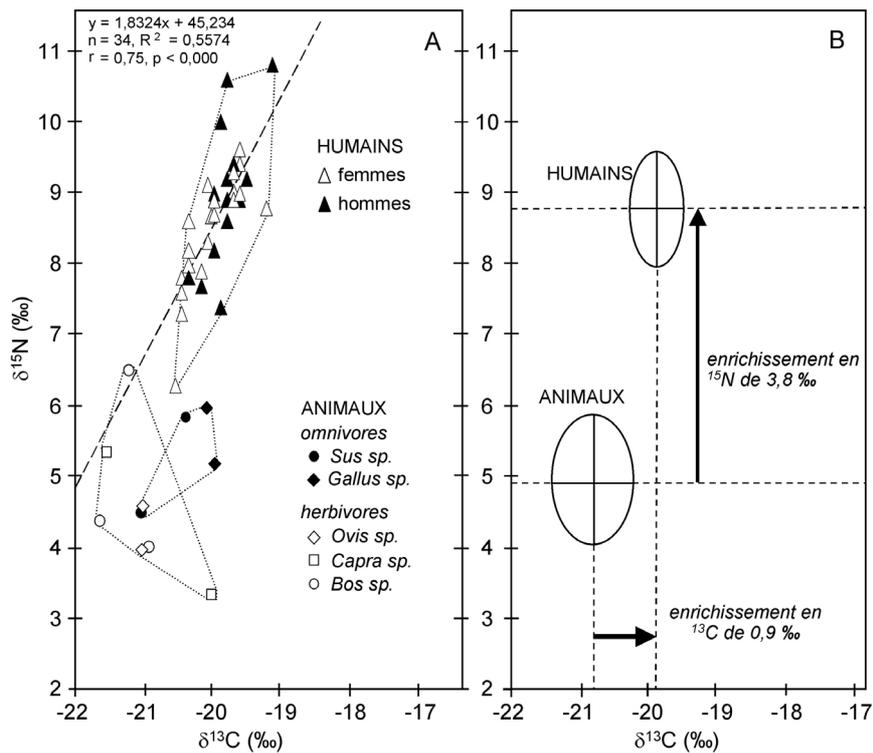


Fig. 18 - $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ du collagène osseux des animaux et des humains : variations individuelles (A) et dispersion moyenne (B).

Fig. 18— $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in bone collagen of animals and humans: individual variations (A) and average dispersion (B).

Les tendances des régimes alimentaires adultes

La distribution des 34 êtres humains adultes est continue. Elle s'organise selon un axe avec une large dispersion des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ ($8,7 \pm 0,9 \text{‰}$) et une très faible dispersion des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ ($-19,9 \pm 0,4 \text{‰}$, fig. 19). Il existe une bonne corrélation entre les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ et celles de $\delta^{13}\text{C}$.

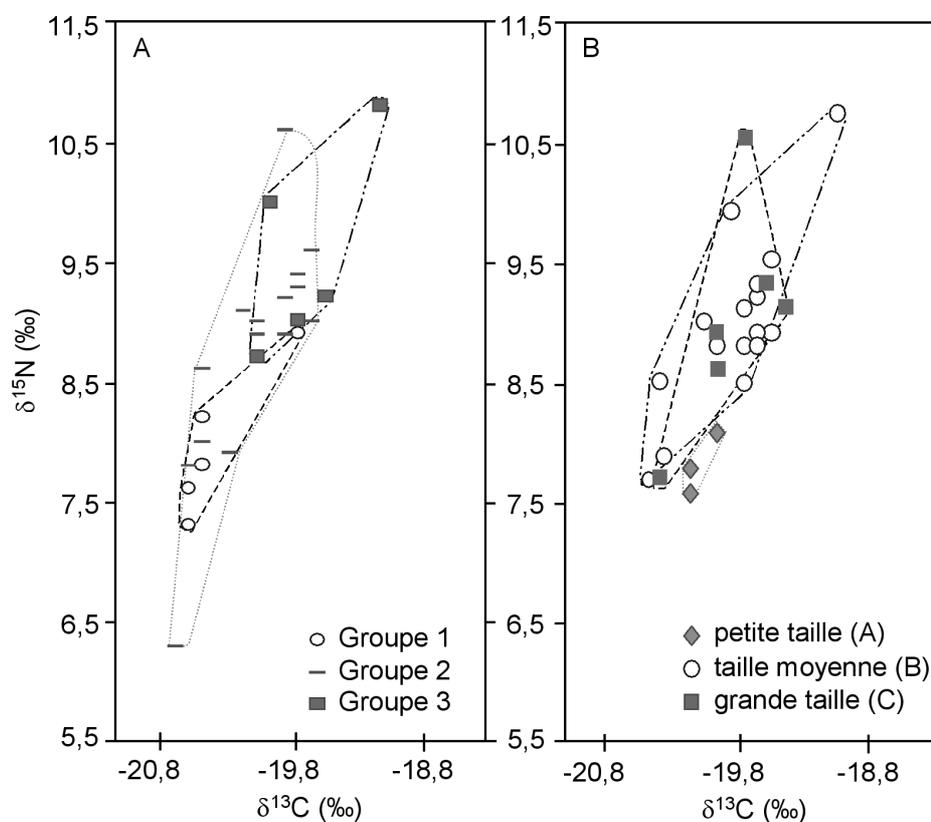


Fig. 19 - $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des adultes en fonction de l'âge au décès (A) et de la stature (B).

Fig. 19— $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of adults according to age at death (A) and to stature (B).

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des 34 adultes s'étendent de $-20,6 \text{‰}$ à $-19,1 \text{‰}$. Cette variation de $1,5 \text{‰}$ est faible pour un écosystème en C_3 . Elle se place toutefois entre celle observée (1‰) dans le cimetière médiéval de Wally Corner à Berhinsfield en Angleterre (Privat *et al.* 2002) et celle obtenue ($4,5 \text{‰}$) dans le cimetière médiéval de Weingarten

en Allemagne (Schutkowski *et al.* 1999) (*tabl. XVI*). La variation de $\delta^{13}\text{C}$ est également plus faible que celle observée dans des sites américains de périodes historiques, que ce soit dans un environnement en C_3 , comme à Saint-Laurent (Harvie, Prospect Hill : Katzenberg 1993), ou dans un environnement en C_4 comme à MacPherson (Katzenberg 1993) ou à La Florida en Équateur (Ubelaker *et al.* 1995). Cette faible amplitude pourrait provenir soit de ressources isotopiquement semblables disponibles à la base de l'écosystème de Saint-Laurent, soit d'une consommation de ressources peu diversifiées. Les animaux présentent aussi cette même gamme de variation de 1,6 ‰. Ceci rejoint la proposition énoncée précédemment, selon laquelle les espèces animales mises au jour à Saint-Laurent comme le bœuf, le mouton, le cochon, la chèvre et le poulet constituent bien le pool alimentaire carné disponible pour les hommes, indiquant une logique de production-consommation directe.

Références & Sites	Datation	$\delta^{15}\text{N}$			$\delta^{13}\text{C}$		
		max.	min.	Δ	max.	min.	Δ
EUROPE							
SAINT-LAURENT							
Polet et Katzenberg 2003	xiii ^e -xiv ^e s.	10,8	6,3	4,5	-19,1	-20,6	1,5
Koksijde* (C_3)	xii ^e -xv ^e s.	12,7	9,7	3	-18,1	-20,2	2,1
Schutkowski <i>et al.</i> 1999							
Weingarten (C_3)	vi ^e -viii ^e s.	10,3	7,1	3,2	-17,2	-21,7	4,5
Privat <i>et al.</i> 2002							
Wally Corner (C_3)	v ^e -vi ^e /vii ^e s.	11,6	8,4	3,2	-19,7	-20,7	1,0
Richards <i>et al.</i> 1998							
Poundbury (C_3)	iv ^e s.	12,1	6,7	5,4	-17,8	-20,5	2,7
AMÉRIQUE DU NORD							
Katzenberg 1993							
Harvie (C_3)	1825-1894 AD	12,7	11,7	1,0	-17,7	-20,9	3,2
Prospect Hill (C_3)	1824-1879 AD	13,8	12,1	1,7	-17,4	-20,6	3,2
MacPherson (C_4)	1580 AD	14,7	10,3	4,4	-9,2	-12,2	3
Fogel <i>et al.</i> 1989							
Sully	1650-1700 AD	11,9	10,5	1,4	-	-	-
Ezzo <i>et al.</i> 1995							
Georgia Bight (C_4)	1608-1702 AD	10,8	7,4	3,4	-9	-14,3	5,3
Schurr 1992							
Angel (C_3)	1200-1450 AD	10,5	7,4	3,1	-6,7	-12,8	6,1
Ubelaker <i>et al.</i> 1995							
La Florida (C_4)	100-450 AD	10,4	7,1	3,3	-8,5	-14,4	5,9

(C_3 : environnement de plantes en C_3 , C_4 : environnement de plantes en C_4 (maïs)
* sujets masculins uniquement.

Tabl. XVI - Variations inter-individuelles des compositions isotopiques en carbone et en azote à Saint-Laurent et dans 11 sites historiques européens et nord-américains (sujets adultes).

Table XVI — Inter-individual variations in carbon and nitrogen isotopic compositions at Saint-Laurent and in 11 European and North American historical sites.

Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ s'étendent de 6,3 ‰ à 10,8 ‰. La variation de 4,5 ‰ est supérieure à celle observée à La Florida (3,3 ‰) (Ubelaker *et al.* 1995) et dans le cimetière médiéval de Weingarten (3,2 ‰) (Schutkowski *et al.* 1999). En revanche, elle est du même ordre que celle obtenue dans le cimetière médiéval de Poundbury (5,4 ‰). Richards *et al.* (1998) expliquent cette variation importante par une alimentation à base non seulement de protéines animales terrestres, mais également de protéines animales marines. À Saint-Laurent, les valeurs isotopiques des individus adultes s'inscrivent parmi les valeurs les plus faibles relevées dans d'autres sites historiques à écosystème en C_3 . Elles confortent l'existence d'une relation trophique entre les hommes et les herbivores découverts sur le site.

Dans une étude conduite sur une population actuelle d'Oxford, soumise à des régimes alimentaires contrôlés – végétalien, végétarien et omnivore –, O'Connell et Hedges (1999) ont analysé les relations entre la quantité de protéines animales mangées et les valeurs isotopiques en azote (*tabl. XVII*). Une seule différence significative a été relevée, celle existant entre les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des végétaliens et des végétariens-omnivores. Aucune différence n'a été observée entre les végétariens et les omnivores.

Adultes	$\delta^{15}\text{N}$			$\delta^{13}\text{C}$		
	max.	min	Δ	max.	min	Δ
AMÉRIQUE						
O'Connell et Hedges 1999						
végétaliens	7,5	6,3	1,2	-19,6	-22,3	2,7
végétariens	9,4	8,1	1,3	-20,6	-21,3	0,7
omnivores	9,6	8,1	1,5	-19,2	-21,2	3,1
<i>Tous Régimes</i>	9,6	6,3	3,3	-19,2	-22,3	3,1
AFRIQUE						
Froment et Ambrose 1995						
Côte, pêcheurs	14	12,0	2	-18,7	-19,8	1,1
Côte agriculteurs	12,6	10,6	2	-18,5	-21,2	2,7
Forêts agriculteurs	12,9	10,5	2,4	-20,8	-23,8	2,8
Forêts chasseurs	12,5	9,9	2,6	-20,9	-23,6	2,7
Savane agropasteurs	13	8,8	4,2	-10,7	-18,3	7,6
<i>Tous Régimes</i>	14	8,8	5,2	-10,7	-23,6	12,9

Tabl. XVII - Variations inter-individuelles des compositions isotopiques en carbone et en azote dans des populations actuelles.

Table XVII—Inter-individual variations of carbon and nitrogen isotopic compositions in present populations.

Il semblerait que ceci soit imputable aux œufs et au lait ingérés par les végétariens ; en effet, ces aliments ont les mêmes teneurs isotopiques que la viande. Ces deux régimes alimentaires présentent donc des apports en protéines animales isotopiquement comparables. En revanche, les auteurs ont remarqué une corrélation entre l'augmentation de la quantité de protéines animales dans le régime alimentaire et l'augmentation de $\delta^{15}\text{N}$; ceci, aussi bien chez les végétariens que chez les omnivores. Les travaux de Froment et Ambrose (1995) apportent également des résultats similaires par l'étude de cinq populations camerounaises provenant d'environnements différents (*tabl. XVII*). L'influence d'une alimentation basée sur des plantes en C_4 est enregistrée dans une population de savane, les Massa. La large variation de $\delta^{13}\text{C}$ (7,6 ‰) et de $\delta^{15}\text{N}$ (4,5 ‰) des Massa illustre la plus grande diversité de leur régime alimentaire (poisson, lait de vache, céréales en C_4). Il ressort de ces travaux de nutrition contrôlée que, pour un régime alimentaire défini, la variation des compositions en azote-15 est comprise entre 1,3 ‰ et 2,6 ‰. Dès lors, la variation de 4,5 ‰ observée à Saint-Laurent indiquerait une consommation, dans des proportions différentes, d'aliments riches en protéines animales et, surtout, une diversité isotopique des aliments consommés.

À Saint-Laurent, les poissons d'eau douce et de mer ne semblent pas avoir occupé une place prépondérante dans l'alimentation, contrairement à ce qui a été démontré dans d'autres populations médiévales (Polet 1996 ; Polet, Katzenberg 2003). En effet, une alimentation à base de poissons d'eau douce devrait appauvrir les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et enrichir nettement celles de $\delta^{15}\text{N}$ (Dufour *et al.* 1999) tandis qu'une alimentation à base de poissons marins tendrait à enrichir à la fois les $\delta^{13}\text{C}$ et les $\delta^{15}\text{N}$ (Bocherens *et al.* 1999). De telles tendances n'ont pas été observées à Saint-Laurent. L'hypothèse selon laquelle les poissons occupaient une place importante dans l'alimentation ne pouvait pas être écartée *a priori* compte tenu, d'une part de la proximité des lacs (notamment du lac Léman) dans la région de Grenoble et, d'autre part, de la présence de voies d'acheminement de denrées alimentaires provenant de la Méditerranée (Stouff 1970). Par ailleurs, le contexte religieux de la nécropole Saint-Laurent n'excluait pas la présence d'individus soumis à des règles alimentaires religieuses particulières, incluant un régime à base de poissons. Une interprétation de ce type, formulée à partir des éléments traces par Polet (1996) pour la population de l'abbaye médiévale des Dunes de Koksijde (Belgique), a été confirmée par l'analyse des isotopes stables (Polet, Katzenberg 2003).

En conclusion, les résultats indiquent deux tendances de régimes alimentaires chez les adultes de Saint-Laurent, avec un pôle végétarien et un pôle carnivore. L'apport en protéines animales peut être constitué autant par la viande que par les produits animaux secondaires tels que les œufs ou le lait. L'absence de discontinuité au sein du groupe

traduit une succession de régimes alimentaires intermédiaires entre ces deux tendances correspondant à la consommation d'aliments dont la proportion en protéines animales (viande, produits secondaires) et végétales (céréales, graines, tubercules) fluctue.

Analyse de la variabilité inter-individuelle de $\delta^{15}\text{N}$

Compte tenu de la grande variabilité de la composition isotopique au sein de la population de Saint-Laurent, une recherche du ou des facteur(s) responsables a été entreprise sur la base de l'analyse croisée des données isotopiques et des critères biologiques (sexe, âge), chronologiques (phases d'inhumation) et archéologiques (topographie et type de sépulture).

$\delta^{15}\text{N}$ en fonction de critères biologiques

Les signatures isotopiques en azote ne montrent pas de différences significatives en fonction du sexe. À noter, cependant, que les valeurs les plus élevées de $\delta^{15}\text{N}$ (10,8 ‰) proviennent d'individus masculins alors que les plus faibles sont issues d'individus féminins (6,3 ‰) (*fig. 19*). Des tendances similaires se retrouvent dans les sites de Poundbury en Angleterre (Richards *et al.* 1998), de Georgia Bight (Ezzo *et al.* 1995) et d'Angel en Amérique du Nord (Schurr 1992) (*tabl. XVIII*). En revanche, dans les sites canadien de MacPherson, allemand de Weingarten et anglais de Wally Corner, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ les plus élevées appartiennent à des individus de sexe féminin (Katzenberg *et al.* 1993 ; Schutkowski *et al.* 1999 ; Privat *et al.* 2002). Les tendances observées à Saint-Laurent semblent indiquer que les hommes ont eu une alimentation avec une proportion de protéines animales plus importante que les femmes.

Les signatures isotopiques en azote en fonction de l'âge au décès révèlent des valeurs comprises entre 7,3 ‰ et 8,9 ‰ pour les adultes les plus jeunes (groupe 1) et comprises entre 8,7 ‰ et 10,8 ‰ pour les sujets les plus âgés (groupe 3) (*fig. 19A*). La large gamme de valeurs offerte par le groupe intermédiaire (groupe 2) recouvre les valeurs des groupes 1 et 3. Ceci pourrait s'expliquer par la présence d'individus jeunes et vieux introduits lors des regroupements²⁵. Des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ significativement plus élevées sont attestées pour les individus les plus âgés ($9,4 \pm 0,8$ ‰, $p = 0,02$), comparativement aux sujets du groupe 1 ($7,9 \pm 0,6$ ‰). Une hypothèse à ne pas écarter est l'éventualité d'une accumulation d'azote-15 au cours de la vie, même si ce fait n'a pas été mentionné dans les différentes études traitant de la question (Lovell *et al.* 1986 ;

25. Afin que chaque groupe d'âge contienne un effectif raisonnable, des regroupements ont été opérés. Le groupe 1 correspond aux adultes jeunes (AJ), le groupe 2 comprend les adultes jeunes ou matures (AM) et les adultes matures ou vieux et le groupe 3 comprend les adultes vieux (AV).

Katzenberg 1993 ; White, Schwarcz 1994). Ces résultats rendent compte d'un accès à une nourriture contenant une part de protéines animales moins importante chez les individus les plus jeunes. Une autre étude a, de plus, montré qu'il n'existait pas de relation particulière entre les lésions pathologiques (dégénératives, traumatiques et autres), les indicateurs de stress et les valeurs isotopiques (Herrscher *et al.* 2001).

L'analyse de $\delta^{15}\text{N}$ selon la stature ²⁶ indique la présence de groupes distincts. Les individus de taille intermédiaire ($B = 9,0 \pm 0,7 \%$, $p = 0,02$) ont des $\delta^{15}\text{N}$ significativement plus élevés que ceux de petite taille ($A = 7,9 \pm 0,3 \%$) (fig. 19B). Ces résultats tendraient à suggérer qu'un régime alimentaire appauvri en protéines d'origine animale entraîne une petite taille. Une autre hypothèse, qui reste à vérifier compte tenu de l'effectif réduit d'individus analysés, pourrait être envisagée : la population pourrait être formée d'individus ayant des origines géographiques différentes.

Adultes	datation	$\delta^{15}\text{N}$			$\delta^{13}\text{C}$		
		max.	min.	Δ	max.	min.	Δ
EUROPE							
SAINT-LAURENT							
Saint-Laurent F	XIII ^e -XV ^e s.	9,6	6,3	3,3	-19,2	-20,6	1,4
Saint-Laurent M		10,8	7,4	3,4	-19,1	-20,4	1,3
Privat <i>et al.</i> 2002							
Wally Comer F	V ^e -VI ^e /VII ^e s	11,4	8,4	3,0	-19,9	-20,4	0,5
Wally Comer M		10,9	8,5	2,4	-19,7	-20,5	0,8
Schutkowski <i>et al.</i> 1999							
Weingarten F	VI ^e -VIII ^e s	10,3	7,1	3,2	-19,3	-21,7	2,4
Weingarten M		9,5	8,0	1,5	-17,2	-20,3	3,1
Richards <i>et al.</i> 1998							
Poundbury F	IV ^e s	9,4	6,7	2,7	-17,8	-20,1	2,3
Poundbury M		12,1	7,4	4,7	-17,8	-20,5	2,7
AMÉRIQUE DU NORD							
Ubelaker <i>et al.</i> 1995							
La Florida F	100-450 AD	9,4	7,1	2,3	-9,3	-14,2	4,9
La Florida M		9,7	7,3	2,4	-8,5	-14,4	5,9
Ezzo <i>et al.</i> 1995							
Georgia Bight F	1608-1702 AD	10,5	7,4	3,1	-9	-14,3	5,3
Georgia Bight M		10,8	7,5	3,3	-9,7	-12,7	3
Katzenberg <i>et al.</i> 1993.							
MacPherson F	1530-1580 AD	14,7	10,3	4,4	-9,2	-12,2	4
MacPherson M		12,7	10,5	2,2	-9,2	-12,1	3,9
Schurr 1992							
Angel F	1200-1450 AD	10,2	7,4	2,8	-6,7	-12,8	6,1
Angel M		10,5	8,1	2,4	-7,0	-11,5	4,5

Tabl. XVIII - Variations inter-individuelles des compositions isotopiques en carbone et en azote selon le sexe, à Saint-Laurent et dans 7 sites historiques européens et nord-américains.

Table XVIII — Inter-individual variations of carbon and nitrogen isotopic compositions according to sex, at Saint-Laurent and in 7 European and North American historical sites.

26. Ces groupes correspondent à des statures comprises, pour les femmes (N = 59) entre 141 et 151,8 cm (A), 151,9 et 162,5 cm (B) et 162,6 et 169,5 cm (C) et pour les hommes (N = 65) entre 146 et 162,6 cm (A), 162,7 et 172,8 cm (B) et 172,9 et 179 cm (C).

$\delta^{15}\text{N}$ en fonction de critères chronologiques et archéologiques

Les individus de la phase 13 présentent la plus faible dispersion des signatures isotopiques (entre 7,7 ‰ et 9,6 ‰) ; ceux de la phase 14 offrent la dispersion la plus large, correspondant à la variabilité de l'ensemble des individus, toutes périodes confondues (entre 6,3 ‰ et 10,6 ‰) (*fig. 20A*). Les sujets de la phase 15 montrent des valeurs plus élevées ($9,2 \pm 0,8$ ‰) que ceux de la phase 13 ($8,7 \pm 0,6$ ‰) et de la phase 14 ($8,3 \pm 1,1$ ‰). Toutefois, seule l'augmentation entre les phases 14 et 15 est significative ($p = 0,03$). Ces résultats indiqueraient une augmentation de l'apport en protéines animales dans le régime alimentaire des individus du xv^e s. ainsi qu'une plus grande diversité des ressources alimentaires au xiv^e s.

La faible amplitude de $\delta^{15}\text{N}$ pour la phase 13 (1,4 ‰) correspond aux limites inférieures des amplitudes observées pour un régime donné (Froment, Ambrose 1995 ; O'Connell, Hedges 1999). Il est probable que les individus de la phase 13 aient eu une alimentation nettement moins variée que les individus ayant vécu pendant les phases 14 et 15, plus récentes. Des facteurs mésologiques pourraient également expliquer la grande dispersion de $\delta^{15}\text{N}$ de la phase 14. Il pourrait s'agir de la chute démographique due à la peste qui, en provoquant une inversion du rapport Homme/ressources disponibles, aurait permis à la population restante de disposer de plus de denrées alimentaires.

Aucune différence significative n'apparaît entre les différents types de tombes. La faible dispersion de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des individus associés à des clous ($-19,8 \pm 0,2$ ‰, $9 \pm 0,1$ ‰) est comprise dans celle des individus inhumés en « pleine terre » ($-19,9 \pm 0,4$ ‰, $8,7 \pm 0,9$ ‰). Les individus associés à des clous pourraient avoir eu un régime alimentaire semblable, en raison d'un statut social identique. De tels résultats ont déjà été mis en évidence dans le cimetière de Poundbury, par exemple (Richards *et al.* 1998). L'éventuelle relation entre statut social et comportement alimentaire reste à vérifier sur un effectif plus grand.

L'analyse des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ en fonction de la localisation des sépultures dans la nécropole montre des valeurs significativement plus élevées pour les sujets inhumés au sud de la nécropole, soit dans le cloître ($8,9 \pm 0,9$ ‰, $p = 0,05$), que pour ceux inhumés sur la place Saint-Laurent ($8,2 \pm 0,9$ ‰) (*fig. 20B*). Cependant, ce résultat est à nuancer car aucune sépulture datée de la phase 15 n'est située au sud de la nécropole. Ces résultats pourraient corroborer l'hypothèse émise précédemment, selon laquelle il y aurait une augmentation de la consommation des protéines animales entre le xiv^e et le xv^e s. Toutefois, la différence entre les deux groupes pourrait aussi relever d'une occupation différente du cimetière au cours du temps et traduire l'accès à une alimentation moins riche en protéines animales, pour les individus inhumés sur la place, datés des phases 13 et 14.

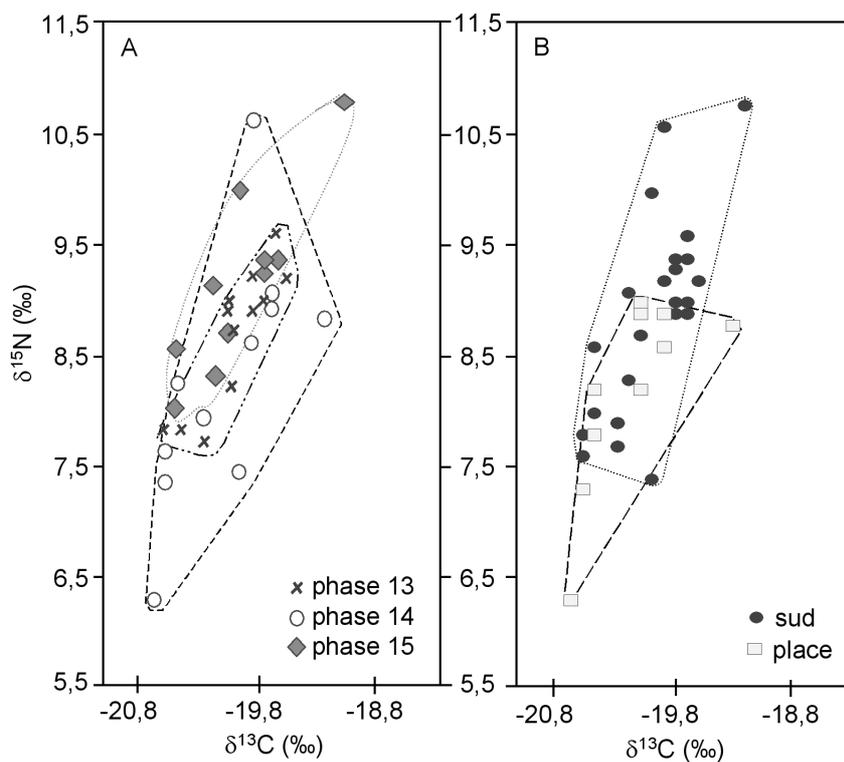


Fig. 20 - $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des adultes en fonction des phases d'inhumation (A) et de la localisation des sépultures dans la nécropole (B).

Fig. 20 — $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of adults according to the burial phases (A) and the location of the graves in the necropolis (B).

MODIFICATIONS ALIMENTAIRES AU COURS DE LA VIE

25 individus dont l'âge est compris entre la naissance et l'âge adulte ont été étudiés (tabl. XI, XII). Les 24 séquences chronologiques obtenues sont discutées dans deux perspectives qui sont, d'une part, de préciser le statut des enfants par rapport au sevrage et, d'autre part, d'aborder la dynamique de l'alimentation au cours de la vie, dans la population médiévale de Saint-Laurent.

Standardisation des données

Une première lecture des données brutes montre une très grande variabilité inter-individuelle des compositions isotopiques en azote ²⁷, démontrant la difficulté de statuer sur les modifications alimentaires d'un individu à partir d'un seul signal alimentaire. Les différences absolues de $\delta^{15}\text{N}$ de prélèvements d'un même individu s'étendent de 0 ‰ (112) à 1,8 ‰ (298) (*tabl. XIX*). Elles traduisent une accumulation progressive de collagène synthétisé sur des régimes alimentaires successifs de nature isotopique distincte. C'est la dynamique de renouvellement des tissus considérés qui permet de préciser la chronologie des différents régimes.

Indiv.	Phase	Âge	Données brutes			Données standardisées		
			$\delta^{15}\text{N}(\text{rF})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{osR})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{osN})$	osN	$\Delta[\delta^{15}\text{N}(\text{rF-osN})]$	$\Delta[\delta^{15}\text{N}(\text{osR-osN})]$
273	14	0,8-1,4	10,6	-	9,7	0	0,9	-
553	15	0,8-1,4	11,6	11,2	11,3	0	0,3	-0,1
1327	15	1,3-1,7	8,9	10,8	10,5	0	-1,6	0,3
1350	13	1,3-1,9	11,2	9,8	10	0	1,2	-0,2
289	13	1,3-1,9	7,7	7,2	6,7	0	1	0,5
540	14	1,6-2,0	10,4	10	9,7	0	0,7	0,3
301	13	1,9-2,5	-	-	9,3	0	-	-
298	13	1,9-2,6	10,4	9,8	8,6	0	1,8	1,2
673	15	2,7-3,1	9,3	8,8	8,3	0	1	0,5
288	13	3,1-3,8	7,2	-	8,1	0	-0,9	-
286	13	3,0-4,1	-	7,9	7,7	0	-	0,2
275	14	3,0-4,1	8	7,9	7,6	0	0,4	0,3
1164	15	3,8-4,2	9,2	8,4	8,1	0	1,1	0,3
123	13	4,3-4,7	8,8	9,2	8,7	0	0,1	0,5
274	14	5,0-5,2	8	7,4	7,3	0	0,7	0,1
112	14	6,0-6,6	9,5	8,8	8,8	0	0,7	0
159	15	7,2-7,7	8	7	7,3	0	0,7	-0,3
1309	14	7,5-8,2	8	7,8	7,7	0	0,3	0,1
182	13	8,9-9,5	8,7	8,2	8,4	0	0,3	-0,2
168	13	10,6-11,3	9,2	8,8	8,5	0	0,7	0,3
71	14	10,5-11,2	8,4	8,9	9,2	0	-0,8	-0,3
1187	14	[AJ]	7,8	7,5	7,6	0	0,2	-0,1
255	14	[AJ]	7,2	8,1	7,9	0	-0,7	0,2
668	15	[AM]	9,3	9,2	9,1	0	0,2	0,1
1330	13	[AM]	10,5	9,1	9,2	0	1,3	-0,1

AJ = Adulte jeune, AM = Adulte mature.

Tabl. XIX - Compositions isotopiques en azote dans les trois tissus et standardisation des données (rF = prélèvement de racine de dent en formation, osR = prélèvement d'os proche d'un germe dentaire, osN = prélèvement d'os sur le rebord alvéolaire).

Table XIX —Nitrogen isotopic compositions in three tissues and standardisation of data (rF = sample of growing tooth root, osR = sample of bone close to tooth bud, osN = sample of bone close to the alveolar edge).

27. La variabilité inter-individuelle est comprise entre 7,2 ‰ et 11,6 ‰ au niveau des prélèvements de racines en formation (rF), entre 6,7 ‰ et 11,3 ‰ pour ceux d'os en renouvellement normal (osN) et entre 7 ‰ et 11,2 ‰ pour ceux d'os en renouvellement rapide (osR).

De façon à exprimer les résultats indépendamment de la variabilité inter-individuelle, les valeurs obtenues dans l'os en renouvellement normal (osN) ont toutes été rapportées à 0. Deux déviations par individu sont discutées : l'une correspondant à la différence relative entre le signal isotopique enregistré par le collagène de l'os en renouvellement rapide (osR) et celui du collagène de l'os normal (osN) ; l'autre correspondant à la différence relative entre le signal isotopique enregistré par le collagène de la racine en formation (rF) et celui du collagène de l'os normal (osN) (tabl. XIX). Ces déviations peuvent être positives, négatives ou nulles. Une déviation *positive* correspond à un enrichissement en azote-15 contemporain du moment du décès (rF-osN > 0 et osR-osN > 0). Une déviation *négative* correspond à un appauvrissement en azote-15 contemporain du moment du décès (rF-osN < 0 et osR-osN < 0). Une déviation nulle indique une homogénéité isotopique de l'alimentation au cours de la vie.

Attention, un tel raisonnement n'est vrai que si les prélèvements sont réalisés sur des individus dont les processus de morphogenèse dentaire et osseuse sont en cours. En effet, dans le cas des adultes, si la déviation est positive (rF-osN > 0), il convient de comprendre que l'individu disposait d'une alimentation à forte teneur en azote-15, non pas à un moment proche de sa mort, mais à un moment contemporain de la synthèse de son tissu dentaire. Ceci s'explique par le fait que la dentine, tout comme l'émail, une fois mature, ne subit plus de modifications de sa composition chimique. Chez l'adulte, l'enregistrement isotopique le plus contemporain du décès est mesuré dans le collagène osseux, en raison du renouvellement perpétuel de sa matrice.

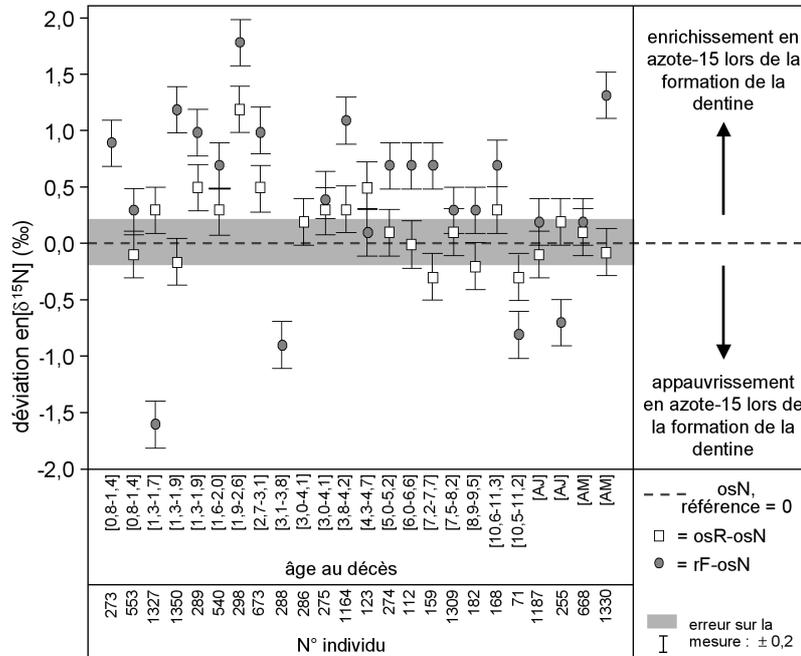


Fig. 21 - Différences relatives entre les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ enregistrées dans l'os le plus stable (osN) et le tissu dentaire (rF) et l'os en renouvellement rapide (osR) en fonction de l'âge.

Fig. 21 —Relative differences between the $\delta^{15}\text{N}$ values recorded in the most stable bone (osN) and the dental tissue (rF) and the rapidly regrowing bone (osR) according to age.

L'erreur sur la mesure des compositions isotopiques en azote étant de $\pm 0,2 \text{ ‰}$, une déviation a été considérée comme significative si elle était supérieure ou égale à $0,4 \text{ ‰}$. Ainsi, sur les 46 déviations calculées, seules 21 sont significatives (*tabl. XIX*). Dix-huit individus présentent des déviations entre rF et osN et quatre seulement en offrent entre osR et osN (*fig. 21*).

Analyse des séquences isotopiques chronologiques individuelles

Le groupe des enfants âgés entre 0,8 an et 3,1 ans comprend huit séquences chronologiques isotopiques individuelles. Ces enfants, à l'exception des enfants 553 et 1327, présentent un enrichissement significatif en azote-15 au moment de leur décès (*fig. 21*). Six individus (273, 1350, 289, 540, 298, 673) présentent des déviations de $\delta^{15}\text{N}$ significatives positives pour rF-osN, comprises entre 1 ‰ et $1,8 \text{ ‰}$, et trois d'entre eux (289, 298, 673) ont également des déviations significatives pour rF-osN et osR-osN, comprises entre $0,5 \text{ ‰}$ et $1,2 \text{ ‰}$. Ces résultats tendent à montrer que ces enfants ont disposé d'une alimentation enrichie en azote-15, dans les derniers moments de leur vie. Cette alimentation s'est progressivement accumulée dans le collagène osseux au gré de son renouvellement et dans le collagène dentaire lors de la formation des racines. Les déviations, plus importantes entre rF et osN qu'entre osR et osN, marquent la dynamique différente de chacun des tissus, avec une intégration plus rapide d'un signal alimentaire enrichi en azote-15 dans la dentine que dans l'os alvéolaire, l'os prélevé près d'un germe dentaire occupant une position intermédiaire. Cette combinaison, $\delta^{15}\text{N}_{\text{rF}} > \delta^{15}\text{N}_{\text{osR}} > \delta^{15}\text{N}_{\text{osN}}$, est caractéristique d'une prise d'alimentation lactée d'origine maternelle au moment du décès.

Deux enfants de ce groupe (553 et 1327) présentent une dynamique des déviations de $\delta^{15}\text{N}$ particulières.

L'enfant 553 (âgé entre 0,8 et 1,4 an) montre une déviation non significative pour osR-osN et une déviation faiblement positive pour rF-osN ($+0,3 \text{ ‰}$). Ces résultats indiquent une homogénéité des teneurs isotopiques en azote, indépendamment de la dynamique de renouvellement du tissu. Deux scénarios, au moins, peuvent être évoqués :

- la déviation faiblement positive ($+0,3 \text{ ‰}$) pour rF-osN pourrait être expliquée par un arrêt, ou une diminution, de l'apport d'aliment enrichi en azote-15. Cette modification alimentaire ayant eu lieu peu de temps avant le décès de l'individu, le collagène synthétisé sur le nouveau régime alimentaire, appauvri en azote-15 (puisque non maternel), n'aurait pas disposé d'un laps de temps suffisant pour s'accumuler dans le tissu dentaire. Ces suppositions s'appuient sur les résultats de Balasse (1999) portant sur les dents de bovidés. Ces derniers révèlent qu'un arrêt brutal de l'alimentation maternelle s'enregistre de façon progressive dans les compositions isotopiques des tissus

dentaires. L'intégration progressive des modifications alimentaires peut effectivement expliquer l'absence significative de différence des déviations. Dans ce cas, le $\delta^{15}\text{N}$ des tissus osseux témoignerait, pour partie, d'un collagène synthétisé sur le premier régime alimentaire (lacté maternel) et celui de la racine, pour partie, d'un collagène synthétisé sur le nouveau régime alimentaire appauvri en azote-15 ;

– cet enfant n'aurait jamais disposé d'une alimentation lactée d'origine maternelle, la substitution du lait maternel par du lait de vache ou par le lait d'une nourrice sont deux possibilités qui ne peuvent pas être strictement exclues, à la lumière des seules données isotopiques. Toutefois, si l'on se place dans la perspective d'une alimentation d'origine lactée maternelle, l'état intermédiaire indiquerait que l'enfant se situe dans la période de sevrage, sans qu'il soit possible de préciser si, au moment du décès, il subsistait encore un apport en lait maternel ou si ce dernier avait complètement disparu de l'alimentation.

L'enfant 1327 (âgé entre 1,3 an et 1,7 an) présente une dynamique des déviations contraire à celle des autres enfants du même groupe d'âge. La déviation pour rF-osN est fortement négative (-1,6 ‰). Une telle configuration indique que l'enfant ne bénéficiait vraisemblablement plus d'une alimentation lactée maternelle au moment de son décès bien qu'il en ait disposé auparavant, une modification, même brutale, du régime alimentaire s'enregistrant de façon progressive dans les compositions isotopiques des tissus. Il est fort probable que l'alimentation lactée d'origine exclusivement maternelle ait été relativement brève.

L'analyse paléopathologique a révélé des stigmates osseux particuliers chez ces deux enfants. Le plus jeune (553) présente de larges plages d'appositions périostées sur les diaphyses des os longs ainsi que sur les surfaces exocrâniennes. Le crâne de l'enfant 1327 montre des *cribra orbitalia* bilatérales, des plages criblées sur l'occipital ainsi que de larges plages d'appositions périostées sur la face endocrânienne des pariétaux et des temporaux et sur le sphénoïde. Bien qu'il soit difficile d'établir un diagnostic précis, il semblerait que ces deux enfants présentent des signes d'infection (Ortner, Putschar 1985 ; Aufderheide, Rodriguez-Martin 1998). La concomitance de ces traces et de la période de sevrage (en cours ou achevée), dans un moment proche de leur décès, n'apparaît pas surprenante. L'état infectieux pourrait être une conséquence du sevrage précoce, résultant soit d'un comportement alimentaire particulier, soit de l'absence de la mère. Rien ne peut exclure, non plus, un refus de l'enfant pour le sein de sa mère. En conclusion, l'enfant 1327 (âgé de 1,3-1,7 an) présenterait donc une dynamique alimentaire différente de celles des autres enfants de ce groupe (0,7-3,1 ans), caractérisée par l'apparition précoce de la période de sevrage. Un scénario analogue ne peut être avancé avec autant de certitude pour l'enfant 553 (âgé de 0,8 à 1,4 an).

Les cinq enfants âgés entre 3 ans et 4,7 ans présentent des dynamiques des déviations en azote-15 distinctes de celles de la plupart des enfants du groupe précédent.

La déviation rF-osN négative (-0,9 ‰) de *l'enfant 288* (âgé entre 3,1 et 3,8 ans) signifie que le collagène de la racine se serait synthétisé à partir d'une alimentation plus appauvrie en azote-15 que le collagène osseux. Le signal enregistré au niveau de la racine (en formation) reflétant le plus fidèlement le régime alimentaire contemporain de sa formation, il est probable que cet enfant ne disposait plus d'une alimentation lactée maternelle au moment de son décès. Les deux prélèvements osseux indiquent une homogénéité des signatures de *l'enfant 286* (âgé entre 3,0 et 4,1 ans). Il pourrait ne jamais avoir consommé de lait maternel ou bien être en cours de sevrage.

L'individu 275 (âgé entre 3,0 et 4,1 ans) présente un profil intermédiaire. Significative, la déviation pour rF-osN (+0,4 ‰) signale une accumulation dans la dent de collagène synthétisé sur un régime alimentaire enrichi en azote-15, c'est-à-dire un régime alimentaire lacté maternel. Les faibles déviations enregistrées, comparativement aux cas précédemment décrits, indiqueraient une tendance à l'homogénéisation des teneurs isotopiques du collagène au sein des trois tissus. Deux scénarios peuvent être envisagés pour expliquer l'absence de différences significatives :

- soit l'enfant n'a subi aucune modification alimentaire, la prise d'une nourriture maternelle a duré assez longtemps pour permettre au collagène synthétisé sur ce régime de remplacer la quasi-totalité du collagène prénatal au niveau d'osR (rF \approx osR) et d'osN ;
- soit l'enfant a connu une modification alimentaire, le début du sevrage, qui n'a cependant pas duré assez longtemps pour permettre au collagène synthétisé sur le nouveau régime (appauvri en azote-15) de s'enregistrer au niveau de la racine en formation. Dans ce cas, c'est la durée nécessaire à l'intégration du signal alimentaire dans le tissu qui expliquerait le profil.

Cette situation intermédiaire n'est pas surprenante, compte tenu de la continuité des étapes participant au processus de sevrage. Ce profil montre l'absorption d'une alimentation lactée maternelle à un moment donné de la vie de l'enfant ; il est toutefois difficile de préciser si l'apport de lait maternel existait encore dans des proportions plus faibles ou s'il avait complètement disparu.

La dynamique des déviations de *l'enfant 1164* (âgé entre 3,8 ans et 4,2 ans) est similaire à celle de *l'enfant 540* (âgé entre 1,6 ans et 2,0 ans). L'hypothèse la plus probable pour expliquer cette situation est qu'il devait bénéficier d'une alimentation lactée maternelle au moment de son décès. Cependant, en raison de son âge, on aurait pu s'attendre à un remplacement presque total du collagène osseux prénatal et à une tendance à l'homogénéisation des signatures des trois tissus due à une longue période d'alimentation lactée. Une cinétique de renouvellement des tissus individuelle différente pourrait être une piste de réflexion.

L'enfant 123 (âgé entre 4,3 ans et 4,7 ans) exprime aussi un profil particulier, qui n'est présent chez aucun des enfants précédents. La déviation rF-osN est non significative (+0,1 ‰) alors que la déviation osR-osN est significativement positive

(+0,5 ‰). D'un point de vue chronologique, cela sous-entend, d'une part que l'os prélevé au niveau du germe dentaire (osR) contient quantitativement plus de collagène enrichi en azote-15 que celui prélevé au niveau du rebord alvéolaire (osN = synthétisé sur un régime alimentaire plus ancien) et, d'autre part, que le prélèvement au niveau du germe dentaire (osR) contient quantitativement plus de collagène enrichi en azote-15 que celui de la racine (rF = synthétisé sur le régime contemporain du décès). Ces observations révèlent un changement de régime alimentaire avant la mort. La dynamique obtenue indique un laps de temps suffisant pour qu'une différence ait pu s'enregistrer entre les deux tissus reconnus pour intégrer le plus rapidement les signaux alimentaires. Cet enfant serait donc sevré ou dans une phase de sevrage plus avancée que celui décrit précédemment.

Les treize enfants, décrits ci-dessus, montrent des dynamiques de déviations de $\delta^{15}\text{N}$ qui les placent dans le continuum des phénomènes liés à l'allaitement et au sevrage. Leur statut par rapport à ce dernier a pu être évalué. Sept d'entre eux auraient bénéficié d'une alimentation lactée au moment du décès (273, 1350, 289, 540, 298, 673, 1164) ; quatre autres auraient subi une modification de régime (275, 123, 1327, 288) allant d'une alimentation enrichie en azote-15 vers une alimentation appauvrie en azote-15. En l'absence de déviations significatives, les enfants 553 et 286 pourraient soit être en cours de sevrage, soit disposer d'un substitut du lait maternel.

Six des sept enfants âgés entre 5 ans et 11,3 ans présentent des déviations en ^{15}N significatives pour rF-osN alors que l'on aurait pu s'attendre à une homogénéisation des compositions isotopiques en azote des trois prélèvements, comme annoncée par certains individus du groupe d'âge précédent. Les déviations pour rF-osN sont positives et comprises entre +0,3 et +0,7 ‰ et celles pour osR-osN varient de -0,2 à +0,1 ‰ (274, 112, 159, 1309, 182, 168). Ces enfants présentent une dynamique similaire à l'enfant 1164 ou à l'enfant 1350 du groupe précédent, pour lesquels une alimentation lactée d'origine maternelle au moment du décès a été déduite. Si un tel scénario est envisagé, alors ces six enfants n'auraient subi aucune modification alimentaire depuis leur naissance. D'après la dynamique de croissance et de renouvellement des tissus dentaire et osseux et l'âge au décès des enfants, le maintien d'un même régime alimentaire depuis la naissance aurait dû conduire à des déviations nulles ou proches de 0. Le collagène synthétisé sur le régime lacté maternel aurait remplacé la totalité du collagène osseux prénatal. Or, on observe un enrichissement significatif du collagène du tissu dentaire en formation par rapport au collagène osseux des deux prélèvements, obligeant à rejeter l'hypothèse de départ. La dynamique observée chez ces enfants traduit plutôt un phénomène tardif, contemporain du décès, qui aurait conduit à un enrichissement en

azote-15 significatif. Les individus auraient-ils consommé des aliments à haute teneur en protéines animales ou subi un phénomène particulier au moment de leur décès ? Différents scénarios sont proposés et discutés dans le paragraphe suivant.

L'enfant 71 (âgé entre 10,5 et 11,2 ans) présente une dynamique différente avec des déviations en $\delta^{15}\text{N}$ compatibles avec un régime appauvri en azote-15 ($rF\text{-osN} < \text{osN-osR}$). Ces observations ne suivent pas la même logique que celles réalisées sur les enfants âgés entre 5 et 11 ans. D'un autre côté, ce sujet se trouve dans une phase particulière du développement : le début de l'adolescence ou pré-puberté. D'un point de vue social, les données historiques révèlent qu'il n'est pas rare qu'entre 9 et 13 ans, les enfants deviennent apprentis (et apprentis confirmés entre 14 et 16 ans). Ceci constitue les premières étapes du passage vers le monde des adultes (Alexandre-Bidon, Lett 1997). Ce contexte ne permet pas d'exclure la mise en place d'un comportement alimentaire adulte particulier, incluant une alimentation moins enrichie en protéines animales. Il est toutefois délicat de conclure, car cet enfant constitue un cas isolé dans notre échantillon.

Les 4 adultes présentent, comme prévu, des séquences chronologiques individuelles variées. Le jeune adulte 1187 et l'adulte mature 668 montrent une homogénéisation des signatures isotopiques des collagènes osseux ou dentaire. Ces résultats indiquent que le régime alimentaire contemporain du moment de la formation de la racine de leur troisième molaire a une composition isotopique comparable à celui des dernières années de leur vie. Du fait d'un prélèvement dentaire effectué sur la racine d'une troisième molaire en croissance, il est logique d'observer l'homogénéité des compositions isotopiques du jeune adulte 1187. En revanche, l'adulte mature 1330 et l'adulte jeune 255 présentent respectivement un enrichissement et un appauvrissement en azote-15, contemporains du moment de la formation de la racine de leur troisième molaire. Vus dans une perspective alimentaire, les résultats de deux des quatre adultes révéleraient une modification entre l'alimentation consommée au moment de la formation du tissu dentaire, soit entre 20-25 ans, et celle consommée au moment du décès. La modification alimentaire enregistrée indiquerait une consommation plus importante de protéines animales par l'individu 1330, de sexe masculin, et une diminution de l'apport en protéines animales chez l'individu 255, de sexe féminin. Ce dernier présente une séquence chronologique analogue à celle de l'enfant 71 ; ceci pourrait confirmer l'hypothèse de la mise en place d'un comportement alimentaire « de type adulte » au cours de la pré-adolescence. Il serait intéressant d'élargir l'échantillon afin de voir si de tels comportements alimentaires relèvent ou non de facteurs socio-culturels.

Discussion sur les comportements alimentaires au cours de la vie

À propos du modèle théorique d'évolution des compositions isotopiques en azote

Dans le groupe des enfants âgés entre 0,8 et 4,7 ans, l'analyse des séquences chronologiques individuelles, établies grâce à trois prélèvements, a révélé une dynamique d'évolution des compositions en azote-15 en accord avec le postulat de départ (*fig. 7*). Les phénomènes attendus pour une prise d'alimentation lactée maternelle ont été observés chez la majorité des enfants les plus jeunes (*tabl. XX*). Les séquences présentant des déviations en ^{15}N intermédiaires ont été attribuées à des enfants probablement en cours de sevrage ou sevrés (en raison du décalage dû à l'enregistrement des modifications alimentaires).

En revanche, le modèle proposé ne se vérifie pas pour la période post-sevrage. En effet, les enfants plus âgés montrent un enrichissement en azote-15 dans un moment proche du décès alors qu'une homogénéisation des $\delta^{15}\text{N}$ était attendue. Les expériences de nutrition contrôlée menées par O'Connell et Hedges (1999) montrent que des individus ayant une consommation quotidienne de viande sont enrichis en azote-15

Indiv.	Phase	Âge (années)	STADE 1	STADE 2	(STADE ?)	STADE 3	
			Alimentation maternelle $rF-osN > 0$	Sevrage $rF/osR/osN = ns$ ou $rF-osN < 0$	Stress ? $rF-osN > 0$	Modification alimentaire $rF-osN < 0$ ou $rF-osN > 0$	Sans modif. alimentaire $rF = osN = osR$
273	14	0,8-1,4	*				
553	15	0,8-1,4		* ?			
1327	15	1,3-1,7		*			
1350	13	1,3-1,9	*				
289	13	1,3-1,9	*				
540	14	1,6-2,0	*				
298	13	1,9-2,6	*				
673	15	2,7-3,1	*				
288	13	3,1-3,8		*			
286	13	3,0-4,1		* ?			
275	14	3,0-4,1		*			
1164	15	3,8-4,2	* ?				
123	13	4,3-4,7		*			
274	14	5,0-5,2			*		
112	14	6,0-6,6			*		
159	15	7,2-7,7			*		
1309	14	7,5-8,2			*		
182	13	8,9-9,5			*		
168	13	10,6-11,3			*		
71	14	10,5-11,2				*	
1187	14	AJ					*
255	14	AJ				*	
668	15	AM					*
1330	13	AM				*	

Tabl. XX - Comportements alimentaires associés aux séquences isotopiques chronologiques individuelles.

Table XX — Dietary behaviours associated with individual chronological isotopic sequences.

(en moyenne de +1,1‰) comparativement à ceux ayant une consommation hebdomadaire. La déviation, de +0,5 ‰, mesurée chez ces enfants (274, 112, 159, 168), est plus faible mais n'exclut pas l'introduction dans leur alimentation d'un supplément régulier en protéines animales. Un tel comportement alimentaire suppose néanmoins que, d'une part, l'aliment de sevrage soit une nourriture exclusivement à base de protéines végétales comme les céréales et que, d'autre part, vers 4-5 ans, soit introduite une alimentation majoritairement constituée de protéines animales. Une telle modification de comportement alimentaire devrait, comme dans le cas des enfants allaités (289, 298, 673), entraîner également une déviation positive significative pour $\delta^{15}\text{N}$. Or, les quatre enfants (274, 112, 159, 168) ne montrent rien de tel. Les observations ne rendent pas compte de la dynamique des compositions isotopiques attendues dans un contexte de modification de régime alimentaire. Par ailleurs, il n'est pas fait mention dans les données historiques d'un comportement alimentaire différent, avec un apport plus important de protéines animales, chez les enfants de plus de 5 ans (Alexandre-Bidon, Lett 1997). Ainsi, il apparaît peu probable que l'enrichissement en azote-15, mis en évidence chez les enfants de Saint-Laurent âgés de plus de 5 ans, résulte de la consommation d'une nourriture particulière.

Les protides sont constitués d'acides aminés qui peuvent être organisés en peptides (chaînes courtes d'acides aminés) ou en protéines (très longues chaînes d'acides aminés). Ils représentent les seuls nutriments sources d'azote et sont majoritairement apportés par l'alimentation. Les protéines constituent le matériau de base des substances vitales (enzymes, anticorps, hormones, récepteurs, transmetteurs) des cellules, des tissus et des organes. De l'alimentation à l'utilisation des nutriments azotés, plusieurs voies métaboliques se déroulent, en partie liées aux phénomènes de la digestion, de l'assimilation et de l'excrétion (fig. 22). Il n'y a pas de réelles réserves en protéines dans l'organisme ; le muscle ou le foie ne peuvent pas être considérés comme des réserves mais comme un capital à préserver en raison de besoins constants, notamment pour le renouvellement permanent des tissus (Rieutort 1993 ; Lecerf 1996).

Des modifications des teneurs isotopiques en azote chez des herbivores ont été observées et discutées par plusieurs auteurs (Sealy *et al.* 1987 ; Ambrose 1991). Ambrose (1991) montre qu'indépendamment des niveaux trophiques, des herbivores présentent des $\delta^{15}\text{N}$ nettement plus élevés (de l'ordre d'un saut trophique) dans un environnement aride que dans un environnement tempéré. Il propose plusieurs hypothèses dont une relève de mécanismes pouvant être transposés à l'homme. Cette hypothèse met en jeu une balance particulière entre l'excrétion d'azote-15 sous forme d'urée et l'apport alimentaire en azote-15. L'urée est appauvrie en azote-15 par rapport à l'alimentation, car les transports osmotiques à travers les membranes sont plus faciles pour l'isotope léger (^{14}N) que pour l'isotope lourd de l'azote (^{15}N) (Steele, Daniel 1978).

L'augmentation de $\delta^{15}\text{N}$ observée chez les herbivores, en contexte environnemental chaud et aride, serait donc une conséquence d'une perte préférentielle de l'isotope léger de l'azote (^{14}N) conduisant à une circulation dans l'organisme d'une quantité plus importante de l'isotope lourd (^{15}N). D'un autre côté, sur la base d'expériences de nutrition contrôlées, Hobson *et al.* (1993) ont observé un enrichissement en azote-15 dans les tissus d'oiseaux en période de stress nutritionnel, avec une stagnation de la prise de masse. L'analyse de variations isotopiques intra-dentaires chez les bovidés a montré une légère augmentation en azote-15 après le sevrage, interprétée comme l'expression d'un stress physiologique (Balasse 1999). L'hypothèse avancée par l'auteur est la remobilisation d'azote stocké durant la première période de la vie, sur le régime lacté, induite par le stress dû à l'adaptation à de nouvelles conditions environnementales et nutritionnelles. Toutefois, ces hypothèses supposant une relation entre l'augmentation en azote-15 et les stress (thermiques et hydriques) n'ont pas été confirmées par les expériences de laboratoire conduites sur le rat ²⁸ (Ambrose 2000).

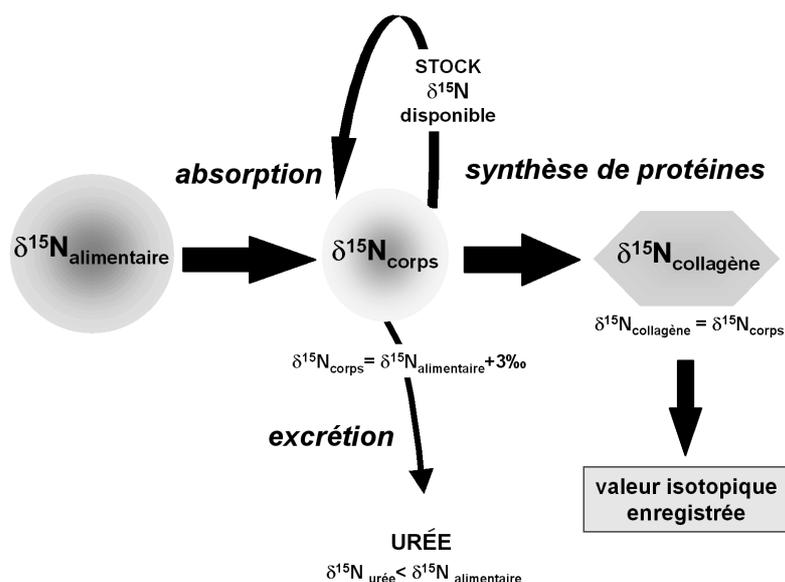


Fig. 22 - Mécanismes de transfert des teneurs isotopiques en azote de l'alimentation au collagène.

Fig. 22—Transfer mechanisms of nitrogen isotopic content from food to collagen.

28. Pour l'auteur, l'explication la plus probable relèverait du modèle animal (rat) trop différent de celui des herbivores et des hommes (Ambrose 2000).

Pour expliquer les différences de compositions isotopiques du collagène osseux, Katzenberg et Lovell (1999) évoquent les mécanismes de fractionnement isotopique de l'azote et de recyclage des protéines dans l'organisme, entre l'alimentation et les tissus osseux impliqués, lors de la croissance, du renouvellement et de la perte des tissus. Trois cas peuvent se présenter :

– *Gain de tissu lors de la croissance* : le bilan azoté est positif. L'assimilation en azote due à la synthèse de nouveaux tissus est supérieure à son excrétion. L'enrichissement en azote-15 résulterait du fractionnement isotopique « attendu » entre alimentation et collagène, en raison de l'excrétion préférentielle d'azote-14 comparativement à l'azote-15 ;

– *Renouvellement des tissus en contexte de bonne santé* : le bilan azoté est équilibré. La quantité d'azote ingérée est identique à celle excrétée. Le $\delta^{15}\text{N}$ du collagène osseux reflète les protéines de l'alimentation ;

– *Perte de tissu induit par un stress* : le bilan azoté est négatif. La quantité d'azote ingérée est insuffisante pour le remplacement des protéines. Dans de telles conditions, le besoin de nutriments indispensables pour les autres fonctions vitales va stimuler le catabolisme des protéines existantes et la désamination des sucres. Les tissus renouvelés dans un tel contexte utilisent des acides aminés plus enrichis en azote-15, en raison de l'excrétion qui touche préférentiellement l'azote-14 face à l'azote-15.

Un stress est la conséquence d'une modification, brutale ou non, de conditions satisfaisant un équilibre à un moment donné. Dans le cas de la synthèse des protéines, plusieurs altérations des mécanismes de cette synthèse peuvent être évoquées (Lecerf 1996) :

– si l'énergie ne peut être fournie par les glucides et les lipides, il est possible de solliciter les protéines. Dans ce cas, on assiste à une altération de la synthèse des protéines conduisant à la malnutrition énergétique ;

– si les protéines alimentaires viennent à manquer, l'organisme puise directement dans ses réserves (au niveau des muscles) les acides aminés indispensables à la synthèse et au *turnover* permanents des protéines. Cette situation peut mener à ce que l'on appelle la malnutrition protidique.

Ces remarques soulignent l'importance des phénomènes de croissance dans le cycle de l'azote et dans le fractionnement isotopique en azote entre l'alimentation et le collagène. Bien que la croissance soit un phénomène continu, plusieurs phases particulières sont caractérisées par une accélération des processus de synthèse et de maturation des tissus. Tels sont, par exemple, le pic de croissance staturale et le pic de croissance pubertaire (Hägg, Taranger 1991 ; Hauspie *et al.* 1991). Les résultats de l'étude de la croissance à Saint-Laurent (Herrscher 2001 ; Herrscher, Valentin, sous presse) ont montré un ralentissement de croissance dans les classes d'âge les plus jeunes,

suivi d'une phase de rattrapage de croissance chez les enfants d'âge compris entre 5 et 9 ans. Il y aurait donc, pour ces enfants, une concomitance entre une période de croissance plus rapide et un enrichissement en azote-15 au moment du décès. Une augmentation en azote-15 a déjà été observée chez des animaux en croissance, qu'un stress nutritionnel soit présent (Hobson, Clark 1992 ; Hobson *et al.* 1993) ou non (Roth, Hobson 2000).

Ainsi, deux scénarios pourraient être envisagés pour expliquer l'enrichissement en azote-15 au moment du décès observé chez ces six enfants. Le premier scénario envisage une relation entre croissance et enrichissement en azote-15 et le second suppose deux évènements indépendants :

– Dans le cas où l'apport en protéines ne s'ajusterait pas aux dépenses induites par une période de croissance intense, une situation de stress, à laquelle l'individu devra répondre, pourrait s'installer. Une remise en circulation de ^{15}N , causée par le catabolisme des protéines et la désamination des sucres (Hobson *et al.* 1993 ; Lecerf 1996 ; Katzenberg, Lovell 1999), pourrait expliquer l'augmentation des variations isotopiques en azote observée dans le groupe des 5-11,3 ans. Un tel scénario impliquant une relation de « cause à effet » entre phase de croissance intense et re-mobilisation de protéines enrichies en azote-15 serait en désaccord avec les travaux cités précédemment (Hobson *et al.* 1993 ; Katzenberg, Lovell 1999) ;

– Dans le cas d'évènements indépendants, l'enrichissement en azote-15 pourrait être l'expression, certes d'une re-mobilisation des protéines et des sucres stockés dans l'organisme, mais résultant d'un stress nutritionnel comme une malnutrition énergétique ou protidique. Ce phénomène, se déroulant dans un moment proche du décès, aurait juste eu le temps de s'enregistrer dans le tissu dentaire sans altérer visiblement les processus de croissance en cours.

Le fait, que la totalité des enfants de ce groupe d'âge (274, 112, 159, 1309, 182) présente les mêmes séquences chronologiques, avec des déviations positives pour $\delta^{15}\text{N}$, indiquerait plutôt un phénomène général, comme la croissance, qu'un phénomène comportemental associé ou non à une déficience alimentaire. Ces constats vont à l'encontre des modèles d'excrétion de l'azote proposés jusqu'à présent (Ambrose 1991, 2000 ; Katzenberg, Lovell 1999). En revanche, ils rejoindraient les conclusions émises par Roth et Hobson (2000). Des études ultérieures, impliquant d'autres populations historiques dans une analyse conjointe des données ostéologiques et isotopiques, permettraient de vérifier si ceci est particulier aux enfants de Saint-Laurent de cette période ou si ceci relève d'un patron de croissance spécifique des enfants de cette tranche d'âge.

Enfin, les résultats obtenus pour les adultes ne contredisent pas le postulat de départ. La dynamique des comportements alimentaires observés est en accord avec les travaux de Price, Johnson *et al.* (1994), par exemple, et illustre la complexité et la diversité des comportements alimentaires humains au cours de la vie.

Évaluation du temps d'incorporation du signal alimentaire dans la composition isotopique des tissus

Pour dater les différents événements participant au processus du sevrage, on doit considérer la durée nécessaire aux aliments pour s'enregistrer dans la composition isotopique des tissus ou temps d'incorporation. Des expériences de nutrition contrôlées chez l'homme ont montré que le temps de latence entre le changement de régime alimentaire et son enregistrement au niveau de la barbe est de 6 à 12 jours (Nakamura *et al.* 1982). Toutefois, au bout de 14 jours, l'équilibre n'est toujours pas atteint. En revanche, l'équilibre isotopique est pratiquement atteint dans les cheveux au bout de 7 à 12 mois, lors du passage d'un régime omnivore à un régime végétarien (O'Connell, Hedges 1999 ; Macko *et al.* 1999). L'analyse de l'évolution des compositions isotopiques en carbone, au niveau des poils de deux bovidés, a montré une modification des signatures après 10 jours et une équilibration après 74 jours (Jones *et al.* 1981). D'après les seules données disponibles chez le jeune enfant, un minimum de 3 mois après la naissance est nécessaire au signal « lacté maternel » pour s'enregistrer au niveau des ongles et une durée de 2-3 à 5 mois s'observe pour l'enregistrement du sevrage (Fogel *et al.* 1989). La consommation de lait maternel se marque dans le collagène osseux d'enfants archéologiques vers l'âge de 6 mois (Fogel *et al.* 1989 ; Katzenberg 1993). Balasse (1999) montre qu'au moment du décès, soit 11-12 mois après le début du sevrage et 8 mois après la fin du sevrage, le collagène osseux mandibulaire de jeunes bovidés a conservé des signatures de l'alimentation maternelle. Les modifications des $\delta^{13}\text{C}$ indiqueraient une accumulation deux fois plus importante de collagène synthétisé sur le régime post-sevrage dans l'os en renouvellement rapide que dans l'os le plus stable (Balasse *et al.* 1999). Toujours chez les bovidés, l'analyse des variations en azote-15 intra-dentaires indiquerait un temps d'équilibration des signatures de l'ordre de 3 mois (Balasse 1999 ; Balasse *et al.* 2001).

D'après des données médicales, la moitié des protéines du corps humain est renouvelée en 90 jours. Le renouvellement de certains tissus, tels que l'épithélium ou la moelle osseuse, peut être plus rapide (Libby *et al.* 1964 ; Stenhouse, Baxter 1976, 1979 ; Lecerf 1996). O'Connell et Hedges (1999) mentionnent que, chaque jour, la synthèse des protéines est 3 à 5 fois plus importante que la quantité moyenne journalière nécessaire et qu'un quart des acides aminés requis pour la régénération des protéines provient directement de l'alimentation quotidienne. En fait, dès qu'un changement alimentaire s'opère, l'ensemble des valeurs isotopiques des protéines du corps change immédiatement alors que l'équilibre des abondances isotopiques dépend du temps nécessaire au renouvellement des acides aminés. À la lumière de ces données, il semble actuellement difficile d'estimer le temps de renouvellement des tissus, d'autant plus que ce dernier est également lié au métabolisme de l'individu (Tieszen *et al.* 1983), et

d'évaluer le temps nécessaire à l'intégration du signal alimentaire dans les compositions isotopiques des tissus analysés. L'absence de données sur ces paramètres, en raison d'expérimentations difficiles à réaliser, du nombre important de facteurs impliqués dans les variations des compositions isotopiques et de la spécificité/complexité des mécanismes physiologiques, constitue une limite à l'interprétation des données paléobiogéochimiques. Toutefois, sur la base des données énoncées ci-dessus, il apparaît raisonnable de considérer un temps de latence moyen de 6 mois entre la modification alimentaire et son apparition au niveau de l'enregistrement du signal isotopique dans l'os et dans la dent, dans la population archéologique immature de Saint-Laurent de Grenoble.

δ¹⁵N traceur du sevrage ou de l'arrêt de consommation d'une nourriture maternelle ?

La seule analyse longitudinale disponible pour le nourrisson montre une diminution de δ¹⁵N dans les ongles environ 2 mois après le début de sevrage (Fogel *et al.* 1989). Cette diminution est progressive sur 4 mois et correspond à la durée moyenne du sevrage chez plusieurs enfants de cette étude. La diminution de δ¹⁵N « mimerait » donc le processus de sevrage. Chez l'animal, une remarque identique a été proposée pour l'agneau alors que le contraire s'observe chez le jeune bovidé (Balasse 1999). Chez l'agneau, l'appauvrissement de δ¹⁵N pourrait refléter le processus de sevrage car la nourriture de sevrage est plus riche en protéines que celle des taurillons (Balasse 1999).

Sur la base des données obtenues chez l'homme, et compte tenu du fait que pour les enfants du Moyen Âge rien n'exclut une alimentation de sevrage dépourvue de protéines animales (Laurieux 2002), la diminution de δ¹⁵N entre le collagène dentaire et osseux tracerait le processus de sevrage, soit la diminution de la consommation de lait maternel. Toutefois, en raison de la continuité du sevrage et du temps de latence, les enfants présentant un enrichissement en azote-15 dans le collagène de la racine dentaire seraient en phase d'alimentation maternelle ou commenceraient leur sevrage et les enfants présentant un appauvrissement en azote-15 seraient en cours de sevrage ou déjà sevrés.

L'alimentation lactée maternelle et le sevrage au Moyen Âge

Si les faibles effectifs n'autorisent pas l'analyse de l'évolution du sevrage au cours du temps en comparant les trois phases d'inhumation (13, 14, 15), quelques remarques peuvent néanmoins être formulées. Les quatre enfants du xv^e s. (phase 15) présentent des séquences isotopiques particulières traduisant un sevrage précoce chez deux d'entre eux, également porteurs de lésions pathologiques (553, 1327), et une alimentation lactée prolongée chez un des deux autres (1164). L'enfant 553 (0,8-1,4 an) ne disposerait plus d'une alimentation exclusivement maternelle depuis l'âge de 3-6 mois et l'enfant 1327

(1,3-1,7 an) depuis l'âge de 8-14 mois. En revanche, il semblerait que l'enfant 673 (2,7-3,1 ans) soit allaité et que l'enfant 1164 (3,8-4,2 ans) ait encore reçu, à l'âge de 3,3-3,7 ans, une large part de produits lactés maternels. Les séquences chronologiques des enfants des phases 13 et 14, quant à elles, montrent une certaine similitude. Les enfants auraient bénéficié d'une alimentation maternelle largement prépondérante jusqu'à l'âge de 2,2-2,6 ans. Dans le cas de déviations négatives, il est difficile de trancher entre le début du sevrage ou l'arrêt complet de lait maternel. Le premier scénario serait que le sevrage, révélé par une diminution significative de l'alimentation au sein, pourrait commencer entre 2,6 et 3,3 ans. Le second scénario pourrait être que les enfants de Saint-Laurent, aux XIII^e et XIV^e s., pouvaient être sevrés entre 2,6 et 3,3 ans.

Les historiens de l'alimentation ne partagent pas tous le même point de vue sur la question de l'âge au sevrage à la fin du Moyen Âge. Même si, du haut Moyen Âge aux temps modernes, les moralistes prescrivaient aux mères de nourrir les enfants jusqu'à l'âge de trois ans (Flandrin 1984), deux hypothèses s'affrontent. Les uns proposent des arguments étayant un sevrage à 1 an²⁹ (Loux 1978 ; Alexandre-Bidon, Closson 1985) et les autres un sevrage entre 3 et 4 ans (Flandrin 1984). Par ailleurs, il semblerait que l'on n'attendait pas que l'enfant soit sevré pour introduire d'autres aliments. Des bouillies pouvaient être données dès les premiers jours de la vie (Loux 1978 ; Alexandre-Bidon, Closson 1985) ou durant les premiers mois (Morel 1995) ou encore à l'apparition des premières dents. Les résultats obtenus à Saint-Laurent, pour les XIII^e et XIV^e s., indiqueraient un début de sevrage entre 2,6 et 3,3 ans, compatible avec la seconde hypothèse. Et, si les cas datés du XV^e s. ne sont pas anecdotiques, les comportements enregistrés seraient alors compatibles avec la première hypothèse d'un « sevrage » vers 1 an, pour cette période.

29. Ici, l'âge au sevrage correspond à l'arrêt d'une prise de nourriture maternelle.

CONCLUSION

Les analyses isotopiques réalisées sur la série de Saint-Laurent, datée des XIII^e, XIV^e et XV^e s., ont permis d'étudier les comportements alimentaires des adultes, en les replaçant dans leur écosystème, et d'analyser les modifications alimentaires au cours de la vie depuis le plus jeune âge, l'accent étant porté sur une étude du sevrage. Parmi les possibilités offertes par ce type d'analyses, ce sont les isotopes stables du carbone et de l'azote présents dans les collagènes osseux et dentaires qui ont été retenus. Ces éléments sont corrélés à l'alimentation consommée du vivant de l'individu et ne subissent pas de modifications après la mort de ce dernier ; ils constituent donc d'excellents marqueurs de l'alimentation du passé.

ANALYSE DES RÉGIMES ALIMENTAIRES DES ADULTES

Les analyses isotopiques réalisées sur une série d'ossements animaux (N = 12) et humains (N = 34) ont permis de caractériser plusieurs niveaux trophiques de l'écosystème tempéré de moyenne montagne. Ces analyses ont révélé une faible dispersion de $\delta^{13}\text{C}$ (0,5 ‰) au regard de celle de $\delta^{15}\text{N}$ (4,5 ‰). Cette dernière traduit deux grandes tendances alimentaires, plaçant les individus dans un spectre continu allant d'un régime à dominante végétarienne (6,3 ‰) vers un régime à dominante carnée ou à base de produits laitiers (10,8 ‰). Une alimentation à base de poissons d'eau douce ou de mer ne peut pas être complètement écartée mais n'existait vraisemblablement pas dans des proportions importantes. Une alimentation pauvre en protéines animales semble, en outre, être corrélée à une diminution de la stature et de la durée de vie.

Une augmentation de l'apport en protéines animales entre le XIV^e et le XV^e s. ainsi qu'une diversité des ressources alimentaires, plus importante au XIV^e s., ont été décelées. Une alimentation exclusivement à base de végétaux, signalée chez les ruraux à cette époque, n'est pas attestée à Saint-Laurent de Grenoble. Il semblerait que les individus de Saint-Laurent aient disposé de toutes les ressources de l'écosystème avec, en particulier,

un accès aux protéines d'origine animale pour certains d'entre eux. Au regard des événements politiques et mésologiques qui se sont déroulés dans la région de Grenoble à cette époque, la grande variabilité inter-individuelle de $\delta^{15}\text{N}$, notamment au XIV^e s., est interprétée comme l'indice de comportements alimentaires individuels variés. Ceux-ci pourraient trouver une explication dans le fait que tous les individus n'avaient pas un accès aussi facile aux diverses ressources. Ces comportements alimentaires différents illustreraient alors la disparité des moyens de subsistance induite par la guerre de Cent Ans et l'épidémie de peste (1348). Dans ce contexte, la dispersion plus faible de $\delta^{15}\text{N}$ au XV^e s. s'expliquerait par une période de stabilité plus importante assurant à tous des conditions de vie similaires, à condition que cette partie de la nécropole n'ait pas été réservée à une certaine catégorie de la population. En effet, les individus inhumés au XV^e s. proviennent tous du cloître. Dès lors, le « profil alimentaire » obtenu pour cette phase pourrait relever tant de facteurs historiques que du statut social privilégié des défunts.

ANALYSE DES MODIFICATIONS ALIMENTAIRES AU COURS DE LA VIE

Les résultats obtenus montrent qu'échantillonner en trois points particuliers de la mandibule et de la racine d'une dent en formation permet de détecter des changements alimentaires au cours de la vie d'un individu et d'estimer le statut des enfants par rapport au sevrage (N = 25). L'application de cette procédure à des individus d'âge au décès supérieur à 5 ans a révélé un phénomène non attendu, vraisemblablement induit par un stress physiologique. Le changement alimentaire observé chez les adultes ne peut être daté plus précisément qu'entre le moment de la synthèse du tissu dentaire et l'âge au décès. Il serait peut-être possible de mieux comprendre la dynamique des comportements alimentaires au cours de la vie en couplant les analyses inter-individuelle et intra-individuelle de $\delta^{15}\text{N}$.

Bien que les méthodes et techniques mises en œuvre au cours de cette étude présentent des résultats encourageants, en termes de reconstitution des modifications alimentaires au cours de la vie, force est de constater qu'il subsiste des limites à l'interprétation des résultats. Une lacune importante réside dans la méconnaissance des mécanismes qui régissent, d'une part, la vitesse de renouvellement des tissus et, d'autre part, le laps de temps nécessaire à l'intégration du signal alimentaire dans la composition isotopique des tissus. Cette réalité conduit notamment à une estimation imprécise de la mise en place du sevrage. Enfin, il est important de signaler que les variations isotopiques mesurées sur des squelettes peuvent avoir d'autres causes que celles relevant de modifications de comportements alimentaires, en raison des mécanismes complexes

liés au cycle de l'azote au sein de l'organisme. L'analyse des isotopes stables combinée à celle des pathologies et de la croissance permettrait alors d'approcher plus précisément certains mécanismes physiologiques des populations du passé.

L'étude des variations intra-individuelles, et plus particulièrement durant les premières années de la vie, montre que le sevrage pourrait se mettre en place à un âge compris entre 2,6 et 3,3 ans à Saint-Laurent de Grenoble. De tels résultats concordent avec les données rapportées par certains historiens qui mentionnent une alimentation au sein durant au moins les deux premières années de la vie. Par ailleurs, une analyse menée sur un échantillon plus large serait nécessaire pour éliminer l'hypothèse de l'influence de mécanismes physiologiques sur les modifications isotopiques et pour vérifier si un comportement alimentaire particulier se met en place juste avant et/ou au moment de l'adolescence. Les séquences chronologiques des adultes, toutes différentes, illustrent la complexité des comportements alimentaires. Là encore, seule une étude systématique permettrait de vérifier la fréquence des modifications alimentaires au cours de différentes périodes de la vie et de cerner les facteurs, qu'ils soient biologiques, culturels ou historiques, à l'origine de la variabilité inter-individuelle observée dans la population médiévale de Saint-Laurent de Grenoble.

BIBLIOGRAPHIE

- ACSADI (G.Y.), NEMESKERI (J.) 1970, *History of human life span and mortality*, Akademiai Kiado, Budapest, 346 p.
- ALBARELLA (U.) 1999, "The mystery of husbandry": medieval animals and the problem of integrating historical and archaeological evidence, *Antiquity* 73: 867-873.
- ALEXANDRE-BIDON (D.) 1992, À la table des miniaturistes : archéo-iconographie des gestes et des mets, in C. Lambert (éd.), *Du manuscrit à la table, Essais sur la cuisine au Moyen Âge*, PUM Champion, Montréal-Paris, p. 45-55.
- ALEXANDRE-BIDON (D.), CLOSSON (D.) 1985, *L'enfant à l'ombre des cathédrales*, CNRS, Presses Universitaires de Lyon, 276 p.
- ALEXANDRE-BIDON (D.), LETT (D.) 1997, *Les enfants au Moyen Âge*, Éditions Hachette, Paris, 280 p.
- AMBROSE (S.H.) 1990, Preparation and characterisation of bone and tooth collagen for isotopic analysis, *Journal of Archaeological Science* 17: 431-451.
- AMBROSE (S.H.) 1991, Effects of diet, climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs, *Journal of Archaeological Science* 18: 293-317.
- AMBROSE (S.H.) 2000, Controlled diet and climate experiments on nitrogen isotope ratios of rats, in S.H. Ambrose, M.A. Katzenberg (eds), *Biogeochemical Approaches to Paleodietary Analysis*, Advances in Archaeological and Museum Science 5, Kluwer/Plenum Publishers, New York, p. 243-259.
- AMBROSE (S.H.), DENIRO (M.J.) 1986, Reconstruction of African human diet using bone collagen carbon and nitrogen isotope ratios, *Nature* 319: 321-324.
- AMBROSE (S.H.), NORR (L.) 1993, Experimental evidence for the relationship of the carbon isotope ratios of whole diet and dietary protein to those of bone collagen and carbonate, in J.B. Lambert, G. Grupe (eds), *Prehistoric Human Bone, Archaeology at the Molecular Level*, Springer-Verlag, Vienna, p. 1-37.
- ARAUJO (A.), REINHARD (K.), BASTOS (O.M.), COSTA (L.C.), PIRMEZ (C.), INIGHEZ (A.), VICENTE (A.C.), MOREL (C.M.), FERREIRA (L.F.) 1998, Paleoparasitology: perspectives with new techniques, *Revista do Instituto de Medicina Tropical de Sao Paulo* 40, 6: 371-176.
- AUDOIN-ROUZEAU (F.) 1991, *La taille du bœuf domestique en Europe de l'Antiquité aux Temps modernes*, in J. Desse, N. Desse-Berset (éds), *Fiches ostéo-*

- logiques animales pour l'archéologie, Fiche B : Mammifères, Centre Archéologique du CNRS, ADPCA, Juan-les-Pins, 40 p.
- AUDOIN-ROUZEAU (F.) 1993, *Hommes et animaux en Europe, Corpus des données archéozoologiques et historiques*, Dossier de Documentation Archéologique 16, CNRS, Paris, 527 p.
- AUDOIN-ROUZEAU (F.) 1994, *La taille du cheval en Europe de l'Antiquité aux Temps modernes*, in J. Desse, N. Desse-Berset (éds), *Fiches ostéologiques animales pour l'archéologie*, Fiche B : Mammifères, Centre Archéologique du CNRS, ADPCA, Juan-les-Pins, 37 p.
- AUFDERHEIDE (A.C.), NEIMAN (F.D.), WITTMERS Jr (L.E.), RAPP (G.) 1981, Lead in bones II: skeletal lead content as an indicator of lifetime lead ingestion and the social correlates in an archaeological population, *American Journal of Anthropology* 55: 285-291.
- AUFDERHEIDE (A.C.), RODRIGUEZ-MARTIN (C.) 1998, *The Cambridge Encyclopedia of Human Paleopathology*, Cambridge University Press, New-York, 478 p.
- BALASSE (M.) 1999, *De l'exploitation du lait au Néolithique moyen en Europe tempérée. Examen des modalités de sevrage des bovins par l'analyse isotopique des ossements archéologiques*, Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 169 p.
- BALASSE (M.) 2002, Reconstructing dietary and environmental history from enamel isotopic analysis: time resolution of intra-tooth sequential sampling, *International Journal of Osteoarchaeology* 12: 155-165.
- BALASSE (M.) 2003, Potential biases in sampling design interpretation of intra-tooth isotope analysis, *International Journal of Osteoarchaeology* 13: 3-10.
- BALASSE (M.), AMBROSE (S.H.), SMITH (A.B.), PRICE (T.D.) 2002, The seasonal mobility model for Prehistoric herders in the South-western Cape of South Africa assessed by isotopic analysis of sheep tooth enamel, *Journal of Archaeological Science* 29: 917-932.
- BALASSE (M.), BOCHERENS (H.), MARIOTTI (A.) 1999, Intra-bone variability of collagen and apatite isotopic composition used as evidence of a change of diet, *Journal of Archaeological Science* 26: 593-598.
- BALASSE (M.), BOCHERENS (H.), MARIOTTI (A.), AMBROSE (S.H.) 2001, Detection of dietary changes by intra-tooth carbon and nitrogen isotopic analysis: an experimental study of dentine collagen of cattle (*Bos taurus*), *Journal of Archaeological Science* 28: 235-245.
- BALASSE (M.), BOCHERENS (M.), TRESSET (A.), MARIOTTI (A.), VIGNE (J.-D.) 1997, Émergence de la production laitière au Néolithique ? Contribution de l'analyse isotopique d'ossements de bovins archéologiques, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 325 : 1005-1010.
- BALASSE (M.), SMITH (A.B.), AMBROSE (S.H.), LEIGH (S.R.) 2003, Determining sheep birth seasonality by analysis of tooth enamel oxygen isotope ratios: the Late Stone Age site of Kasteelberg (South Africa), *Journal of Archaeological Science* 30: 205-215.
- BALASSE (M.), TRESSET (A.) 2002, Early weaning of Neolithic domestic cattle (Bercy, France) revealed by intra-tooth variation in nitrogen isotope ratios, *Journal of Archaeological Science* 29: 853-859.
- BAUD (C.-A.) 1986, Altérations osseuses post-mortem d'origine fongique ou bactérienne, in H. Duday, C. Masset (éds),

Anthropologie Physique et Archéologie, Éditions du CNRS, Paris, p. 135-146.

- BEDFORD (M.E.), RUSSELL (K.F.), LOVEJOY (C.O.), MEINDL (R.S.), SIMPSON (S.W.), STUART-MACADAM (L.) 1993, Test of the factorial aging method using skeletons with known ages at death from the Grant Collection, *American Journal of Physical Anthropology* 91: 287-297.
- BELL (L.S.), COX (G.), SEALY (J.) 2001, Determining isotopic life history trajectories using bone density fractionation and stable isotope measurements: a new approach, *American Journal of Physical Anthropology* 79: 66-79.
- BELLISLE (F.) 1999, *Le comportement alimentaire humain, Approche scientifique*, Institut Danone, Paris, 138 p.
- BELLO (S.) 2000, *Taphonomie des restes osseux, Effet des processus de conservation du squelette sur les paramètres anthropologiques*, Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille 2, Faculté de Médecine, Università' degli studi di Firenze, 315 p.
- BENDER (M.M.), BAERREIS (D.A.), STEVENTON (R.L.) 1981, Further light on carbon isotopes and hopewell agriculture, *American Antiquity* 46, 2: 346-353.
- BERGOT (C.), BOCQUET (J.-P.) 1976, Étude systématique en fonction de l'âge de l'os spongieux et de l'os cortical de l'humérus et du fémur, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, série XIII, 3 : 215-242.
- BIRKEDAL-HANSEN (H.) 1982, Teeth, in J.B. Weiss, M.I.V. Jayson (eds), *Collagen in Health and Disease*, Churchill Livingstone, Edinburgh, p. 488-497.
- BOCHERENS (H.) 1992, *Biogéochimie isotopique (¹³C, ¹⁵N, ¹⁸O) et paléontologie des vertébrés : applications à l'étude des réseaux trophiques révolus et des paléoenvironnements*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, vol. 1, 193 p., vol. 2, 134 p.
- BOCHERENS (H.) 1999, Isotopes stables et reconstitution du régime alimentaire des hominidés fossiles : une revue, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s., 11, 3-4 : 267-287.
- BOCHERENS (H.), BILLIOU (D.), MARIOTTI (A.), PATOU-MATHIS (M.), OTTE (M.), BONJEAN (D.), TOUSSAINT (M.) 1999, Palaeoenvironmental and palaeodietary implications of isotopic biogeochemistry of last interglacial Neanderthal and mammal bones in Scladina Cave (Belgium), *Journal of Archaeological Science* 26: 599-607.
- BOCHERENS (H.), BILLIOU (D.), PATOU-MATHIS (M.), BONJEAN (D.), OTTE (M.), MARIOTTI (A.) 1997, Paleobiological implications of the isotopic signatures (¹³C, ¹⁵N) of fossil mammal collagen in Scladina Cave (Sclayn, Belgium), *Quaternary Research* 48: 370-380.
- BOCHERENS (H.), DRUCKER (D.) 2003, Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems, *International Journal of Osteoarchaeology* 13: 46-53.
- BOCHERENS (H.), FIZET (M.), MARIOTTI (A.) 1990, Mise en évidence du régime alimentaire végétarien de l'ours des cavernes (*Ursus spelaeus*) par la biogéochimie isotopique (¹³C, ¹⁵N) du collagène des vertébrés fossiles, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, série II, 311 : 1279-1284.
- BOCHERENS (H.), FIZET (M.), MARIOTTI (A.) 1994, Diet, physiology and ecology of fossil mammals as inferred from stable

- carbon and nitrogen isotope biogeochemistry: Implications for Pleistocene bears, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 107: 213-225.
- BOCHERENS (H.), FIZET (M.), MARIOTTI (A.), LANGE-BADRÉ (B.), VANDERMEERSCH (B.), BOREL (J.-P.), BELLON (G.) 1991, Isotopic biogeochemistry (^{13}C , ^{15}N) of fossil vertebrate collagen: Application to the study of a past food web including Neandertal man, *Journal of Human Evolution* 30: 481-492.
- BOCHERENS (H.), FIZET (M.), MARIOTTI (A.), OLIVE (C.), BELLON (G.), BILLIOU (D.) 1991, Application de la biogéochimie isotopique (^{13}C , ^{15}N) à la détermination du régime alimentaire des populations humaines et animales durant les périodes antique et médiévale, *Archives Scientifiques de Genève* 44, 3: 329-340.
- BOCHERENS (H.), MARIOTTI (A.) 1997, Comments on: Diet, physiology and ecology of fossil mammals as inferred from stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry: implications for Pleistocene bears by Bocherens *et al.*—Reply, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 128 : 362-364.
- BOCQUET-APPEL (J.-P.), MASSET (C.) 1977, Estimateurs en paléodémographie, *L'Homme* XVII, 4 : 65-90.
- BOCQUET-APPEL (J.-P.), MASSET (C.) 1996, Paleodemography: Expectancy and false hope, *American Journal of Physical Anthropology* 99: 571-583.
- BORGGREVEN (P.M.), HOPPENBROWERS (P.M.M.), GORISSEN (R.) 1979, Radiochemical determination of the metabolic activity of collagen in mature dentine, *Journal of Dental Research* 58: 2120-2127.
- BROCA (P.) 1875, Instructions cranio-métriques, Nomenclatures cranio-logiques, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* X, 2 : 337-367.
- BROWN (A.B.), BLAKELY (R.L.) 1985, Biocultural adaptation as reflected in trace element distribution, *Journal of Human Evolution* 14: 462-468.
- BROWN (T.A.), NELSON (D.A.), VOGEL (J.S.), SOUTHON (J.R.) 1988, Improved collagen extraction by modified Longin method, *Radiocarbon* 30, 2: 171-177.
- BRUZEK (J.) 1991a, *Fiabilité des procédés de détermination du sexe à partir de l'os coxal. Implication à l'étude du dimorphisme sexuel de l'homme fossile*, Thèse de Doctorat, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, t. I, 430 p., t. II, 102 p.
- BRUZEK (J.) 1991b, Proposition d'une nouvelle méthode morphologique dans la détermination sexuelle de l'os coxal, Application à la Chaussée-Tirancourt, in Compte rendu de la table ronde du GDR 742 du CNRS, *Méthodes d'étude des sépultures*, Saintes, 8-10 mai 1991, p. 13-21.
- BRUZEK (J.) 1995, Diagnose sexuelle à l'aide de l'analyse discriminante appliquée au tibia, *Antropologia Portuguesa* 13: 93-106.
- BRUZEK (J.) 2002, A method for visual determination of sex, using the human hip bone, *American Journal of Physical Anthropology* 117: 157-168.
- BRYANT (V.M.) 1974, Prehistoric diet in Southwest Texas: the coprolite evidence, *American Antiquity* 39, 3: 407-420.
- BRYANT (J.D.), FROELICH (P.N.), SHOWERS (W.J.), GENNA (B.J.) 1996, Biologic and climatic signals in the oxygen composition

- of Eocene-Oligocene equid enamel phosphate, *Palaeogeography, Palaeoecology, Palaeoecology* 126: 75-90.
- BUIKSTRA (J.E.), AUTRY (W.), BREITBURG (E.), VAN DER MERWE (N.J.) 1988, Diet and health in the Nashville basin: human adaptation and maize agriculture in Middle Tennessee, in B.V. Kennedy, G.M. Lemoine (eds), *Diet and Subsistence: Current Archaeological Perspective*, University of Calgary Press, Calgary, p. 243-259.
- BUIKSTRA (J.E.), COOK (D.C.) 1980, Palaeopathology: an American account, *Annual Review of Anthropology* 9: 433-470.
- BUIKSTRA (J.E.), FRANKENBERG (S.), LAMBERT (J.B.), XUE (L.) 1989, Multiple elements: multiple expectations, in T.D. Price (ed.), *The Chemistry of Prehistoric Human Bone*, School of American Research Advanced Seminar Series, Cambridge University Press, Cambridge, p. 155-210.
- BUMSTED (M.P.) 1985, Past human behavior from bone chemical analysis—Respects and prospects, *Journal of Human Evolution* 14: 539-551.
- CARLSON (D.S.), ARMELAGOS (G.J.), VAN GERVEN (D.P.) 1974, Factors influencing the etiology of Cribra orbitalia in Prehistoric Nubia, *Journal of Human Evolution* 3: 405-410.
- CASTEX (D.) 1994, *Mortalité, morbidité et gestion de l'espace funéraire au cours du Haut Moyen Âge, Contribution spécifique de l'anthropologie biologique*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 330 p.
- CASTEX (D.), COURTAUD (P.), HAMBÜCKEN-BONTEMPI (A.) 1993, La détermination sexuelle des séries archéologiques, la validité de certains caractères osseux extra-coxaux, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s., 5: 225-235.
- CHISHOLM (B.S.) 1989, Variation in diet reconstruction based on stable isotopic evidence, in T.D. Price (ed), *Chemistry of Prehistoric Human Bone*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 10-37.
- CHISHOLM (B.S.), NELSON (D.E.), SCHWARCZ (H.P.) 1982, Stable-carbon isotope ratios as a measure of marine versus terrestrial protein in ancient diets, *Science* 216: 1131-1132.
- CLAASSEN (C.) 1986, Shellfishing seasons in the Prehistoric Southeastern United States, *American Antiquity* 51, 1: 21-37.
- COLARDELLE (R.) 1985, *Les premiers édifices chrétiens de Saint-Laurent de Grenoble, Isère*, Mémoire de DEA, Université de Provence-Centre d'Aix, 108 p.
- COLARDELLE (R.) 1996, Saint-Laurent et les cimetières de Grenoble du IV^e au XVIII^e s., in H. Galinié, E. Zadora-Rio (éds), *Archéologie du cimetière chrétien*, Actes du 2^e colloque A.R.C.H.E.A., Orléans 29-9/1-10, 1994, 11^e supplément à la *Revue Archéologique du Centre*: 111-124.
- COLARDELLE (R.) 1999a, *L'église Saint-Laurent de la nécropole gallo-romaine au monument historique, Grenoble (Isère)*, Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 3 vol. textes, 3 vol. illustrations, 4 vol. annexes, 491 p.
- COLARDELLE (R.) 1999b, Saint-Laurent et le groupe épiscopal de Grenoble, in Actes du colloque « Autour de l'église », Genève, 5 et 6 septembre 1997, *Archéologie médiévale dans l'arc alpin*, Direction du patrimoine et des sites, Département de l'aménagement, de l'équipement et du logement, Genève, *Patrimoine et Architecture* 6, 7: 18-26.

- COQUEUGNIOT (H.), TILLIER (A.-M.), BRUZEK (J.) 2000, Mandibular ramus posterior flexure: a sex indicator in *Homo sapiens* fossil hominids? *International Journal of Osteoarchaeology* 10: 426-431.
- CRITES (G.D.) 1987, Human-plant mutualism and niche expression in the paleoethnobotanical record: a Middle Woodland example, *American Antiquity* 52, 4: 725-740.
- CRUBÉZY (E.), SELLIER (P.) 1990, Caractères discrets et organisation des ensembles sépulcraux. in E. Crubézy, H. Duday, P. Sellier, A.-M. Tillier (éds), Anthropologie et archéologie : dialogue sur les ensembles funéraires, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s., 2 : 171-178.
- CRUBÉZY (E.), TELMON (N.), SEVIN (A.), PICARD (J.), ROUGÉ (D.), LARROUY (G.), BRAGA (J.), LUDÉS (B.), MURAIL (P.) 1999, Microévolution d'une population historique, Étude des caractères discrets de la population de Missiminia (Soudan, III^e-VI^e s.), *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s., 11, 213 p.
- CUNHA (E.) 1994, *Paleobiologia das populações medievais portuguesas, Os casas de Fão e S. João de Almedina*, Dissertação de Doutorado, Universidade de Coimbra, 423 p.
- DEBIÉ (F.) 1995, *Géographie économique et humaine*, Presses Universitaires de France, Paris, 745 p.
- DEINES (P.) 1980, The isotopic composition of reduced organic carbon, in P. Fritz, J.C. Fontes (eds), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, vol. 1, p. 329-406.
- DELORT (R.) 1982, *La vie au Moyen Âge*, Éditions du Seuil, Paris, 309 p.
- DELWICHE (C.C.), STEYN (P.) 1970, Nitrogen isotope fractionation in soils and microbial reactions, *Environmental Science and Technology* 4: 929-935.
- DEMURGER (A.) 1995, *L'Occident Médiéval XIII^e-XV^e s.*, Les Fondamentaux, Hachette Supérieur, Paris, 159 p.
- DENIRO (M.J.) 1985, Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction, *Nature* 317: 806-809.
- DENIRO (M.J.) 1987, Stable isotopy and archaeology, *American Scientist* 75, 2: 182-191.
- DENIRO (M.J.), EPSTEIN (S.) 1978, Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42: 495-506.
- DENIRO (M.J.), EPSTEIN (S.) 1981, Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45: 345-351.
- DENIRO (M.J.), HASTORF (C.A.) 1985, Alteration of ¹⁵N/¹⁴N and ¹³C/¹²C ratios of plant matter during the initial stages of diagenesis: studies utilizing archaeological specimens from Peru, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49: 97-15.
- DESSE (J.), AUDOIN-ROUZEAU (F.) 1993, *Exploitation des animaux sauvages à travers le temps*, Actes des rencontres des 15-16-17 Octobre 1992, XIII^e Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, APDCA, 539 p.
- DETTWYLER (K.A.) 1995, A time to wean: the hominid blueprint for the natural age of weaning in modern human populations, in P. Stuart-Macadam, K.A. Dettwyler (eds), *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*, Aldine de Gruyter, Hawthorne, New York, p. 39-73.

- DETTWYLER (K.A.), FISHMAN (C.) 1992, Infant feeding practices and growth, *Annual Review of Anthropology* 21: 171-204.
- DREIER (F.G.) 1994, Age at death estimates for the Protohistoric Arikara using molar attrition rates: a new quantification method, *International Journal of Osteoarchaeology* 4: 137-147.
- DREYFUS (P.) 1961, *Grenoble de l'Âge du Fer à l'ère atomique*, Éditions Arthème Fayard, Paris, 245 p.
- DUBY (G.) 1991, *Histoire de la France des origines à 1348*, Références Larousse, Paris, 484 p.
- DUDD (S.N.), EVERSHERD (R.P.) 1998, Direct demonstration of milk as an element of archaeological economics, *Science* 282: 1478.
- DUDD (S.N.), EVERSHERD (R.P.), GIBSON (A.M.) 1999, Evidence for varying patterns of exploitation of animal products in different prehistoric pottery traditions based on lipids preserved in surface and absorbed residues, *Journal of Archaeological Science* 26: 1473-1482.
- DUFOUR (E.), BOCHERENS (H.), MARIOTTI (A.) 1999, Palaeodietary implications of isotopic variability in Eurasian lacustrine fish, *Journal of Archaeological Science* 26: 617-627.
- DUPÂQUIER (J.) 1995, *Histoire de la population française, I/Des origines à la Renaissance*, Quadrige/Presses Universitaires de France, Paris, 559 p.
- DUPRAS (T.L.), SCHWARCZ (H.P.) 2001, Strangers in a strange land: stable isotope evidence for human migration in the Dakhleh Oasis, Egypt, *Journal of Archaeological Science* 28: 1199-1208.
- DUPRAS (T.L.), SCHWARCZ (H.P.), FAIRGRIEVE (S.I.) 2001, Infant feeding and weaning practices in Roman Egypt, *American Journal of Physical Anthropology* 115: 204-212.
- DUTOUR (O.) 1989, *Les hommes fossiles du Sahara : peuplements holocènes du Mali septentrional*, Éditions du CNRS, Paris, 342 p.
- ERICSON (J.E.) 1985, Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology, *Journal of Human Evolution* 14: 503-514.
- EUBANKS (M.) 1997, Reevaluation of the identification of ancient maize pollen from Alabama, *American Antiquity* 62, 1: 139-145.
- EVELETH (B.), TANNER (J.M.) 1976, *Worldwide Variation in Human Growth*, International Biological Programs, Cambridge University Press, Cambridge, 497 p.
- EVELETH (B.), TANNER (J.M.) 1990, *Worldwide Variation in Human Growth*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 483 p.
- EVERSHERD (R.P.), DUDD (S.N.), ANDERSON-STOJANOVIC (V.R.), GEBHARD (E.R.) 2003, New chemical evidence for the use of combed ware pottery vessels as beehives in Ancient Greece, *Journal of Archaeological Science* 30: 1-12.
- EVERSHERD (R.P.), HERON (C.), CHARTERS (S.), GOAD (L.J.) 1992, The survival of food residues: new methods of analysis, interpretation and application, *Proceeding of the British Academy* 77: 187-208.
- EZZO (J.A.) 1992, A test of diet versus diagenesis at Ventana Cave, Arizona, *Journal of Archaeological Science* 19: 23-37.
- EZZO (J.A.), LARSEN (C.S.), BURTON (J.H.) 1995, Elemental signatures of human diets from the Georgia Bight, *American Journal of Physical Anthropology* 98: 471-481.

- FAIRGREIVE (S.I.), OOST (T.S.) 1995, On a test of the multifactorial aging method by Bedford *et al.* (1993), *American Journal of Physical Anthropology* 97: 83-85.
- FAULKNER (C.T.) 1991, Prehistoric diet and parasitic infection in Tennessee: Evidence from the analysis of desiccated human paleofeces, *American Antiquity* 56, 4: 687-700.
- FAZEKAS (I.G.), KÓSA (F.) 1978, *Forensic Fetal Osteology*, Akademiai Kiado, Budapest, 407 p.
- FEREMBACH (D.), SCHWIDETSKY (I.), STLOUKAL (M.) 1979, Recommandations pour déterminer l'âge et le sexe sur le squelette, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris, série XIII*, 6 : 7-45.
- FILDES (V.) 1995, The culture and biology of breastfeeding: an historical review of Western Europe, in P. Stuart-Macadam, K.A. Dettwyler (eds), *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*, Aldine de Gruyter, Hawthorne, New-York, p. 101-125.
- FIZET (M.) 1992, *Biogéochimie isotopique (¹³C et ¹⁵N) du collagène des Vertébrés : contribution à l'étude d'un paléo-écosystème anthropique du Pléistocène Supérieur (Marillac, Charente)*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, vol. 1, 136 p.
- FIZET (M.), MARIOTTI (A.), BOCHERENS (H.), LANGE-BADRÉ (B.), VANDERMEERSCH (B.), BOREL (J.-P.), BELLON (G.) 1995, Effect of diet and climate on carbon and nitrogen stable isotopes of collagen in a late Pleistocene anthropic palaeoecosystem: Marillac, Charente, France, *Journal of Archaeological Science* 22: 67-79.
- FLANDRIN (J.-L.) 1984, *Familles, Parenté, Maison, Sexualité dans l'ancienne société*, Éditions du Seuil, Paris, 334 p.
- FLANDRIN (J.-L.) 1999, *Tables d'hier, tables d'ailleurs*, Odile Jacob, Paris, 480 p.
- FLANDRIN (J.-L.), MONTANARI (M.) 1996, *Histoire de l'alimentation*, Éditions Fayard, Paris, 915 p.
- FOGEL (M.L.), TUROSS (N.), OWSLEY (D.W.) 1989, Nitrogen isotope tracers of human lactation in modern and archaeological populations, *Annual Report of the Direction, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution, Washington*, p. 111-117.
- FOX (C.L.), JUAN (J.), ALBERT (R.M.) 1996, Phytolith analysis on dental calculus, enamel surface, and burial soil: information about diet and environment, *American Journal of Physical Anthropology* 101: 101-113.
- FRICKE (H.C.), O'NEIL (J.R.) 1996, Inter- and intra-tooth variation in the oxygen isotope composition of mammalian tooth enamel: some implications for paleoclimatology and paleobiological research, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 126: 91-100.
- FROMENT (A.), AMBROSE (S.H.) 1995, Analyses tissulaires isotopiques et reconstruction du régime alimentaire en milieu tropical : implications pour l'archéologie, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris, n.s.*, 7, 3-4 : 79-98.
- FRY (G.F.) 1985, Analysis of fecal material, in R.I. Gilbert, J.H. Mielke (eds), *The Analysis of Prehistoric Diets*, Academic Press, New-York, p. 127-154.
- GARVIE-LOK (S.J.) 2001, *Loaves and Fishes: A Stable Reconstruction of Diet in Medieval Greece*, Unpublished PhD Thesis, Department of Archaeology, Calgary, Alberta, 554 p.

- GENET (J.-P.) 1991, *Le Monde au Moyen Âge*, Carré Histoire, Hachette Supérieur, 271 p.
- GILLET (P.) (dir.) 1994, *Mémoires lactées, Blanc, bu, biblique : le lait du monde*, Autrement, Coll. Mutations/Mangeurs n° 143, Paris, 222 p.
- GOODMAN (A.H.), ARMELAGOS (G.J.), ROSE (J.C.) 1980, Enamel hypoplasias as indicators of stress in three prehistoric populations from Illinois, *Human Biology* 52, 3: 515-528.
- GOODMAN (A.H.), DUFOUR (D.L.), PELTO (G.H.) 2000, *Nutritional Anthropology, Biocultural Perspectives on Food and Nutrition*, Mayfield Publishing Company, Mountain View, 392 p.
- GOODMAN (A.H.), MARTIN (D.), ARMELAGOS (G.J.), CLARK (G.) 1984, Indications of stress from bone and teeth, in M. Cohen, G. Armelagos (eds), *Paleopathology at the Origins of Agriculture*, Academic Press, Orlando, p. 13-49.
- GOODMAN (A.H.), ROSE (J.C.) 1990, Assessment of systematic physiological perturbations from dental enamel hypoplasias and associated histological structure, *Yearbook of Physical Anthropology* 33: 59-110.
- GOODMAN (A.H.), THOMAS (R.B.), SWEDLUND (A.C.), ARMELAGOS (G.J.) 1988, Biocultural perspectives on stress in prehistoric, historical, and contemporary population research, *Yearbook of Physical Anthropology* 31: 169-202.
- GORDON (C.C.), BUIKSTRA (J.E.) 1981, Soil pH, bone preservation, and sampling bias at mortuary sites, *American Antiquity* 46, 3: 566-571.
- GRANTHAM (B.J.) 2000, Quasrin and the Druze, A cuisine-based model of bone distributions on archaeological sites, *Near Eastern Archaeology* 63, 1: 9-19.
- GREENFIELD (H.J.) 1988, The origins of milk and wool production on the Old World: a zooarchaeological perspective from the Central Balkans, *Current Anthropology* 29, 4: 573-593.
- GRUPE (G.), DRESES-WERRINGLOER (H.), PARSHE (F.) 1993, Initial stages of bone decomposition: causes and consequences, in J.B. Lambert, G. Grupe (eds), *Prehistoric Human Bone, Archaeology at the Molecular Level*, Springer-Verlag, Vienna, p. 257-274.
- GRUPE (G.), PIEPENBRINK (H.) 1989, Impact of microbial activity on trace element concentrations in excavated bones, *Applied Geochemistry* 4: 293-298.
- GRUPE (G.), PRICE (T.D.), SCHRÖTE (R.), SÖLLNER (F.), JOHNSON (C.M.), BEARD (B.L.) 1997, Mobility of Bell Beaker people revealed by strontium isotope ratios of tooth and bone: A study of southern Bavarian skeletal remains, *Applied Geochemistry* 12: 517-525.
- GUILLON (M.) 1997, *Anthropologie de terrain et paléodémographie : études méthodologiques sur les grands ensembles funéraires, Application au cimetière médiéval de Tournedos-Portejoie (Eure)*, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 291 p.
- GUY (H.), MASSET (C.), BAUD (C.-A.) 1997, Infant taphonomy, *International Journal of Osteoarchaeology* 7: 221-229.
- HÄGG (U.), TARANGER (J.) 1991, Weight and height velocity in early, average and late maturers followed to the age of 25: A prospective longitudinal study of Swedish urban children from birth to adulthood, *Annals of Human Biology* 18, 1: 47-56.
- HALL (R.L.) 1967, Those late corn dates: isotopic fractionation as a source of

- error in carbon-14 dates, *Michigan Archaeologist* 13, 4: 171-180.
- HALSTEAD (P.) 1996, Pastoralism or household herding? Problems of scale and specialization in early Greek animal husbandry, *World Archaeology* 28, 1: 20-43.
- HANIHARA (K.), SUZUKI (T.) 1978, Estimation of age from the symphysis by means of multiple regression analysis, *American Journal of Physical Anthropology* 48: 233-240.
- HARE (P.E.), Von ENDT (D.) 1990, Variable preservation of organic matter in fossil bone, *Annual Report of the Direction 1989-1990, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution, Washington*, p. 115-118.
- HARRIS (M.), ROSS (E.B.) 1988, *Food and Evolution, Toward a theory of human food habits*, Temple University Press, Philadelphia, 633 p.
- HARTNADY (P.), ROSE (J.C.) 1991, Abnormal tooth-loss patterns among archaic-period inhabitants of the Lower Pecos region, Texas, in M.A. Kelley, C.S. Larsen (eds), *Advances in Dental Anthropology*, Wiley-Liss, New York, p. 267-278.
- HASTORF (C.A.), DENIRO (M.J.) 1985, Reconstruction of prehistoric plant production and cooking practices by a new isotopic method, *Nature* 315: 489-490.
- HATCH (J.W.), GEIDEL (R.A.) 1985, Status-specific dietary variation in two world cultures, *Journal of Human Evolution* 14: 469-476.
- HATHER (J.G.) 1992, The archaeobotany of subsistence in the Pacific, *World Archaeology* 24, 1: 71-81.
- HAUSPIE (R.), BIELICKI (T.), KONIAREK (J.) 1991, Skeletal maturity at onset of the adolescent growth spurt and at peak velocity for growth in height: A threshold effect? *Annals of Human Biology* 18, 1: 23-29.
- HAYES (J.M.) 1982, Fractionation: An introduction to isotopic measurements and terminology, *Spectra* 8: 3-8.
- HEATON (T.H.E.) 1987, The $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios of plants in South Africa and Namibia: Relationship to climate and coastal/saline environments, *Oecologia* 74: 236-246.
- HEIDER (K.G.) 1972, Environment, subsistence, and society, *Annual Review of Anthropology* 1: 207-226.
- HERRING (D.A.), SAUNDERS (S.R.), KATZENBERG (M.A.) 1998, Investigating the weaning process in past populations, *American Journal of Physical Anthropology* 105: 425-439.
- HERRSCHER (E.) 2001, *Contribution de l'analyse paléoépidémiologique et paléobiogéochimique à la connaissance de la santé et de l'alimentation à la fin du Moyen Âge, Église Saint-Laurent de Grenoble (XIII^e-XV^e s., Isère ; France)*, Thèse de Doctorat, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 335 p.
- HERRSCHER (E.) 2002, Évolution des comportements alimentaires à Grenoble durant la fin du Moyen Âge, Analyse d'une documentation ostéologique, in G. Boëtsch (éd.), *Populations, sociétés et patrimoines dans les milieux alpins*, Actes de l'Université européenne d'été 2002, CDDP, Gap, p. 34-44.
- HERRSCHER (E.), BOCHERENS (H.), VALENTIN (F.) 2002, Reconstitution des comportements alimentaires aux époques historiques en Europe à partir de l'analyse isotopique d'ossements humains, *Revue Belge de Philologie et d'Histoire* 80, 4 : 1403-1422.

- HERRSCHER (E.), BOCHERENS (H.), VALENTIN (F.), COLARDELLE (R.) 2001, Comportements alimentaires au Moyen Âge à Grenoble : application de la biogéochimie isotopique à la nécropole Saint-Laurent (XIII^e-XV^e s., Isère, France), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (série III, Sciences de la vie) 324 : 479-487.
- HERRSCHER (E.), VALENTIN (F.) (sous presse), Biométrie de la croissance et état nutritionnel à Saint-Laurent de Grenoble (XIII^e-XV^e siècles, France), in Y. Ardagna, G. Boëtsch, O. Dutour, L. Lalys, M. Signoli (éds), *L'homme et ses images*, Actes du XXV^e Colloque International du G.A.L.F., 2001, Marseille.
- HILLSON (S.) 1996, *Dental anthropology*, Cambridge University Press, Cambridge, 373 p.
- HILLSON (S.W.) 1979, Diet and dental disease, *World Archaeology* 11: 147-162.
- HOBSON (K.A.), ALISKAUSAS (R.T.), CLARK (R.G.) 1993, Stable-nitrogen isotope enrichment in avian tissues due to fasting and nutritional stress: implications for isotopic analysis of diet, *Condor* 95: 388-394.
- HOBSON (K.A.), CLARK (R.G.) 1992, Assessing avian diets using stable isotopes II: factors influencing diet-tissue fractionation, *Condor* 94: 189-197.
- HOBSON (K.A.), SEASE (J.L.) 1998, Stable isotope analyses of tooth annuli reveal temporal dietary records: An example using stellar sea lions, *Marine Mammal Science* 14, 1: 116-129.
- HOFFMAN (B.W.), CZEDERPILTZ (J.M.C.), PARTLOW (M.A.) 2000, Heads or tails: the archaeology of Aleut salmon storage on Unimak Island, Alaska, *Journal of Archaeological Science* 27: 699-708.
- HOLDEN (T.G.) 1991, Evidence of prehistoric diet from northern Chile: coprolites, gut contents and flotation samples from the Tulan Quebrada, *World Archaeology* 22, 3: 320-331.
- HORROCKS (M.), JONES (M.D.), CARTER (J.A.), SUTTON (D.G.) 2000, Pollen and phytoliths in stone mounds at Pouerua, Northland, New Zealand: implications for the study of Polynesian farming, *Antiquity* 74: 863-872.
- HUSS-ASHMORE (R.), GOODMAN (A.H.), ARMELAGOS (G.J.) 1982, Nutritional inference from paleopathology, in M. Schiffer (ed.), *Advances in Archaeological Method and Theory* 5, Academic Press, New York, p. 395-474.
- IACUMIN (P.) 1996, *Abondance isotopique (¹³C, ¹⁵N, ¹⁸O) de mammifères fossiles : implication pour les régimes alimentaires et les environnements dans la zone méditerranéenne et nilotique depuis 650 000 ans*, Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 267 p.
- ISCAN (M.Y.) 1989, *Age markers in the human skeleton*, Charles Thomas Publisher, Alan R. Liss Inc., New York, 359 p.
- ISCAN (M.Y.), LOTH (S.R.), WRIGHT (R.W.) 1984, Metamorphosis at the sternal rib end: a new method to estimate age at death in white males, *American Journal of Physical Anthropology* 65: 147-156.
- JOANNE (A.) 1870, *Département de l'Isère*, Éditions Hachette, Paris, 132 p.
- JOHANSEN (O.V.), GULLIKSEN (S.), NYDAL (R.) 1986, $\delta^{13}\text{C}$ and diet: analysis of Norwegian human skeletons, *Radiocarbon* 28, 2A: 754-761.
- JONES (P.D.) 1990, Le climat des mille dernières années, *La Recherche* 21 : 304-312.

- JONES (R.J.), LUDLOW (M.M.), TROUGHTON (J.H.), BLUNT (C.G.) 1981, Changes in natural carbon isotope ratios of the hair from steers fed diets of C₄, C₃, species in sequence, *Search* 12: 85-87.
- KAPLAN (S.) 1996, *Le meilleur pain du monde, Les boulangers de Paris au XVIII^e siècle*, Éditions Fayard, Paris, 750 p.
- KATZ (D.), SUCHEY (J.M.) 1986, Age determination of the male pubis symphyseal aging patterns in the male, *American Journal of Physical Anthropology* 69: 427-435.
- KATZENBERG (M.A.) 1984, *Chemical analysis of prehistoric human bone from five temporally distinct populations in Southern Ontario*, Series Archaeological Survey of Canada, Paper 129, 145 p.
- KATZENBERG (M.A.) 1989, Stable isotope analysis of archaeological faunal remains from Southern Ontario, *Journal of Archaeological Science* 16: 319-329.
- KATZENBERG (M.A.) 1993, Age difference and population variation in stable isotope values from Ontario, Canada, in J.B. Lambert, G. Grupe (eds), *Prehistoric Human Bone, Archaeology at the Molecular Level*, Springer-Verlag, Vienna, p. 39-62.
- KATZENBERG (M.A.) 2000, Stable isotope analysis: a tool for studying past diet, demography, and life history, in M.A. Katzenberg, S.R. Saunders (eds), *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, Wiley-Liss Inc., New York, p. 305-327.
- KATZENBERG (M.A.), HARRISON (R.G.) 1997, What's in a bone? Recent advances in archaeological bone chemistry, *Journal of Archaeological Research* 5: 265-293.
- KATZENBERG (M.A.), HERRING (A.), SAUNDERS (S.R.) 1996, Weaning and infant mortality: evaluating the skeletal evidence, *Yearbook of Physical Anthropology* 39: 177-199.
- KATZENBERG (M.A.), LOVELL (N.C.) 1999, Stable isotope in pathological bone, *International Journal of Osteoarchaeology* 9, 5: 316-324.
- KATZENBERG (M.A.), SAUNDERS (S.R.), FITZGERALD (W.R.) 1993, Age differences in stable carbon and nitrogen isotope ratios in a population of Prehistoric maize horticulturists, *American Journal of Physical Anthropology* 90: 267-281.
- KATZENBERG (M.A.), SCHWARCZ (H.P.), KNYF (M.), MELBYE (J.F.) 1995, Stable isotope evidence for maize horticulture and paleodiet in Southern Ontario, Canada, *American Antiquity* 60, 2: 335-350.
- KEEGAN (W.F.), DENIRO (M.J.) 1988, Stable carbon- and nitrogen-isotope ratios of bone collagen used to study coral-reef and terrestrial components of prehistoric Bahamian diet, *American Antiquity* 53, 2: 320-336.
- KEENLEYSIDE (A.), SONG (X.), CHETTLE (D.R.), WEBBER (C.E.) 1996, The lead content of human bones from the 1845 Franklin Expedition, *Journal of Archaeological Science* 23: 461-465.
- KENNEDY (B.V.), KROUSE (H.R.) 1989, Isotope fractionation by plants and animals, implications for nutrition research, *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 68: 960-972.
- KLEPINGER (L.L.) 1984, Nutritional assessment from bone, *Annual Review of Anthropology* 13: 75-96.
- KLEPINGER (L.L.) 1992, Innovative approaches to the study of past human health and subsistence strategies, in S.R. Saunders, M.A. Katzenberg (eds), *Skeletal Biology of Past Peoples, Research Methods*, Wiley-Liss Inc., New York, p. 121-130.

- KLEPINGER (L.L.), KUHN (J.K.), WILLIAMS (W.S.) 1986, An elemental analysis of archaeological bone from Sicily as a test of predictability of diagenetic change, *American Journal of Physical Anthropology* 70: 325-331.
- KOCH (P.L.), BEHRENSMEYER (A.K.), TUROSS (N.), FOGEL (M.L.) 1990, Isotopic fidelity during bone weathering and burial, *Annual Report of the Direction 1989-1990, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution*, p. 105-110.
- KOCH (P.L.), FISHER (D.C.), DETTMAN (D.) 1989, Oxygen isotope variation in the tusks of extinct proboscideans: a measure of season of death and seasonality, *Geology* 17: 515-519.
- KRUEGER (H.W.), SULLIVAN (C.H.) 1984 Models for carbon isotope fractionation between diet and bone, in J.R. Turnlund, P.E. Johnson (eds), *Stable Isotopes in Nutrition*, American Chemical Society, Washington DC, p. 205-220.
- LAMBERT (J.B.), SZPUNAR (C.B.), BUIKSTRA (J.E.) 1979, Chemical analysis of excavated human bone from middle and late Woodland sites, *Archaeometry* 21: 115-129.
- LARSEN (C.S.) 1987, Bioarchaeological interpretations of subsistence economy and behavior from human skeletal remains, in M.B. Schiffer (ed.), *Advances in Archaeological Method and Theory* 10, Academic Press, San Diego, p. 339-345.
- LARSEN (C.S.) 1995, Biological changes in human populations with agriculture, *Annual Review of Anthropology* 24: 185-213.
- LARSEN (C.S.) 1997, *Bioarchaeology, Interpreting Behavior from the Human Skeleton*, Cambridge University Press, Cambridge, 461 p.
- LARSEN (C.S.) 2000, Dietary reconstruction and nutritional assessment of past peoples: the bioanthropological record, in K.F. Kiple, K.C. Ornelas (eds), *The Cambridge World History of Food*, vol. 1, Cambridge University Press, New York, p. 13-34.
- LARSEN (C.S.), GRIFFIN (M.G.), HUTCHINSON (D.L.), NOBLE (V.E.), NORR (L.), PASTOR (R.F.), RUFF (C.B.), RUSSELL (K.F.), SCHOENINGER (M.J.), SCHULTZ (M.), SIMPSON (S.W.), TEAFORD (M.F.) 2001, Frontiers of contact: bioarchaeology of Spanish Florida, *Journal of World Prehistory* 15, 1: 69-123.
- LARSEN (C.S.), SCHOENINGER (M.J.), VAN DER MERWE (N.J.), MOORE (K.M.), LEETHORP (J.A.) 1992, Carbon and nitrogen isotopic signatures of human dietary change in the Georgia Bight, *American Journal of Physical Anthropology* 89: 197-214.
- LARSEN (C.S.), SHAVIT (R.), GRIFFIN (M.C.) 1991, Dental caries evidence for dietary change: An archaeological context, in M.A. Kelley, C.S. Larsen (eds), *Advances in Dental Anthropology*, Wiley-Liss, New York, p. 179-202.
- LAURIOUX (B.) 1985, Spices in the Medieval diet: a new approach, *Food and Foodways* 1, 1: 43-76.
- LAURIOUX (B.) 2002, *Manger au Moyen Âge : pratiques et discours alimentaires en Europe aux XIV^e et XV^e siècles*, Hachette Littératures, Paris, 298 p.
- LECERF (J.-M.) 1996, *La Nutrition*, Les Classiques Santé, Éditions Privat, Toulouse, 157 p.
- LEE (R.B.) DEVORE (I.) 1987, *Man The Hunters*, Aldine de Gruyter, New York, 415 p.

- LE ROY-LADURIE (E.) 1983, *Histoire du climat depuis l'an Mil*, Éditions Flammarion, Paris, vol. 1, 287 p., vol. 2, 254 p.
- LIBBY (W.F.), BERGER (R.), MEAD (J.F.), ALEXANDER (G.V.), ROSS (J.F.) 1964, Replacement rates for human tissue from atmospheric radiocarbon, *Science* 146: 1170-1172.
- LIVERSIDGE (H.M.) 1995, Crown formation times of the permanent dentition and root extension rate in humans, in J. Moggi-Cecchi (ed.), *Aspects of Dental Biology, Palaeontology, Anthropology and Evolution*, International Institute for the study of Man, Florence, p. 267-275.
- LIVERSIDGE (H.M.) 1998, Dental age estimation of non-adults, A review of methods and principles, in K.W. Alt, F.W. Rösing, M. Teschla-Nicola (eds), *Dental Anthropology, Fundamentals, Limits and Prospects*, Springer-Verlag, Vienna, p. 415-425.
- LIVERSIDGE (H.M.), DEAN (H.C.), MOLLESON (T.I.) 1993, Increasing human teeth length between birth and 5-4 years, *American Journal of Physical Anthropology* 90: 307-313.
- LONGIN (R.) 1971, New method of collagen extraction for radiocarbon dating, *Nature* 230: 241-242.
- LOUX (F.) 1978, *Le jeune enfant et son corps dans la médecine traditionnelle*, Éditions Flammarion, Paris, p. 173-174.
- LOVEJOY (C.O.) 1985, Dental wear in the Libben population: its functional pattern and role in the determination of adult skeletal age at death, *American Journal of Physical Anthropology* 68: 47-56.
- LOVEJOY (C.O.), MEINDL (R.S.), PRYSBECK (T.R.), MENSFORTH (R.P.) 1985, Chronological metamorphosis of the auricular surface of the ilium: a new method for the determination of adult skeletal age at death, *American Journal of Physical Anthropology* 68: 15-28.
- LOVELL (N.C.), NELSON (D.E.), SCHWARCZ (H.P.) 1986, Carbon isotope ratios in paleodiet: lack of age or sex effect, *Archaeometry* 28: 51-55.
- LYNOTT (M.J.), BOUTTON (T.W.), PRICE (J.E.), NELSON (D.E.) 1986, Stable carbon isotopic evidence for maize agriculture in Southeast Missouri and Northeast Arkansas, *American Antiquity* 51, 1: 51-65.
- MACKO (S.A.), ENGEL (M.H.), ANDRUSEVICH (V.), LUBEC (G.), O'CONNELL (T.C.), HEDGES (R.E.M.) 1999, Documenting the diet in ancient human populations through stable isotope analysis of hair, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 354: 65-76.
- MACKO (S.A.), UHLE (M.E.), ENGEL (M.H.), ANDRUSEVICH (V.) 1997, Stable nitrogen isotopes analysis of amino acid enantiomer by gas chromatography/combustion/isotope ratio mass spectrometry, *Analytical Chemistry* 69, 5: 926-929.
- MAJO (T.), TILLIER (A.-M.), BRUZEK (J.) 1993, Test des fonctions discriminantes de Schutkowski impliquant l'ilium pour la détermination du sexe dans des séries d'enfants de sexe et d'âge connus, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s., 5 : 61-68.
- MARIOTTI (A.) 1983, Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural ¹⁵N abundance measurements, *Nature* 303: 685-687.
- MARIOTTI (A.), MARIOTTI (F.), AMARGER (N.), PIZELLE (G.), NGAMBI (J.), CHAMPIGNY (M.), MOYSE (A.) 1980, Fractionnements isotopiques de l'azote

- lors des processus d'absorption des nitrates et de fixation de l'azote atmosphérique par les plantes, *Physiologie Végétale* 18 : 163-181.
- MASSET (C.) 1982, *Estimation de l'âge au décès par les sutures crâniennes*, Thèse d'État, Université Paris VII, 301 p.
- MAYS (S.A.) 1997, Carbon stable isotope ratios in Mediaeval and Later skeletons from Northern England, *Journal of Archaeological Science* 24: 561-567.
- MEILKEJOHN (C.), CONSTANDSE-WESTERMANN (T.S.) 1978, The human skeletal material from Swifterbant, earlier Neolithic of the Northern Netherlands, I. Inventory and demography: final reports on Swifterbant I, *Palaeohistoria* XX: 39-89.
- MINAGAWA (M.), WADA (E.) 1984, Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48: 1135-1140.
- MINSON (D.J.), LUDLOW (M.M.), TROUGHTON (J.H.) 1975, Differences in natural carbon isotope ratios of milk and hair from cattle grazing tropical and temperate pastures, *Nature* 256: 602.
- MOLLESON (T.), COX (M.), WALDRON (A.H.), WHITTAKER (D.K.) 1993, *The Spitalfields Project, vol. 2: The anthropology, The Midling sort*, CBA Research Report 86, Council for British Archaeology, 231 p.
- MOLLESON (T.), JONES (K.) 1991, Dental evidence for dietary changes at Abu Hureyra, *Journal of Archaeological Science* 24: 455-468.
- MOLLESON (T.), JONES (K.), JONES (S.) 1992, Dietary changes and the effects of food preparation on microwear patterns in the Late Neolithic of Abu Hureyra, Northern Syria, *Journal of Human Evolution* 24: 455-468.
- MOLNAR (S.) 1972, Tooth wear and culture: a survey of tooth functions among some prehistoric populations, *Current Anthropology* 13, 5: 511-526.
- MONTANARI (M.) 1995, *La faim et l'abondance, Histoire de l'alimentation en Europe*, Éditions du Seuil, Paris, 289 p.
- MONTANARI (M.) 1996, Structures de production et systèmes alimentaires, in J.L. Flandrin, M. Montanari (éds), *Histoire de l'alimentation*, Éditions Fayard, Paris, p. 283-293.
- MOORREES (C.F.A.), FANNING (E.A.), HUNT (E.E.) 1963, Age variation of formation stages for ten permanent teeth, *Journal of Dental Research* 42, 6: 1490-1502.
- MOREL (M.-F.) 1995, Histoire de l'enfant dans la France ancienne (XVI^e-XIX^e siècle), *Études Freudiennes* 36 : 244.
- MURAIL (P.) 1996, *Biologie et pratiques funéraires des populations d'époque historique : une démarche méthodologique appliquée à la nécropole gallo-romaine de Chantambre (Essonne)*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 264 p.
- MURAIL (P.), BRUZEK (J.), BRAGA (J.) 1999, A new approach to sexual diagnosis in past populations, Practical adjustments from van Vark's procedure, *International Journal of Osteoarchaeology* 9: 39-53.
- NAKAMURA (K.), SCHOELLER (D.A.), WINKLER (F.J.), SCHMIDT (H.L.) 1982, Geographical variations in the carbon isotope content of the diet and hair of contemporary man, *Biomedical Mass Spectrometry* 9: 390-394.
- NELSON (K.), DENIRO (M.J.), SCHOENINGER (M.J.), DE PAOLO (D.) 1986, Effects of diagenesis on strontium, carbon, nitrogen and oxygen concentration and isotopic composition of bone, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50: 1941-1949.

- O'CONNELL (T.C.), HEDGES (R.E.M.) 1999, Investigations into the effect of diet on modern human hair isotopic values, *American Journal of Physical Anthropology* 108: 409-425.
- ORTNER (D.), PUTSCHAR (W.) 1985, *Identification of Pathological Conditions in Human Skeleton Remains*, Smithsonian Institution Press, Washington DC, 488 p.
- ORTNER (D.J.), THEOBALD (G.) 2000, Paleopathological evidence of malnutrition, in K.F. Kiple, K.C. Ornelas (eds), *The Cambridge World History of Food*, vol. 1, Cambridge University Press, New York, p. 34-44.
- PATE (F.D.) 1994, Bone chemistry and paleodiet, *Journal of Archaeological Method and Theory* 1, 2: 161-209.
- PATOU-MATHIS (M.) 1996, Les relations Homme-Animal, in C. Guérin, M. Patou-Mathis (éds), *Les grands mammifères Plio-Pleistocènes d'Europe*, Éditions Masson, Paris, p. 255-282.
- PATTERSON (D.K.) 1984, A diachronic study of dental palaeopathology and attritional status of Prehistoric Ontario Pre-Iroquois and Iroquois populations, *Archaeological Survey of Canada*, Paper 122, 428 p.
- PATURET (G.) 1951, *Traité d'Anatomie Humaine, Tome II : Membres Supérieur et Inférieur*, Éditions Masson, Paris, 1124 p.
- PERKINS (D.), DALY (P.) 1968, A hunter's village in Neolithic Turkey, *Scientific American* 219: 96-106.
- PETERSON (B.J.), FRY (B.) 1987, Stable isotopes in ecosystem studies, *Annual Review of Ecology and Systematics* 18: 293-320.
- POLET (C.) 1996, *Essai de paléonutrition appliqué à trois populations médiévales belges*, Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, 182 p.
- POLET (C.), KATZENBERG (M.A.) 2003, Reconstruction of the diet in a Mediaeval Monastic community from the Coast of Belgium, *Journal of Archaeological Science* 30, 5: 525-533.
- POLET (C.), ORBAN (R.) 2001, Les dents et les ossements humains, Que mangeait-on au Moyen Âge ? *Typologie des sources du Moyen Âge occidental* 84, Brepols, Turnhout-Belgium, 175 p.
- POLET (C.), ORBAN (R.), HERBOSCH (A.) 2000, Indicateurs de stress et teneurs en éléments traces, Exemple de deux populations médiévales de Belgique, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s., 12, 3-4 : 247-278.
- POULAIN (J.-P.) 2000, *Histoire de la cuisine et des cuisiniers : techniques culinaires et manières de tables en France du Moyen Âge à nos jours*, Lanore, Paris, 160 p.
- PRICE (T.D.) 1989, *The Chemistry of Prehistoric Human Bone*, School of American Research Advanced Seminar Series, Cambridge University Press, Cambridge, 294 p.
- PRICE (T.D.), GRUPE (G.), SCHRÖTER (P.) 1994, Reconstruction of migration patterns in the Bell Beaker period by stable strontium isotope analysis, *Applied Geochemistry* 9: 413-417.
- PRICE (T.D.), JOHNSON (C.M.), EZZO (J.A.), ERICSON (J.), BURTON (J.H.) 1994, Residential mobility in the Prehistoric Southwest United States: A preliminary study using strontium isotope analysis, *Journal of Archaeological Science* 21: 315-330.
- PRICE (T.D.), SCHOENINGER (M.J.), ARMELAGOS (G.J.) 1985, Bone chemistry and past behavior: an overview, *Journal of Human Evolution* 14: 419-447.

- PRIVAT (K.L.), O'CONNELL (T.C.), RICHARDS (M.P.) 2002, Stable isotope analysis of human and faunal remains from the Anglo-Saxon cemetery at Berinsfield, Oxfordshire: dietary and social implications, *Journal of Archaeological Science* 29: 779-790.
- PROSSINGER (H.), WILLMS (C.) 1998, Diet and nutrition in Prehistoric Central Europe, in K.W. Alt, F.W. Rösing, M. Teschler-Nicola (eds), *Dental Anthropology, Fundamentals, Limits and Prospects*, Springer-Verlag, Vienna, p. 315-336.
- PROWSE (T.L.) 2001, *Isotopic and dental evidence for diet from the necropolis of Isola Sacra (1st-3rd centuries AD)*, Italy, McMaster University, Ontario, Unpublished PhD Thesis, 352 p.
- REINHARD (K.J.), GHAZI (A.M.) 1992, Evaluation of lead concentrations in 18th century Omaha Indian skeletons, *American Journal of Physical Anthropology* 89: 183-195.
- RICHARDS (M.P.), HEDGES (R.E.M.), MOLLESON (T.), VOGEL (J.C.) 1998, Stable isotope analysis reveals variations in human diet at the Poundbury Camp Cemetery Site, *Journal of Archaeological Science* 25: 1247-1252.
- RICHARDS (M.P.), MAYS (S.), FULLER (B.T.) 2002, Stable carbon and nitrogen isotope values of bone and teeth reflect weaning age at the Medieval Wharram Percy Site, Yorkshire, UK, *American Journal of Physical Anthropology* 119: 205-210.
- RIERA-MELIS (A.) 1996, Société féodale et alimentation (XII^e-XIII^e s.), in J.L. Flandrin, M. Montanari (éds), *Histoire de l'alimentation*, Éditions Fayard, Paris, p. 397-432.
- RIEUTORT (M.) 1993, *Physiologie animale : 2, Les grandes fonctions*, 2^e tirage, Abrégés, Éditions Masson, Paris, 281 p.
- RODIÈRE (E.) 1995, *Variation des abondances isotopiques naturelles au sein d'une population de chevreuils (Capreolus capreolus L.)*, Mémoire du DEA « Biodiversité, génétique et évolution », Universités Paris VI, Paris VII, Paris IX, Muséum d'Histoire Naturelle, 36 p.
- RODIÈRE (E.), BOCHERENS (H.), ANGIBAULT (J.-M.), MARIOTTI (A.) 1996, Particularités isotopiques de l'azote chez le chevreuil (*Capreolus capreolus L.*) : implications pour les reconstitutions paléoenvironnementales, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences série IIa*, 323 : 179-185.
- ROSE (J.C.), CONDON (K.W.), GOODMAN (A.H.) 1985, Diet and dentition: development disturbances, in R.I. Gilbert, J.H. Mielke (eds), *The Analysis of Prehistoric Diets*, Academic Press, New York, p. 281-305.
- ROTH (J.D.), HOBSON (K.A.) 2000, Stable carbon and nitrogen isotopic fractionation between diet and tissue of captive red fox: implications for dietary construction, *Canadian Journal of Zoology* 78: 848-852.
- ROUVIÈRE (H.) 1974, *Anatomie humaine descriptive, topographique et fonctionnelle, t. II : Tronc*, 11^e Édition, Éditions Masson, Paris, 686 p.
- RUHL (D.L.) 1997, Oranges and wheat: Spanish attempts agriculture in La Florida, *Historical Archaeology* 31, 1: 36-45.
- SAKAMOTO (S.) 1982, Bone, in J.B. Weiss, M.I.V. Jayson (eds), *Collagen in Health and Disease*, Churchill Livingstone, Edinburgh, p. 362-375.
- SANDFORD (M.K.), VAN GERVEN (D.P.), MEGLEN (R.R.) 1983, Elemental hair analysis: new evidence on the etiology of *Cribra orbitalia* in Sudanese Nubia, *Human Biology* 55, 4: 831-844.

- SANDFORD (M.K.), WEAVER (D.S.) 2000, Trace element research in anthropology: new perspectives and challenges, in M.A. Katzenberg, S.R. Saunders (eds), *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, Wiley-Liss Inc., New York, p. 329-350.
- SANSILBANO-COLLILIEUX (M.) 1994, *Biologie et espace funéraire au Moyen Âge, Les nécropoles de l'ancien évêché de Poitiers (fin IV^e s.) et Saint-Martin-de-Cognac (VII^e-XV^e s.)*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 2 tomes, 342 p.
- SAUNDERS (S.R.), FITZGERALD (C.), ROGERS (T.), DUDAR (C.), MCKILLOP (H.) 1992, A test of several methods of skeletal age estimation in a documented archaeological sample, *Canadian Society of Forensic Sciences* 25, 2: 97-117.
- SCHOENINGER (M.J.) 1979, Diet and status at Chalcatzingo: some empirical and technical aspects of strontium analysis, *American Journal of Physical Anthropology* 51: 295-310.
- SCHOENINGER (M.J.) 1982, Diet and the evolution of modern form in the Middle East, *American Journal of Physical Anthropology* 58: 37-52.
- SCHOENINGER (M.J.), DENIRO (M.J.) 1984, Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals, *Geochimica and Cosmochimica Acta* 48: 625-639.
- SCHOENINGER (M.J.), DENIRO (M.J.), TAUBER (H.) 1983, Stable nitrogen isotope ratios of bone collagen reflect marine and terrestrial components of Prehistoric human diet, *Science* 220: 1381-1383.
- SCHOENINGER (M.J.), MOORE (K.M.) 1992, Bone stable isotope studies in archaeology, *Journal of World Prehistory* 6, 2: 247-296.
- SCHOENINGER (M.J.), MOORE (K.M.), MURRAY (M.L.), KINGSTON (J.D.) 1989, Detection of bone preservation in archaeological and fossil samples, *Applied Geochemistry* 4: 281-292.
- SCHURR (M.R.) 1992, Isotopic and mortuary variability in a middle Mississippian population, *American Antiquity* 57, 2: 300-320.
- SCHURR (M.R.) 1997, Stable nitrogen isotopes as evidence for the age of weaning at the Angel Site: A comparison of isotopic and demographic measures of weaning age, *Journal of Archaeological Science* 24: 919-927.
- SCHURR (M.R.) 1998, Using stable nitrogen-isotopes to study weaning behavior in past populations, *World Archaeology* 30, 2: 327-342.
- SCHUTKOWSKI (H.) 1993, Sex determination of infant and juvenile skeletons: I, Morphognostic features, *American Journal of Physical Anthropology* 90: 199-205.
- SCHUTKOWSKI (H.), HERRMANN (B.), WIEDEMANN (F.), BOCHERENS (H.), GRUPE (G.) 1999, Diet, status and composition at Weingarten: trace element and isotope analyses on early medieval skeletal material, *Journal of Archaeological Science* 26: 675-685.
- SCHWARCZ (H.P.), MELBYE (J.), KATZENBERG (M.A.), KNYF (M.) 1985, Stable isotopes in human skeleton of Southern Ontario: reconstructing palaeodiet, *Journal of Archaeological Science* 12: 187-206.
- SCHWARCZ (H.P.), SCHOENINGER (M.J.) 1991, Stable isotope analyses in human nutritional ecology, *Yearbook of Physical Anthropology* 34: 283-321.
- SEALY (J.), ARMSTRONG (R.), SCHRIRE (C.) 1995, Beyond lifetime averages: tracing life histories through isotopic analysis of

- different calcified tissues from archaeological human skeletons, *Antiquity* 69: 290-300.
- SEALY (J.), MORRIS (A.G.), ARMSTRONG (R.A.), MARKELL (A.), SCHRIRE (C.) 1993, An historic skeleton from the slave lodge at Vergelegen, *South African Archaeological Society Goodwin Series* 7: 84-91.
- SEALY (J.), VAN DER MERWE (N.J.) 1986, Isotope assessment and the seasonal-mobility hypothesis in the Southwestern Cape of South Africa, *Current Anthropology* 27, 2: 135-150.
- SEALY (J.C.), VAN DER MERWE (N.J.) 1988, Social, spatial and chronological patterning in marine food use as determined by $\delta^{13}\text{C}$ measurements of Holocene human skeletons from the South-western Cape, South Africa, *World Archaeology* 20, 1: 87-102.
- SEALY (J.C.), VAN DER MERWE (N.J.), LEETHORP (J.A.), LANHAM (J.L.) 1987, Nitrogen isotopic ecology in Southern Africa: implications for environmental and dietary tracing, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51: 2707-2717.
- SEALY (J.), VAN DER MERWE (N.J.), SILLEN (A.), KRUEGER (F.J.), KRUEGER (H.W.) 1991, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ as a dietary indicator in modern and archaeological bone, *Journal of Archaeological Science* 18: 399-416.
- SELLIER (P.) 1996, Paléodémographie et organisation du tumulus, in J.F. Piningre (éd.), *Nécropoles et société au premier âge du Fer : le tumulus de Courtesoult (Haute-Saône)*, Documents d'Archéologie Française 54, p. 137-212.
- SELLIER (P.), TILLIER (A.-M.), BRUZEK (J.) 1997, À la recherche d'une référence pour l'estimation de l'âge des fœtus, nouveau-nés et nourrissons des populations archéologiques européennes, *Anthropologie et Préhistoire* 108 : 75-87.
- SELLSTEDT (H.), ENGRSTRAND (L.), GEJVALL (N.G.) 1966, New application of radiocarbon dating to collagen residue in bones, *Nature* 212, 5062: 572-574.
- SEMPÉ (M.) 1979, *Atlas de la maturation squelettique, ossification séquentielle du poignet et de la main*, SIMEP, Paris, 239 p.
- SHARMAN (A.), THEOPHANO (J.), CURTIS (K.), MESSER (E.) 1991, *Diet and domestic life in society*, Temple University Press, Philadelphia, 287 p.
- SIGNOLI (M.) 1998, *Étude anthropologique de crises démographiques en contexte épidémique, Aspects paléo- et bio-démographiques de la Peste en Provence*, Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II, Faculté de Médecine, 287 p.
- SILLEN (A.) 1981, Strontium and diet at Hayonim Cave, *American Journal of Physical Anthropology* 56: 131-137.
- SILLEN (A.) 1989, Diagenesis of the inorganic phase of cortical bone, in T.D. Price (ed.), *The Chemistry of Prehistoric Human Bone*, School of American Research Advanced Seminar Series, Cambridge University Press, Cambridge, p. 211-229.
- SILLEN (A.), HALL (G.), ARMSTRONG (R.) 1995, Strontium/Calcium ratios (Sr/Ca) and strontium isotopic ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of *Australopithecus robustus* and *Homo sp.* from Swartkrans, *Journal of Human Evolution* 28: 277-285.
- SILLEN (A.), KAVANAGH (M.) 1982, Strontium and paleodietary research: a review, *Yearbook of Physical Anthropology* 76: 49-60.
- SILLEN (A.), SEALY (J.C.), VAN DER MERWE (N.J.) 1989, Chemistry and paleodietary research: no more easy answers, *American Antiquity* 54, 3: 504-512.

- SILLEN (A.), SMITH (P.) 1984, Weaning patterns are reflected in strontium-calcium ratios of juveniles skeletons, *Journal of Archaeological Science* 11: 237-245.
- SMITH (B.N.), EPSTEIN (S.) 1971, Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants, *Plant Physiology* 47: 380-384.
- SMITH (H.B.) 1991, Standards of human tooth formation and dental age assessment, in M.A. Kelley, C.S. Larsen (eds), *Advances in Dental Anthropology*, Wiley-Liss, New York, p. 143-163.
- SOBOTTA (J.) 1994, *Atlas d'Anatomie Humaine, Tome II: Tronc, Viscères et Membres Inférieurs*, in R. Putz, R. Pabst (eds), 3^e édition française, sous la dir. de A. Dhem et A. Gouazé, Éditions Médicales Internationales, Cachan, 400 p.
- STEELE (D.G.), BRAMBLETT (C.A.) 1988, *The anatomy and biology of the human skeleton*, Texas A & M University Press, College station, 291 p.
- STEELE (K.W.), DANIEL (R.M.) 1978, Fractionation of nitrogen isotopes by animals: further complication to the use of variations in the natural abundance of ^{15}N for tracers studies, *Journal of Agricultural Science* 90: 7-9.
- STENHOUSE (M.J.), BAXTER (M.S.) 1976, Glasgow University radiocarbon measurements VIII, *Radiocarbon* 18, 2: 161-171.
- STENHOUSE (M.J.), BAXTER (M.S.) 1979, The uptake of bomb ^{14}C in humans, in R. Berger, O.H.E. Suess (eds), *Radiocarbon Dating*, University of California Press, Los Angeles, p. 324-341.
- STEVENSON (H.) 1924, Age order of epiphyseal union in man, *American Journal of Physical Anthropology* 7: 53-93.
- STOUFF (L.) 1970, *Ravitaillement et alimentation en Provence aux XIV^e et XV^e siècles*, Mouton, Coll. Civilisations et sociétés, Paris, 507 p.
- STUART-MACADAM (P.) 1985, Porotic hyperostosis: Representative of a childhood condition, *American Journal of Physical Anthropology* 66: 391-398.
- STUART-MACADAM (P.) 1989, Porotic hyperostosis: Relationship between orbital and vault lesions, *American Journal of Physical Anthropology* 80: 187-193.
- STUART-MACADAM (P.), DETTWYLER (K.A.) 1995, *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*, Aldine de Gruyter, Hawthorne, New York, 430 p.
- STUART-WILLIAMS LE (Q.), SCHWARCZ (H.P.) 1997, Oxygen isotopic determination of climatic variations using phosphate from beaver bone, tooth enamel and dentine, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 2539-2550.
- TAKAMIYA (H.) 2002, Introductory routes of rice to Japan: an examination of the Southern Route hypothesis, *Asian Perspectives* 40, 2: 209-226.
- TAUBER (H.) 1981, ^{13}C evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark, *Nature* 292: 332-333.
- TEAFORD (M.F.) 1991, Dental microwear, What can tell us about diet and dental function? in M.A. Kelley, C.S. Larsen (eds), *Advances in Dental Anthropology*, Wiley-Liss, New York, p. 341-356.
- TEAFORD (M.F.), LYTTLE (J.D.) 1996, Brief communication: diet induced changes in rates of human tooth microwear: a case study involving stone-ground maize, *American Journal of Physical Anthropology* 100: 143-147.
- TEERI (J.A.), SCHOELLER (D.A.) 1979, $\delta^{13}\text{C}$ values of an herbivore and the ratio of C_3 to C_4 plant carbon in its diet, *Oecologia* 39: 197-200.

- THEUREAU (C.) 1998, La population archéologique de Tours (IV^e-XVII^e s.), Étude anthropologique, *Revue Archéologique du Centre de la France*, 14^e suppl., 86 p.
- TIESZEN (L.L.), BOUTTON (T.W.), TESDAHL (K.G.), SLADE (N.A.) 1983, Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: Implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet, *Oecologia* 57: 32-37.
- TIESZEN (L.L.), FAGRE (T.) 1993, Effect of diet quality and composition on the isotopic composition of respiratory CO_2 , bone, collagen, bioapatite and soft tissues, in J.B. Lambert, G. Grupe (eds), *Prehistoric Human Bone, Archaeology at the Molecular Level*, Springer-Verlag, Vienna, p. 121-155.
- TODD (T.W.) 1920, Age change in the pubic bone I: The white male pubis, *American Journal of Physical Anthropology* 7: 285-334.
- TURNER II (C.G.) 1979, Dental anthropological indicators of agriculture among the Jomon people of central Japan, *American Journal of Physical Anthropology* 51: 619-636.
- UBELAKER (D.H.) 1989, *Human skeletal remains: excavation, analysis, interpretation* 2nd Edition, Smithsonian Institution Press, Washington DC, 172 p.
- UBELAKER (D.H.), KATZENBERG (M.A.), DOYON (L.G.) 1995, Status in Precontact Highland Ecuador, *American Journal of Physical Anthropology* 97: 403-411.
- VALLOIS (H.V.) 1937, La durée de vie chez l'homme fossile, *L'Anthropologie* 47 : 499-532.
- VAN DER MERWE (N.J.) 1982, Carbon isotopes, Photosynthesis and archaeology, *American Scientist* 70, 6: 596-606.
- VAN DER MERWE (N.J.) 1989, Natural variation in ^{13}C concentration and its effect on environmental reconstructing using $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in animal bones, in T.D. Price (ed.), *The Chemistry of Prehistoric Human Bone*, School of American Research Advanced Seminar Series, Cambridge University Press, Cambridge, p. 105-125.
- VAN DER MERWE (N.J.), VOGEL (J.C.) 1978, ^{13}C content of human collagen as a measure of prehistoric diet in Woodland North America, *Nature* 276: 815-816.
- VAN KLINKEN (G.J.) 1999, Bone collagen quality indicators for palaeodietary and radiocarbon measurements, *Journal of Archaeological Science* 26: 687-695.
- VIRGINIA (R.A.), DELWICHE (C.C.) 1982, Natural ^{15}N abundance of presumed N_2 -fixing and non-fixing plants from selected ecosystem, *Oecologia* 54: 317-325.
- VOGEL (J.C.), VAN DER MERWE (N.J.) 1977, Isotopic evidence for early maize cultivation in New York state, *American Antiquity* 42: 238-242.
- VON ENDT (D.W.), ORTNER (D.J.) 1984, Experimental effects of bone size and temperature on bone diagenesis, *Journal of Archaeological Science* 11: 247-253.
- WALKER (P.L.) 1978, A quantitative analysis of dental attrition rates in the Santa Barbara Channel area, *American Journal of Physical Anthropology* 48: 101-106.
- WALKER (P.L.), ERLANDSON (J.M.) 1986, Dental evidence for Prehistoric dietary change on the Northern Channel Islands, California, *American Antiquity* 51, 2: 375-383.
- WALLACE (J.A.) 1974, Approximal grooving of teeth, *American Journal of Physical Anthropology* 40: 385-390.
- WARNOCK (P.) 1998, From plant domestication to phytolith interpretation,

- The history of paleoethnobotany in the Near East, *Near Eastern Archaeology* 61, 4: 238-252.
- WEIDEMANN (F.B.), BOCHERENS (H.), MARIOTTI (A.), VON DEN DRIESCH (A.), GRUPE (G.) 1999, Methodological and archaeological implications of intra-tooth isotopic variations ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) in herbivores from Ain Ghazal (Jordan, Neolithic), *Journal of Archaeological Science* 26: 697-704.
- WEISS (J.B.), AYAD (S.) 1982, An introduction to collagen, in J.B. Weiss, M.I.V. Jayson (eds), *Collagen in Health and Disease*, Churchill Livingstone, Edinburgh, p. 1-17.
- WHITE (C.), SCHWARCZ (H.P.) 1994, Temporal trends in stable isotope for Nubian mummy tissues, *American Journal of Physical Anthropology* 93: 165-187.
- WHITE (C.D.) 1993, Isotopic determination in diet and death from Nubian mummy hair, *Journal of Archaeological Science* 20: 657-666.
- WHITNEY (E.N.), ROLFES (S.R.) 1999, *Understanding Nutrition*, 8th Edition, Wadsworth Publishing Company, Belmont CA, 649 p.
- WRIGHT (L.E.), SCHWARCZ (H.P.) 1998, Stable carbon and oxygen isotopes in human tooth enamel identifying breastfeeding and weaning in prehistory, *American Journal of Physical Anthropology* 106: 1-18.
- WRIGHT (L.E.), SCHWARCZ (H.P.) 1999, Correspondance between stable carbon, oxygen and nitrogen isotopes in human tooth enamel and dentine: infant diets at Kaminaljuyù, *Journal of Archaeological Science* 26: 1159-1170.

ANNEXES

Échantillon	Phase	Espèce	Os total (en g)	Mat. extr. (en mg)	R (en mg.g ⁻¹)	%C	%N	C/N	δ ¹³ C (en ‰)	δ ¹⁵ N (en ‰)
107	13	<i>Bos sp.</i>	0,2542	26,4	104,0	41,0	15,2	3,2	-20,9	4,0
252	14	<i>Bos sp.</i>	0,2529	30,6	121,0	41,3	15,0	3,2	-21,6	4,4
929	15	<i>Bos sp.</i>	0,2844	19,1	67,2	40,2	14,8	3,2	-21,2	6,6
159	15	<i>Ovis sp.</i>	0,2684	10,8	40,2	34,4	16,1	2,5	-21,1	1,7
173	13	<i>Ovis sp.</i>	0,2528	7,6	30,0	36,6	13,6	3,1	-21,0	4,6
522	14	<i>Ovis sp.</i>	0,2502	5,6	22,4	35,4	13,4	3,1	-21,0	4,0
499	15	<i>Gallus sp.</i>	0,2645	-	-	-	-	-	-	-
546	13	<i>Gallus sp.</i>	0,2616	10,7	41,0	38,6	14,2	3,2	-20,1	6,0
RH946	14	<i>Gallus sp.</i>	0,2606	10,3	39,5	38,3	14,1	3,2	-20,0	5,2
RH1140	14	<i>Capra sp.</i>	0,2565	12,9	50,3	38,5	14,3	3,1	-20,0	3,3
RH1168	13	<i>Capra sp.</i>	0,2526	21,9	86,7	40,2	14,8	3,2	-21,5	5,4
306	13	<i>Sus sp.</i>	0,2595	9,3	36,0	37,7	13,9	3,2	-20,4	5,9
RH1177	14	<i>Sus sp.</i>	0,2557	10,1	39,5	33,4	12,4	3,1	-21,0	4,5

(os total : masse de poudre d'os utilisée pour l'extraction de collagène, mat. extr. : masse de collagène extraite, R : rendement d'extraction de collagène, %C, %N : teneurs en carbone et en azote dans le collagène extrait, C/N : rapport carbone sur azote, δ¹³C, δ¹⁵N : abondance isotopique en carbone-13 et en azote-15 du collagène osseux).

Annexe I.1 - Données isotopiques des 13 ossements animaux, Saint-Laurent de Grenoble (cases grisées : échantillons éliminés de la discussion).

Annex I.1—Isotopic data from 13 animal bones, Saint-Laurent de Grenoble (grey squares: samples eliminated from the discussion).

Échantillon	Phase	Sexe	Os total (en g)	Mat. extr. (en mg)	R (en mg.g ⁻¹)	%C	%N	C/N	δ ¹³ C (en ‰)	δ ¹⁵ N (en ‰)
45-1	15	M	0,2620	21,6	82,4	40,4	14,8	3,2	-19,9	10,0
48	15	F	0,2487	34,9	140,3	41,7	15,4	3,2	-19,7	9,3
109	13	F	0,2602	20,4	78,4	39,8	14,7	3,2	-19,7	8,9
110	13	F	0,2536	38,6	152,2	42,0	15,5	3,2	-19,7	9,0
155	15	M	0,2573	22,6	87,8	41,2	15,3	3,1	-19,1	10,8
171	13	M	0,2586	23,8	92,0	40,4	15,0	3,1	-19,5	9,2
255	14	F	0,2530	12,0	47,4	40,3	14,9	3,2	-20,5	7,3
259	14	M	0,2546	11,5	45,2	39,5	14,6	3,1	-19,8	8,6
264	14	F	0,2615	25,3	96,7	42,2	15,5	3,2	-20,4	8,2
267	14	F	0,2609	15,5	58,4	40,7	15,0	3,2	-20,6	6,3
271-1	14	F	0,2570	21,2	82,3	41,8	15,4	3,2	-19,2	8,8
282	13	M	0,2511	13,0	51,8	41,7	15,4	3,2	-20,0	9,0
283	13	M	0,1887	11,6	61,5	35,7	13,4	3,1	-19,8	8,9
287	13	F	0,2563	22,6	88,2	40,8	15,0	3,2	-20,0	8,9
293	13	M	0,2560	11,0	43,0	40,7	15,3	3,1	-20,4	7,8
297	13	M	0,2575	31,5	122,3	42,4	15,5	3,2	-20,0	8,2
463	15	M	0,2581	19,8	76,7	40,4	15,0	3,2	-19,7	9,4
474	14	M	0,2554	20,0	78,3	38,0	14,1	3,1	-19,9	7,4
509	13	F	0,2573	10,6	41,2	39,0	14,8	3,1	-20,5	7,8
523	14	F	0,2596	20,1	77,4	39,0	14,5	3,1	-19,6	9,0
526	14	M	0,2539	25,9	102,0	42,1	15,6	3,2	-19,6	8,9
538	15	M	0,2520	22,2	88,1	41,9	15,4	3,2	-20,4	8,6
621	14	M	0,2514	46,6	185,4	43,5	16,0	3,2	-19,8	10,6
675	15	F	0,2544	45,1	177,3	42,7	15,8	3,1	-19,6	9,4
797	13	F	0,2460	46,7	190,0	42,8	15,9	3,1	-19,6	9,6
1128	15	F	0,2510	13,6	54,2	39,2	14,5	3,2	-20,1	8,3
1129	15	F	0,2531	11,8	46,6	40,1	15,1	3,1	-20,0	8,7
1144	15	F	0,2580	18,2	70,5	41,9	15,7	3,1	-20,4	8,0
1189	13	F	0,2518	24,9	99,0	42,0	15,6	3,1	-20,0	8,7
1337	13	M	0,2527	50,5	199,8	43,3	15,9	3,2	-20,2	7,7
1140-1	14	F	0,2544	29,7	116,7	42,9	15,9	3,1	-20,2	7,9
668-1	15	F	0,1069	9,1	85,1	38,4	14,3	3,1	-20,1	9,1
1187	14	F	0,1053	4,0	38,0	29,3	11,2	3,0	-20,5	7,6
1330	13	M	0,1121	5,9	52,6	34,4	13,0	3,1	-19,8	9,2

(os total : masse de poudre d'os utilisée pour l'extraction de collagène, mat. extr. : masse de collagène extraite, R : rendement d'extraction de collagène, %C, %N : teneurs en carbone et en azote dans le collagène extrait, C/N : rapport carbone sur azote, δ¹³C, δ¹⁵N : abondance isotopique en carbone-13 et en azote-15 du collagène osseux).

Annexe I.2 - Données isotopiques des 34 ossements humains adultes, Saint-Laurent de Grenoble.

Annex I.2—Isotopic data from 34 adult human bones, Saint-Laurent de Grenoble.

Échantillon	Phase	Âge/sexe	Os total (en g)	Mat. extr. (en mg)	R (en mg.g ⁻¹)	%C	%N	C/N	δ ¹³ C (en ‰)	δ ¹⁵ N (en ‰)
71-rF	14	10,5-11,3	0,0515	4,2	81,5	36,0	14,1	3,0	-19,7	8,4
71-osR	14		0,0685	4,6	67,2	36,4	14,1	3,1	-19,7	8,9
71-osN	14		0,0950	5,6	59,0	36,0	13,7	3,1	-19,9	9,2
112-rF	14	6,0-6,7	0,0889	13,9	156,4	40,6	15,2	3,1	-19,3	9,5
112-osR	14		0,1067	9,0	84,3	39,7	14,8	3,1	-19,8	8,8
112-osN	14		0,1180	7,5	63,6	39,5	14,8	3,1	-19,8	8,8
123-rF	13	4,3-4,7	0,0306	2,5	81,7	28,7	11,3	3,0	-20,5	8,8
123-osR	13		0,1066	8,1	76,0	37,8	14,0	3,1	-20,1	9,2
123-osN	13		0,0490	3,1	63,3	30,1	11,7	3,0	-20,5	8,7
159-rF	15	7,2-7,7	0,0760	3,6	47,4	35,8	13,7	3,0	-20,1	8,0
159-osR	15		0,0816	4,4	54,0	30,8	11,8	3,1	-20,4	7,0
159-osN	15		0,0852	4,0	47,0	33,0	12,5	3,1	-20,2	7,3
168-rF	13	9,5-14,5	0,1204	4,2	41,0	37,2	14,1	3,1	-19,5	9,2
168-osR	13		0,0810	4,2	51,9	27,6	10,8	3,0	-20,2	8,8
168-osN	13		0,2132	7,9	37,1	38,3	14,3	3,1	-19,8	8,5
182-rF	13	8,9-9,5	0,1002	3,9	39,0	35,5	13,5	3,1	-19,7	8,7
182-osR	13		0,1332	4,6	34,5	35,1	13,3	3,1	-20,0	8,2
182-osN	13		0,2038	7,9	38,9	36,7	14,0	3,1	-20,0	8,4
255-rF	14	AJ, F	0,1070	3,4	31,8	37,0	13,3	3,2	-20,0	7,2
255-osR	14		0,1083	4,8	44,3	32,5	12,3	3,1	-20,7	8,1
255-osN	14		0,1056	5,1	48,3	34,3	12,8	3,1	-20,7	7,9
286-rF	13	[2-4]	0,0360	2,4	66,6	21,8	9,1	2,8	-21,7	7,1
286-osR	13		0,0555	3,8	68,5	31,4	12,1	3,0	-20,6	7,9
286-osN	13		0,0909	3,5	38,5	28,0	11,0	3,0	-20,8	7,7
273-rF	14	0,8-1,4	0,0311	1,0	32,2	30,0	11,1	3,2	-19,8	10,6
273-osN	14		0,1085	5,3	48,8	24,2	8,6	3,3	-19,7	9,7
274-rF	14	5,0-5,2	0,0778	3,2	41,1	40,6	14,3	3,3	-20,1	8,0
274-osR	14		0,0681	4,6	67,5	39,8	14,1	3,3	-20,3	7,4
274-osN	14		0,0521	2,7	51,8	36,0	13,1	3,2	-20,5	7,3
275-rF	14	[2-4]	0,0635	2,0	31,5	38,9	13,7	3,3	-19,8	8,0
275-osN	14		0,0762	2,2	28,8	37,2	13,3	3,3	-20,1	7,6
275-osR	14		0,0951	2,8	29,4	37,1	13,0	3,3	-19,9	7,9
288-rF	13	3,1-3,8	0,0540	3,6	66,6	34,4	13,1	3,1	-20,5	7,2
288-osR	13		0,0147	0,0	-	-	-	-	-	-
288-osN	13		0,0493	3,2	64,9	37,4	13,6	3,2	-20,0	8,1
289-rF	13	1,3-1,9	0,0882	4,5	51,0	40,8	14,6	3,3	-19,7	7,7
289-osR	13		0,0591	2,2	37,2	39,0	13,9	3,3	-20,1	7,2
289-osN	13		0,0498	2,2	44,1	37,2	13,6	3,2	-20,3	6,7
298-rF	13	1,9-2,6	0,0429	1,4	32,6	36,3	12,8	3,3	-19,1	10,4
298-osR	13		0,0353	0,5	14,2	32,6	11,2	3,4	-20,0	9,8
298-osN	13		0,0605	2,4	39,7	38,1	14,2	3,1	-19,6	8,6
301-rF	13	1,9-2,5	0,0344	1,2	35,0	32,1	13,3	2,8	-19,3	4,9
301-osR	13		0,0441	0,9	20,4	26,7	13	2,4	-19,7	0,2
301-osN	13		0,0251	0,3	11,9	26,0	9,32	3,2	-19,8	9,3
540-rF	14	1,6-2,0	0,0259	3,2	123,5	34	13,1	3,0	-20	10,4
540-osR	14		0,0836	8,9	106,5	40,2	15	3,1	-20,1	10,0
540-osN	14		0,0848	5,8	68,4	36,1	13,8	3,1	-20,0	9,7
553-rF	15	0,8-1,4	0,0360	3,7	102,8	35,4	13,6	3,0	-20,0	11,6
553-osR	15		0,0637	7,0	110,0	37,2	14	3,1	-19,9	11,2
553-osN	15		0,1159	8,6	74,2	34,8	13	3,1	-20,1	11,3
668-1-rF	15	AM, F	0,1018	12,4	121,8	39,8	14,8	3,1	-19,9	9,3
668-1-osN	15		0,1069	9,1	85,1	38,4	14,3	3,1	-20,1	9,1
668-1-osR	15		0,1067	8,6	80,6	-	-	-	-20,3	9,2

(os total : masse de poudre d'os utilisée pour l'extraction de collagène, mat. extr. : masse de collagène extraite, R : rendement d'extraction de collagène, %C, %N : teneurs en carbone et en azote dans le collagène extrait, C/N : rapport carbone sur azote, δ¹³C, δ¹⁵N : abondance isotopique en carbone-13 et en azote-15 du collagène osseux).

Échantillon	Phase	Âge/sexe	Os total (en g)	at. extr. (en mg)	R (en mg.g ⁻¹)	%C	%N	C/N	δ ¹³ C (en ‰)	δ ¹⁵ N (en ‰)
673-1-rF	15	2,7-3,1	0,0549	3,1	56,5	31,1	12,0	3,0	-20,1	9,3
673-1-osR	15		0,1089	5,5	50,5	35,1	13,3	3,1	-20,2	8,8
673-1-osN	15		0,0680	5,6	82,4	32,6	12,5	3,0	-19,8	8,3
1164-rF	15	3,8-4,2	0,0979	11,2	115,5	40,1	15,0	3,1	-20,0	9,2
1164-osR	15		0,1487	8,3	55,8	39,1	14,7	3,1	-20,3	8,4
1164-osN	15		0,0817	4,5	55,1	35,4	13,6	3,0	-20,4	8,1
1187-rF	14	AJ, F	0,0924	3,7	40,0	33,1	12,9	3,0	-20,0	7,8
1187-osR	14		0,1123	2,9	26,0	29,7	11,6	3,0	-20,6	7,5
1187-osN	14		0,1053	4,0	38,0	29,3	11,2	3,0	-20,5	7,6
1309-1-rF	14	7,5-8,3	0,1342	7,7	57,4	39,0	14,7	3,1	-20,0	8,0
1309-1-osR	14		0,1535	6,6	43,0	36,8	14,0	3,1	-20,2	7,8
1309-1-osN	14		0,1741	5,4	31,0	34,0	13,0	3,0	-20,2	7,7
1327-rF	15	1,3-1,7	0,0343	2,1	61,2	27,6	11,0	2,9	-20,1	8,9
1327-osR	15		0,0885	6,0	68,0	36,1	13,8	3,1	-20,6	10,8
1327-osN	15		0,0453	4,0	88,3	32,8	12,8	3,0	-20,7	10,5
1330-rF	13	AM, M	0,1022	7,9	77,3	37,8	14,1	3,1	-19,5	10,5
1330-osR	13		0,1050	4,0	38,0	32,9	12,6	3,0	-20,1	9,1
1330-osN	13		0,1121	5,9	52,6	34,4	13,0	3,1	-19,8	9,2
1350-rF	13	1,3-1,9	0,0579	8,9	153,7	39,7	14,9	3,1	-19,8	11,2
1350-osR	13		0,1192	15,6	131,0	40,3	15,0	3,1	-19,7	9,8
1350-osN	13		0,1395	22,2	159,1	41,0	15,2	3,1	-19,8	10,0

(os total : masse de poudre d'os utilisée pour l'extraction de collagène, mat. extr. : masse de collagène extraite, R : rendement d'extraction de collagène, %C, %N : teneurs en carbone et en azote dans le collagène extrait, C/N : rapport carbone sur azote, δ¹³C, δ¹⁵N : abondance isotopique en carbone-13 et en azote-15 du collagène osseux).

Annexe II - Données isotopiques intra-individuelles pour 25 individus âgés de 0 au stade adulte, Saint-Laurent de Grenoble. Les prélèvements intra-individuels sont : (1) rF = prélèvement de racine de dent en formation, (2) osN = prélèvement d'os sur le rebord alvéolaire et (3) osR = prélèvement d'os proche d'un germe dentaire. (Âge : enfants = âge dentaire en années (Smith 1991 ; Liversidge et al. 1993), adultes = groupe d'âge (AJ = adulte jeune, AM = adulte mature, AV = adulte vieux), sexe : F = féminin, M = masculin) (cases grisées : échantillons éliminés de la discussion).

Annex II—Intra-individual isotopic data from 25 individuals aged 0 to adult, Saint-Laurent de Grenoble. [(rF = sample of growing tooth root, osR = sample of bone close to a tooth bud, osN = sample of bone on the alveolar edge; Age: children = dental age in years, adults = age group (AJ = young adult, AM = mature adult, AV = old adult); Sex: F = female, M = male)] (grey squares: samples eliminated from the discussion).

INDEX DES FIGURES

Fig. 1 - Constitution des tissus osseux et dentaires et éléments isotopiques dosables	165
<i>Fig. 1—Constitution of bone and dental tissues and measurable isotopic elements.....</i>	<i>165</i>
Fig. 2 - Modalités d'enregistrement des signaux alimentaires en fonction des tissus osseux et dentaires.....	167
<i>Fig. 2—Recording methods of dietary signals according to the bone and dental tissues</i>	<i>167</i>
Fig. 3 - Gamme de variation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ pour différents niveaux trophiques de chaînes alimentaires terrestres et aquatiques (DeNiro, Epstein 1978 ; Deines 1980 ; Tauber 1981 ; Schoeninger, DeNiro 1984 ; DeNiro, Hastorf 1985 ; Chisholm 1989).....	171
<i>Fig. 3—Variation range of $\delta^{13}\text{C}$ values for different trophic levels of terrestrial and aquatic food chains (DeNiro, Epstein 1978; Deines 1980; Tauber 1981; Schoeninger, DeNiro 1984; DeNiro, Hastorf 1985; Chisholm 1989).</i>	<i>171</i>
Fig. 4 - Gamme de variation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ pour différents niveaux trophiques de chaînes alimentaires terrestres et aquatiques (DeNiro, Epstein 1981 ; Schoeninger <i>et al.</i> 1983 ; Minagawa, Wada 1984 ; Schoeninger, DeNiro 1984 ; DeNiro, Hastorf 1985).....	173
<i>Fig. 4—Variation range of $\delta^{15}\text{N}$ values for different trophic levels of terrestrial and aquatic food chains (DeNiro, Epstein 1981; Schoeninger et al. 1983; Minagawa, Wada 1984; Schoeninger, DeNiro 1984; DeNiro, Hastorf 1985)</i>	<i>173</i>
Fig. 5 - Évolution de la composition en azote-15 dans le collagène osseux, au cours des phénomènes d'allaitement et de sevrage (courbe en tracé plein)	175
<i>Fig. 5—Changes in the composition of nitrogen-15 in bone collagen during breastfeeding and weaning (full curve)</i>	<i>175</i>
Fig. 6 - Procédure d'échantillonnage des trois tissus squelettiques. Cas des individus 288 et 298 de Saint-Laurent	181
<i>Fig. 6—Sampling procedure for the three skeletal tissues. Examples of individuals 288 and 298 at Saint-Laurent.....</i>	<i>181</i>

Fig. 7 - Modèle de l'évolution des compositions en azote-15 des trois tissus squelettiques au cours des phénomènes d'allaitement et de sevrage.....	181
<i>Fig. 7—Model of changes in composition of nitrogen-15 in the three skeletal tissues during breastfeeding and weaning</i>	181
Fig. 8 - Carte de situation de la région de Grenoble.....	187
<i>Fig. 8—Map of the Grenoble region</i>	187
Fig. 9 - Vue aérienne du quartier et de l'Église Saint-Laurent de Grenoble sur la rive droite de l'Isère (cliché Ville de Grenoble).....	188
<i>Fig. 9—Aerial view of the quarter and the church of Saint-Laurent in Grenoble on the right bank of the Isère (photo Ville de Grenoble).....</i>	188
Fig. 10 - Plan de Grenoble, vers 1350 (dessin de M.-T. Pio, d'après Montjoye 1990 in Colardelle 1996).....	189
<i>Fig. 10—Plan of Grenoble, about 1350 (drawing by M.-T. Pio, after Montjoye 1990 in Colardelle 1996)</i>	189
Fig. 11 - Nef et chœur de l'Église Saint-Laurent de Grenoble (cliché E. Herrscher).....	190
<i>Fig. 11—Nave and choir of the church of Saint-Laurent in Grenoble (photo E. Herrscher).....</i>	190
Fig. 12 - Plan général de la nécropole Saint-Laurent de Grenoble (extrait de Colardelle 1999a).....	191
<i>Fig. 12—General plan of the necropolis of Saint-Laurent in Grenoble (from Colardelle 1999a)</i>	191
Fig. 13 - Quantités de C et N conservées dans le collagène osseux des animaux	201
<i>Fig. 13—Quantities of C and N preserved in animal bone collagen</i>	201
Fig. 14 - Quantités de C et N conservées dans le collagène osseux des humains.....	203
<i>Fig. 14—Quantities of C and N preserved in human bone collagen.....</i>	203
Fig. 15 - Quantités de C et N conservées dans le collagène osseux mandibulaire (osN et osR) et dans le collagène de racines en formation (rF)	204
<i>Fig. 15—Quantities of C and N preserved in the mandibular bone collagen (osN and osR) and in the growing tooth root collagen (rF).....</i>	204
Fig. 16 - $\delta^{13}\text{C}$ du collagène osseux des espèces animales	205
<i>Fig. 16—$\delta^{13}\text{C}$ of bone collagen from animal species</i>	205
Fig. 17 - $\delta^{15}\text{N}$ du collagène osseux des espèces animales	206
<i>Fig. 17—$\delta^{15}\text{N}$ of bone collagen from animal species</i>	206

Fig. 18 - $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ du collagène osseux des animaux et des humains : variations individuelles (A) et dispersion moyenne (B)	207
<i>Fig. 18—$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in bone collagen of animals and humans: individual variations (A) and average dispersion (B).....</i>	207
Fig. 19 - $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des adultes en fonction de l'âge au décès (A) et de la stature (B)....	208
<i>Fig. 19—$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of adults according to age at death (A) and to stature (B)</i>	208
Fig. 20 - $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des adultes en fonction des phases d'inhumation (A) et de la localisation des sépultures dans la nécropole (B)	215
<i>Fig. 20—$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of adults according to the burial phases (A) and the location of the graves in the necropolis</i>	215
Fig. 21 - Différences relatives entre les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ enregistrées dans l'os le plus stable (osN) et le tissu dentaire (rF) et l'os en renouvellement rapide (osR) en fonction de l'âge	217
<i>Fig. 21—Relative differences between the $\delta^{15}\text{N}$ values recorded in the most stable bone (osN) and the dental tissue (rF) and the rapidly regrowing bone (osR) according to age</i>	217
Fig. 22 - Mécanismes de transfert des teneurs isotopiques en azote de l'alimentation au collagène	225
<i>Fig. 22—Transfer mechanisms of nitrogen isotopic content from food to collagen</i>	225

INDEX DES TABLEAUX

Tabl. I - Âge au sevrage estimé d'après l'analyse des compositions isotopiques en azote dans 8 populations historiques	176
<i>Table I—Age at weaning estimated from the analysis of nitrogen isotopic compositions in 8 historical populations</i>	176
Tabl. II - Variations inter-individuelles des compositions isotopiques en azote entre adultes et immatures, dans 9 populations actuelles et historiques	177
<i>Table II—Inter-individual variations of nitrogen isotopic compositions between adults and sub-adults, in 9 present and historical populations</i>	177
Tabl. III - Travaux à l'origine de la stratégie du double échantillonnage initiée au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique de l'Université Paris VI.....	178
<i>Table III—Work at the origin of the strategy of double sampling initiated at the Laboratoire de Biogéochimie Isotopique de l'Université Paris VI</i>	178
Tabl. IV - Études isotopiques reposant sur le prélèvement de plusieurs tissus d'un même individu.....	179
<i>Table IV—Isotopic studies based on the sampling of several tissues from the same individual ..</i>	179
Tabl. V - Répartition des sépultures à un seul sujet et des sépultures à plus d'un sujet par phase d'inhumation (Sép = sépulture)	193
<i>Table V—Distribution of the graves containing only one subject and the graves containing more than one subject, by burial phase (Sép = grave)</i>	193
Tabl. VI - Répartition des squelettes en fonction de la nature de leur inhumation, du type de sépulture et de la localisation des sépultures dans la nécropole, selon les phases d'inhumation.....	193
<i>Table VI—Distribution of skeletons according to the nature of their burial, the type of grave, and the location of the graves in the necropolis, by burial phase</i>	193
Tabl. VII - Répartition des individus adultes en fonction des phases d'inhumation, du sexe et des groupes d'âge.....	194
<i>Table VII—Distribution of adult individuals according to burial phase, sex and age group</i>	194

Tabl. VIII - Répartition des individus immatures par classe d'âge démographique et par phase d'inhumation	195
<i>Table VIII—Distribution of immature individuals by demographic age class and by burial phase</i>	195
Tabl. IX - Répartition des ossements animaux analysés par phase d'inhumation.....	196
<i>Table IX—Distribution of animal bones analysed according to burial phase</i>	196
Tabl. X - Répartition des sujets adultes analysés par phase d'inhumation, selon différents critères biologiques et archéologiques	198
<i>Table X—Distribution of adults analysed by burial phase, according to different biological and archaeological criteria</i>	198
Tabl. XI - Sujets adultes impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage	198
<i>Table XI—Adult individuals involved in the triple sampling strategy</i>	198
Tabl. XII - Répartition par âge au décès des sujets immatures impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage	199
<i>Table XII—Distribution by age at death of immature individuals involved in the triple sampling strategy</i>	199
Tabl. XIII - Corrélations entre le rapport C/N, les compositions isotopiques en carbone et azote et les rendements d'extraction des ossements animaux	202
<i>Table XIII—Correlations between C/N ratio, isotopic compositions of carbon and nitrogen and extraction yields in the animal bones</i>	202
Tabl. XIV - Corrélations entre le rapport C/N, les compositions isotopiques en carbone et azote et les rendements d'extraction des ossements humains adultes	202
<i>Table XIV—Correlations between C/N ratio, isotopic compositions of carbon and nitrogen and extraction yields in the adult human bones.....</i>	202
Tabl. XV - Corrélations entre le rapport C/N, les compositions isotopiques en carbone et azote et les rendements d'extraction des tissus osseux et dentaires des sujets impliqués dans la stratégie de triple échantillonnage	204
<i>Table XV—Correlations between C/N ratio, isotopic compositions of carbon and nitrogen and the extraction yields of bone and dental tissues from individuals involved in the triple sampling strategy.....</i>	204
Tabl. XVI - Variations inter-individuelles des compositions isotopiques en carbone et en azote à Saint-Laurent et dans 11 sites historiques européens et nord-américains (sujets adultes).....	209
<i>Table XVI—Inter-individual variations in carbon and nitrogen isotopic compositions at Saint-Laurent and in 11 European and North American historical sites.....</i>	209

Tabl. XVII - Variations inter-individuelles des compositions isotopiques en carbone et en azote dans des populations actuelles	210
<i>Table XVII—Inter-individual variations of carbon and nitrogen isotopic compositions in present populations</i>	210
Tabl. XVIII - Variations inter-individuelles des compositions isotopiques en carbone et en azote selon le sexe, à Saint-Laurent et dans 7 sites historiques européens et nord-américains	213
<i>Table XVIII—Inter-individual variations of carbon and nitrogen isotopic compositions according to sex, at Saint-Laurent and in 7 European and North American historical sites</i>	213
Tabl. XIX - Compositions isotopiques en azote dans les trois tissus et standardisation des données (rF = prélèvement de racine de dent en formation, osR = prélèvement d'os proche d'un germe dentaire, osN = prélèvement d'os sur le rebord alvéolaire)	216
<i>Table XIX—Nitrogen isotopic compositions in three tissues and standardisation of data (rF = sample of growing tooth root, osR = sample of bone close to tooth bud, osN = sample of bone close to the alveolar edge)</i>	216
Tabl. XX - Comportements alimentaires associés aux séquences isotopiques chronologiques individuelles	223
<i>Table XX—Dietary behaviours associated with individual chronological isotopic sequences</i>	223

