



HAL
open science

Nouvelles données sur l'épidémiologie passée et actuelle de la spondylolyse lombo-sacrée et son association avec la spina bifida occulta

Marie Devos, Sacha Kacki, Sébastien Villotte, David Gandia, Kathia Chaumoitre, Bérengère Saliba-Serre, Emeline Verna, Yann Ardagna

► To cite this version:

Marie Devos, Sacha Kacki, Sébastien Villotte, David Gandia, Kathia Chaumoitre, et al.. Nouvelles données sur l'épidémiologie passée et actuelle de la spondylolyse lombo-sacrée et son association avec la spina bifida occulta. *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 2022, 34 (2), 10.4000/bmsap.10225 . hal-03819906

HAL Id: hal-03819906

<https://hal.science/hal-03819906>

Submitted on 18 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

BMSAP

**Bulletins et mémoires de la Société
d'Anthropologie de Paris**

BMSAP

34 (2) | 2022

Humanité(s) : définition(s), diversités et limites

**Nouvelles données sur l'épidémiologie passée et
actuelle de la spondylolyse lombo-sacrée et son
association avec la *spina bifida occulta***

*New findings on the past and present epidemiology of lumbosacral spondylolysis
and its association with spina bifida occulta*

**Marie Devos, Sacha Kacki, Sébastien Villotte, David Gandia, Kathia
Chaumoitre, Bérengère Saliba-Serre, Emeline Verna et Yann Ardagna**



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/bmsap/10225>

ISSN : 1777-5469

Éditeur

Société d'Anthropologie de Paris

Nouvelles données sur l'épidémiologie passée et actuelle de la spondylolyse lombo-sacrée et son association avec la *spina bifida occulta*

New findings on the past and present epidemiology of lumbosacral spondylolysis and its association with spina bifida occulta

Marie Devos ^{1,2*}, Sacha Kacki ^{3,4}, Sébastien Villotte ^{3,5}, David Gandia ^{2,6}, Kathia Chaumoitre ^{2,7}, Bérengère Saliba-Serre ², Emeline Verna ², Yann Ardagna ²

1 Service de médecine interne, CHU Nord, Marseille, France

2 ADES Anthropologie bio-culturelle, droit, éthique et santé, UMR 7268 CNRS / AMU / EFS
Faculté des *Sciences Médicales et Paramédicales* - Secteur Nord, Marseille, France

3 UMR 5199 PACEA, CNRS, Université de Bordeaux, MC, Pessac, France

4 Department of Archaeology, Durham University, Durham, United Kingdom

5 Directorate Earth and History of Life, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brussels, Belgium

6 Archeodunum SAS, Chaponnay, France

7 Service d'imagerie médicale, CHU Nord, Marseille, France

* marie.devos@ap-hm.fr

Reçu : 1 mai 2021 ; accepté : 2 juin 2022

Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris

Résumé – La spondylolyse est une solution de continuité de la *pars interarticularis* principalement secondaire à des traumatismes répétés. D'autres facteurs, comme la *spina bifida occulta* (SBO) sont évoqués mais peu étudiés en clinique et en paléopathologie. Notre étude a pour objectif de renseigner la prévalence de la spondylolyse lombaire et son association avec la SBO au sein de trois corpus : 1) un échantillon issu de la population générale française contemporaine (tomodensitométrie, centre hospitalo-universitaire Nord de Marseille) ; 2) une large collection ostéo-archéologique médiévale et moderne provenant du cimetière de la cathédrale de Notre-Dame-du-Bourg (NDB) (Digne-les-Bains, Alpes-de-Haute-Provence) et enfin 3) un corpus de données issues de la littérature paléopathologique. Les résultats révèlent que, pour la population contemporaine, 26 patients adultes âgés de 18 à 69 ans parmi 496 montrent au moins une spondylolyse lombaire (5,2 %). Sa prévalence est significativement plus élevée chez les patients avec une SBO (*odds ratio* 3,8). Au sein de la série de NDB, 9 individus parmi 455 présentent une spondylolyse (2,0 %). La prévalence est plus élevée à la période médiévale (3,5 %) qu'à la période moderne (0,5 %). La même tendance a été retrouvée lors de l'analyse de l'ensemble des données européennes de la littérature et la prévalence de la spondylolyse n'était pas associée à la présence d'une SBO.

Mots clés – spondylolyse, *spina bifida occulta*, paléopathologie, populations anciennes, tomodensitométrie

Abstract – Spondylolysis is a bony defect of the *pars interarticularis* mainly arising from repeated traumas. Other factors such as *spina bifida occulta* (SBO) are mentioned in clinical and palaeopathology but have been little studied. The aim of our study is to provide information on the prevalence of lumbar spondylolysis and its association with SBO in three samples: 1) a sample from the general contemporary French population (CT scans from the Nord hospital in Marseille); 2) a large mediaeval and modern osteoarchaeological collection from the cemetery of Notre-Dame-du-Bourg cathedral (NDB) (Digne-les-Bains, Alpes-de-Haute-Provence); and finally, 3) a corpus of prevalence data taken from the literature. Our results show that for the contemporary population, 26 out of 496 adult patients aged 18 to 69 years displayed at least one lumbar spondylolysis (5.2%). Its prevalence was significantly higher among patients with SBO (Odds ratio 3.8). In the NDB series, 9 individuals out of 455 had spondylolysis (2.0%). The prevalence was higher in the mediaeval period (3.5%) than in the modern period (0.5%). The same trend was found in our analysis of all European data in the literature, and the prevalence of spondylolysis was not associated with the presence of SBO.

Keywords – spondylolysis, *spina bifida occulta*, palaeopathology, ancient populations, computed tomography

Introduction

La spondylolyse est une lésion vertébrale qui se définit comme étant une solution de continuité de la *pars interarticularis* (Wiltse et al., 1976). Elle atteint dans plus de 80 % des cas la 5^e vertèbre lombaire (L5), mais peut concerner n'importe quel élément du rachis, y compris le sacrum (Roche et Rowe, 1951). Elle est l'apanage de la station bipède (Merbs, 1996a ; Ward et Latimer, 2005). En effet, elle n'est quasiment jamais observée chez les nouveau-nés ou les adultes n'ayant jamais déambulé, ni chez les primates non humains (Rosenberg et al., 1981 ; Nakai, 2001). Si la lésion est bilatérale, il en résulte la séparation de l'arc postérieur du reste de la vertèbre qui peut entraîner un glissement antérieur du corps vertébral (spondylolisthésis) (Wiltse et al., 1976). Dans la population générale actuelle, la prévalence de la spondylolyse est estimée entre 3 et 8 % ; elle augmente au cours de l'enfance et de l'adolescence pour rester stable à l'âge adulte (Fredrickson et al., 1984 ; Leone et al., 2011). Une prédominance masculine est rapportée par plusieurs auteurs (Sakai et al., 2009 ; Brooks et al., 2010). Sa prévalence connaît de grandes variations en fonction des groupes étudiés. Elle est estimée à 13,5 % chez les athlètes toutes pratiques confondues et atteint jusqu'à 47 % des athlètes souffrant de lombalgie (Rossi et Dragoni, 1994). Ce dernier groupe est celui pour lequel la spondylolyse est la mieux documentée actuellement.

Dans les populations anciennes la spondylolyse est une lésion fréquemment observée toutes périodes confondues. Sa prévalence est toutefois très variable (de 0 à 71 %) en fonction des populations et des époques (Stewart, 1931 ; Bridges, 1989 ; Arriaza, 1997 ; Merbs, 2002 ; Weiss, 2009 ; Lessa, 2011 ; Pilloud et Canzonieri, 2014). Le plus ancien cas décrit à notre connaissance provient de la sierra de Atapuerca (Espagne) et date du Pléistocène moyen (Trinkaus, 2018).

La physiopathologie exacte de cette lésion n'est pas encore connue avec certitude. Des microtraumatismes répétés engendrant un stress accru au niveau de la *pars interarticularis* joueraient en rôle majeur dans sa genèse comme le montre la fréquence élevée de spondylolyse lombaire chez les sportifs (Ikata et al., 1996). Les différences de prévalences entre hommes et femmes, notamment dans les populations anciennes, seraient un argument supplémentaire en faveur du rôle de l'activité (Arriaza, 1997 ; Jiménez-Brobeil et al., 2012). En clinique, des chercheurs ont mis en évidence un lien entre spondylolyse et divers troubles de la statique rachidienne tels que l'hyperlordose lombaire ou la maladie de Scheuermann (Ogilvie et Sherman, 1987 ; Sonne-Holm et al., 2007). Cependant, l'existence de lésions thoraciques, c'est-à-dire sur des vertèbres soumises à un régime de pression moindre, suggère la participation d'autres mécanismes. Plusieurs études cliniques scanographiques ont mis en évidence une association entre spondylolyse et morphologie vertébrale (Groblér et al., 1993 ; Miyake et al., 1996). Ward et al. (2005, 2010) ont montré dans leurs travaux portant sur des cas paléopathologiques que l'espacement entre les facettes articulaires inter-apophysaires est plus faible en cas

de spondylolyse. La description de cas familiaux laisse envisager une composante génétique. Cependant, cette hypothèse n'a pas pu être étayée jusqu'à présent (Albanese et Pizzutillo, 1982 ; Yamada et al., 2013). Pour certains auteurs, l'association entre spondylolyse et dysplasies rachidiennes est un argument en faveur du rôle de l'hérédité (Fredrickson et al., 1984 ; Leone et al., 2011). Notamment, plusieurs études cliniques ont mis en évidence une association entre spondylolyse et *spina bifida occulta* (SBO), une forme bénigne de dysraphisme spinal prédominant au niveau des premières vertèbres sacrées et de L5 (Sakai et al., 2009 ; Urrutia et al., 2016). En paléopathologie en revanche, depuis son évocation par Roche et Rowe (1951), l'association n'a pas pu être mise en évidence (Waldron, 1993 ; Merbs, 1996a). Le lien entre spondylolyse et d'autres anomalies de l'arc vertébral comme les vertèbres transitionnelles lombosacrées semble inexistant.

Les approches différentes entre la médecine, discipline dans laquelle la spondylolyse est principalement étudiée à partir de ses complications, et la paléopathologie, où l'approche est lésionnelle et les complications difficiles à mettre en évidence, rendent les comparaisons délicates. Les données paléopathologiques sont complexes à interpréter, tant en ce qui concerne la prévalence de la spondylolyse que le terrain pathologique sous-jacent.

Afin de contribuer aux connaissances sur la spondylolyse, nous avons procédé dans cette étude à trois types d'analyses. Dans un premier temps, afin de clarifier sa prévalence actuelle et d'évaluer son association avec la SBO nous avons procédé à une analyse de ces deux atteintes sur une cohorte issue de la population française actuelle. Dans un second temps, nous avons procédé à la recherche systématique de la spondylolyse et de la SBO au sein d'une grande collection ostéo-archéologique française du Sud-Est de la France datée de l'Antiquité tardive à la période moderne. Enfin, les données récoltées ont été confrontées à un vaste corpus de données paléoépidémiologiques et paléopathologiques précédemment acquises par les auteurs ou rapportées dans la littérature.

Matériel et méthodes

Étude tomodensitométrique

Les images tomodensitométriques de 509 patients adultes âgés de 18 à 69 ans ont été analysées rétrospectivement. Il s'agissait de patients ayant bénéficié d'une tomodensitométrie (TDM) abdomino-pelvienne pour un motif non rhumatologique entre janvier et avril 2020 dans le service d'imagerie médicale du centre hospitalo-universitaire Hôpital Nord, Marseille. Les critères d'exclusion étaient la présence de matériel d'ostéosynthèse ou la présence de lésions dégénératives rendant ininterprétable le segment rachidien postérieur. Treize patients ont été exclus. L'ensemble du rachis lombaire a été examiné pour chaque cas, en utilisant la fenêtre osseuse. Chaque imagerie a été obtenue grâce à un équipement GE OPTIMA CT 660 system

(GE Healthcare, Milwaukee, WI, USA) ou SIEMENS SOMATOM SENSATION 64 system (Siemens Medical Solutions, Forchheim, Germany). Nous avons analysé les images en coupes axiales de 1,0 ou 1,5 mm d'épaisseur et en reconstruction sagittale 2D. Le foyer fracturaire de la spondylolyse a été visualisé comme une zone radio-transparente à proximité des apophyses articulaires inférieures. La spondylolyse a été marquée comme absente ou présente du côté droit, gauche ou bilatéralement. La présence d'un spondylolisthésis a été consignée tout comme la présence de SBO. Cette dernière a été diagnostiquée en l'absence de pont osseux entre les arcs postérieurs droit et gauche lombaires ou sacrés au niveau de S1 ou S2. La non fusion des arcs postérieurs de S3 à S5 a été considérée comme variant normal (Ellis, 1981). La reconstruction coronale a été utilisée pour confirmer la présence de SBO. La lecture des images a été réalisée par une interne en 11^e année de médecine (M.D.). L'ensemble des images sujettes à équivoque a été relu par un radiologue expérimenté (K.C.).

En accord avec la réglementation française, cette étude a été menée après approbation du comité d'éthique de l'université Aix-Marseille.

Étude paléopathologique

Le corpus ostéologique étudié provient de la collection de Notre-Dame-du-Bourg (NDB) à Digne-les-Bains (Alpes-de-Haute-Provence, France) (Démians D'Archimbaud et al., 2010). Celle-ci comprend près de 1 700 individus inhumés entre le IV^e et le XVIII^e siècle. Ont été inclus à l'étude les sujets adultes et les sujets immatures dont l'âge au décès était estimé à plus de 15 ans, dès lors qu'au moins un arc postérieur de vertèbre lombaire et/ou le sacrum était préservé. Le profil biologique (âge au décès et sexe) des individus datés de l'époque moderne (fin du XV^e à la fin du XVIII^e siècle) a été défini lors de travaux précédents (Bouchez, 2010 ; Parmentier, 2010 ; Lanteri, 2016) à l'aide des méthodes Lovejoy et al. (1985) et Schmitt (2005) pour l'estimation de l'âge au décès, et de Bruzek (2002) et Murail et al. (2005) pour la diagnose sexuelle. Lors de notre étude, le sexe des individus des IV^e-XV^e siècles, a été estimé avec les mêmes méthodes. L'âge au décès des grands adolescents a été estimé suivant la méthode de Coqueugnot et al. (2010). Au total, 935 individus ont été analysés (421 individus datés de la période moderne et 514 individus des IV^e-XV^e siècles). Parmi eux, 455 individus répondaient aux critères d'inclusion.

Le rachis de chaque individu a été examiné macroscopiquement à la recherche de spondylolyses. Elles ont été classées selon leur siège d'atteinte (L4, L5 ou S1) et leurs caractéristiques (uni- ou bilatérales, complètes ou incomplètes) selon la classification proposée par Buikstra et Ubelaker (1994). Les vertèbres avec spondylolyse ont été examinées à la recherche d'argument en faveur d'un spondylolisthésis : néoformation osseuse au niveau du bord antérieur des vertèbres, ostéophytose marginale sur la vertèbre lésée et la vertèbre sous-jacente (Ikata et al., 1996 ;

Mays, 2006). Nous avons par ailleurs examiné l'ensemble du rachis à la recherche de SBO selon les recommandations de Barnes (2012) et Ortner (2003). La SBO a été diagnostiquée devant la déhiscence d'une lame vertébrale responsable d'une absence de fusion des arcs vertébraux lombaires ou sacrés (S1, S1 et S2 ou *sacrum bifidum* complet).

La prévalence corrigée a été obtenue en rapportant le nombre d'individus avec spondylolyse au nombre d'individus répondant aux critères d'inclusion (Ardagna, 2000 ; Deverly et al., 2002 ; Rojas-Sepúlveda et al., 2008).

Afin de contextualiser nos résultats, nous les avons comparés à ceux acquis grâce à un large corpus de séries ostéologiques provenant des cinq continents. Ce corpus documentaire inclut des données inédites acquises par certains d'entre nous (Y.A., D.G., S.K., S.V.) lors de précédents travaux ainsi que des données issues de la littérature paléopathologique. La revue de la littérature s'est appuyée sur la consultation de nombreuses monographies de sites funéraires publiés en langue française ou anglaise, ainsi qu'un recensement systématique des cas de spondylolyse publiés entre 1939 et décembre 2018 dans les revues suivantes : *American Journal of Physical Anthropology*, *International Journal of Osteo-archaeology*, *Spine*, *International Journal of Anthropology*, *International Journal of Paleopathology* et *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*. Les mots-clés utilisés ont été : *spondylolysis*, *spondylolisthesis*, *paleopathology*, *skeletal remains*, et *ancient populations*.

Nous avons retenu toutes les études incluant 20 individus ou plus. Les individus immatures dont l'âge était estimé à moins de 15 ans n'ont pas été pris en compte dans le calcul des prévalences. Les données ont été colligées dans une base de données incluant les auteurs, l'année de publication, l'origine géographique, la période chronologique, la taille de l'échantillon, la prévalence de la spondylolyse (voir Matériel supplémentaire). Lorsque les données étaient disponibles nous avons noté la répartition par sexe, la présence de lésions associées à la spondylolyse et les segments du rachis analysés.

Analyses statistiques

Le lien entre deux variables qualitatives a été évalué à l'aide du test d'indépendance du chi-deux couplé à un calcul des *odds ratio*, ou du test exact de Fisher lorsque les conditions d'application du test du chi-deux (effectifs théoriques ≥ 5) n'étaient pas réunies. Afin de comparer la répartition par classes d'âge des hommes à celle des femmes, le test du chi-deux de conformité a été utilisé.

Le lien entre la médiane des prévalences aux différentes périodes a été évalué à l'aide du test de la somme des rangs de Wilcoxon.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R version 4.0.2 et plus particulièrement de l'interface graphique R Commander version 2.7-0 (Team, 2013). Le seuil de signification des analyses statistiques a été fixé à 5 % pour tous les tests effectués.

Résultats

Étude tomodensitométrique

Les données tomodensitométriques de 496 sujets ont été analysées. Il n'y a pas de différence quant à la répartition des individus par classe d'âge ($p=1$) et la répartition par sexe au sein de chaque classe d'âge est comparable ($p=0,67$) (figure 1).

Vingt-six sujets présentent au moins une spondylolyse lombo-sacrée, soit une prévalence globale de 5,2 %. Des exemples de spondylolyse lombaires observées en TDM sont présentées dans les figures 2 et 3. Chez les individus concernés, le sexe ratio est équilibré : 14 cas masculins (prévalence 5,8 %) et 12 cas féminins (prévalence 4,7 %) ($p=0,57$). Les caractéristiques des patients et les prévalences observées sont présentées dans le tableau 1. Il n'y a pas de différence statistiquement significative de prévalence en fonction des classes d'âge ($p=0,65$). Les prévalences en fonction de l'âge sont fournies par le tableau 2.

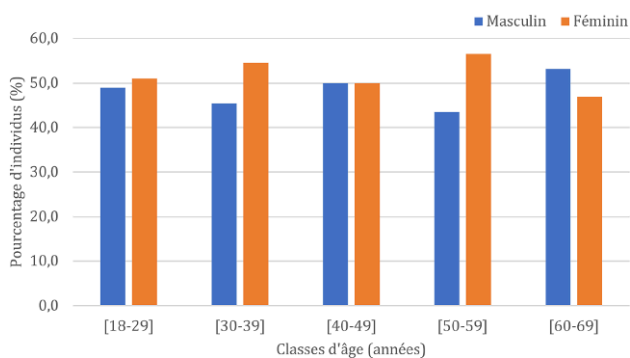


Figure 1. Répartition des individus par sexe au sein de chaque classe d'âge au sein de l'échantillon contemporain / *Distribution of individuals by sex within each age group in the contemporary sample*

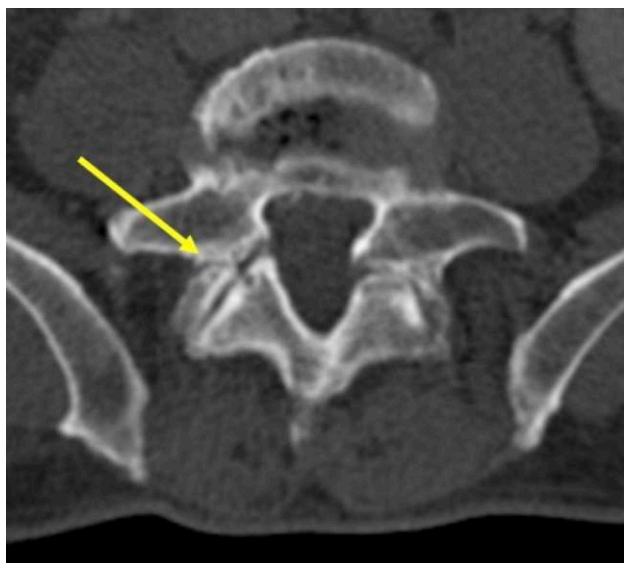


Figure 2. Spondylolyse L5 complète bilatérale chez un sujet adulte de sexe masculin, coupe axiale, TDM / *Bilateral complete L5 spondylolysis in an adult male subject, axial view, CT*

La vertèbre préférentiellement atteinte est L5 avec 24 cas de spondylolyse. Nous avons mis en évidence une atteinte de L3 et deux atteintes de L4 (dont une chez un individu atteint également d'une spondylolyse de L5). Sept individus parmi les 26 cas présentent des atteintes unilatérales (27,0 %), tandis que chez les 19 autres patients elle est bilatérale. Toutes les lésions relevées correspondent à des séparations complètes. La présence de spondylolisthésis a été notée chez 8 patients (30,1 %).

Total (N)	496	
Sexe	Masculin	48,4 % (240)
	Féminin	51,6 % (256)
Prévalence de la spondylolyse	Prévalence - Masculin	5,8 % (14)
	Prévalence - Féminin	4,7 % (12)
	Prévalence de la SBO	19,6 % (97)
Prévalence de la SBO	Prévalence - Masculin	25,0 % (60)
	Prévalence - Féminin	14,5 % (37)

Tableau 1. Caractéristiques des patients et prévalences observées au sein de l'échantillon tomodensitométrique / *Patient characteristics and prevalence observed in the CT scan sample*

Classe d'âge [années]	n/N	Prévalence
[18-29]	5/96	5,2 %
[30-39]	5/99	5,1 %
[40-49]	4/98	4,1 %
[50-59]	7/92	7,6 %
[60-69]	5/111	4,5 %

Tableau 2. Distribution de la spondylolyse par classes d'âge au sein de l'échantillon tomodensitométrique / *Age distribution of spondylolysis in the CT scan sample*



Figure 3. Spondylolyse L5 complète bilatérale chez le même individu, reconstruction sagittale, TDM / *Bilateral complete L5 spondylolysis in the same individual, sagittal reconstruction, CT*

Une SBO a été trouvée chez 97 des 496 sujets analysés (19,6 %). Parmi eux, la majorité (76 sujets soit 78,4 %) ont un sacrum bifidum touchant uniquement S1. La prévalence de la SBO est significativement plus élevée chez les hommes (n=60, 25,0 %) que chez les femmes (n=37, 14,5 %) (chi-deux=8,76 p<0,01 ; OR : 1,97 ; IC₉₅=[1,25-3,1]).

Parmi les 399 sujets sans SBO, 14 présentent une spondylose (3,5 %) ; alors que parmi les 97 sujets avec une SBO, 12 sont concernés (12,4 %). La prévalence de la spondylose est significativement plus importante chez les sujets avec une SBO que chez les sujets sans SBO (chi-deux=12,34, p<0,001 ; OR : 3,88 ; IC₉₅=[1,73-8,69]).

Étude paléopathologique

Parmi les 455 individus de NDB observables pour la spondylose, 37,6 % étaient de sexe masculin, 25,7 % de sexe féminin et 36,7 % de sexe indéterminé. Le profil biologique des individus est présenté dans le tableau 3.

	Antiquité tardive n = 5	Moyen Âge n = 202	Période moderne n = 248	Effectif Total n = 455
Sexe				
Masculin	3	67	101	171
Féminin	0	37	80	117
Indéterminé	2	98	67	167
Âge				
15-19 ans	0	3	3	6
Adultes	5	199	245	449

Tableau 3. Profil biologique des individus de NDB par période chronologique / *Biological profile of NDB individuals by period*

Figure 4. Spondylose L5 bilatérale complète chez un individu adulte, de sexe indéterminé, période médiévale issu de la collection NDB. Vue inférieure / *L5 bilateral complete spondylosis in an adult, indeterminate sex, mediaeval individual from the NDB collection. Inferior view*

La présence de spondylose a été observée chez 9 individus, incluant 5 sujets masculins, 3 sujets féminins et un sujet de sexe indéterminé. La prévalence ne diffère pas significativement en fonction du sexe. Les lésions sont toutes complètes, impliquant dans chaque cas la pars interarticularis. Il y a 4 lésions unilatérales et 5 lésions bilatérales. Nous n'avons pas mis en évidence d'arguments en faveur d'un spondylolithésis. La majorité des lésions, telle celle présentée dans la figure 4, concernaient L5 (7 individus). Un individu présente une atteinte de L4, un second une atteinte de S1 associée à un sacrum bifidum et à une agénésie de l'arc postérieur de L5 et S1.

La prévalence corrigée de la spondylose toutes périodes confondues est de 2,0 %. Le faible effectif d'individus de l'Antiquité tardive ne permet pas de calculer une prévalence fiable pour cette période. La distribution des cas de spondyloses par période et les prévalences corrigées sont présentées dans le tableau 4. Une différence statistiquement significative entre les prévalences en fonction des périodes a été mise en évidence (Fisher, p=0,025, OR : 8.83 ; IC₉₅=[1,12-400,43]).



	Antiquité tardive / (n/N)	Moyen Âge % (n/N)	Moderne % (n/N)	Effectif total % (n/N)
Sexe				
Masculin	/ (1/3)	6,0 % (4/67)	0 % (0/101)	2,9 % (5/171)
Féminin	/ (0/0)	5,4 % (2/37)	1,3 % (1/80)	2,6 % (3/117)
Indéterminé	/ (0/2)	1,0 % (1/98)	0 % (0/67)	0,6 % (1/167)
Total	/ (1/5)	3,5 % (7/202)	0,5 % (1/248)	2,0 % (9/455)

Tableau 4. Distribution et prévalence corrigée de la spondylose au sein de la collection NDB en fonction des sexes et des périodes (médiévale et moderne). Abréviations : n=Nombre de cas de spondylose et N=Nombre d'individus observables pour la spondylose / *Distribution and corrected prevalence of spondylosis in the NDB collection by sex and period (mediaeval and modern). Abbreviations: n=Number of spondylosis cases and N=Number of observable individuals for spondylosis*

Nous avons observé 59 cas de SBO (12,0 %) dont une lésion cervicale, une lésion thoracique, 7 SBO lombaires et 51 *sacrum bifidum* (dont 46 incomplets et 5 complets) (figure 5). Un seul individu présente un *sacrum bifidum* associé à une spondylolyse. Nous n'avons pas mis en évidence d'association statistiquement significative entre spondylolyse et SBO (Fisher, $p=0,33$; OR : 1,95 ; IC₉₅=[0,19-10,57]).



Figure 5. *Sacrum bifidum* complet chez un individu adulte, de sexe féminin, période moderne issu de la collection NDB. Vue postérieure / Complete sacrum bifidum in an adult female, modern individual from the NDB collection. Posterior view

Les données récoltées pour comparaison sont issues de 64 collections européennes et 57 collections provenant des autres continents (voir Matériel supplémentaire). La prévalence de la spondylolyse toutes périodes et toutes régions géographiques confondues fluctue entre 0 et 55,4 %. La figure 6 illustre la prévalence de la spondylolyse par continent toutes périodes confondues. Au niveau européen, grâce au nombre élevé d'études sur la spondylolyse nous avons pu noter sa prévalence en fonction des périodes : elle était comprise entre 0 et 12,4 % à la période médiévale (médiane à 4,6 %) et entre 0 et 9,1 % à la période moderne (médiane à 2,2 %) (figure 7). La différence entre la médiane des prévalences médiévales et modernes était statistiquement significative (Wilcoxon, $p<0,001$).

Discussion

Données actuelles

Dans cette étude, la prévalence de la spondylolyse lombaire est évaluée à 5,2 % au sein d'un échantillon de 496 patients de plus de 18 ans, sans différence en fonction des classes d'âge ou du sexe. Il s'agit à notre connaissance de la plus importante série d'étude tomodensitométrique européenne dédiée à la spondylolyse. Les précédentes

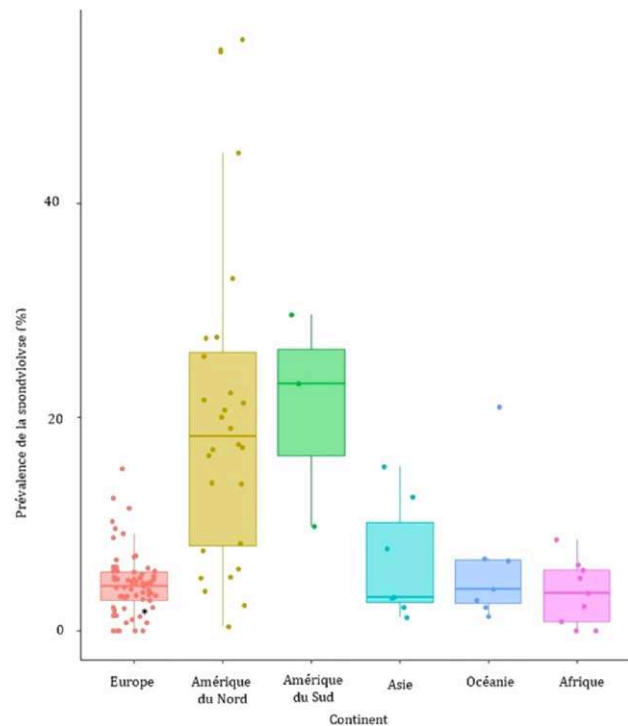


Figure 6. Prévalences de la spondylolyse en fonction des continents. Chaque point représente la prévalence au sein d'une collection. La prévalence issue de la collection NDB est signalée par * / Prevalence of spondylolysis by continent. Each dot represents the prevalence within a collection. The prevalence from the NDB collection is indicated by *

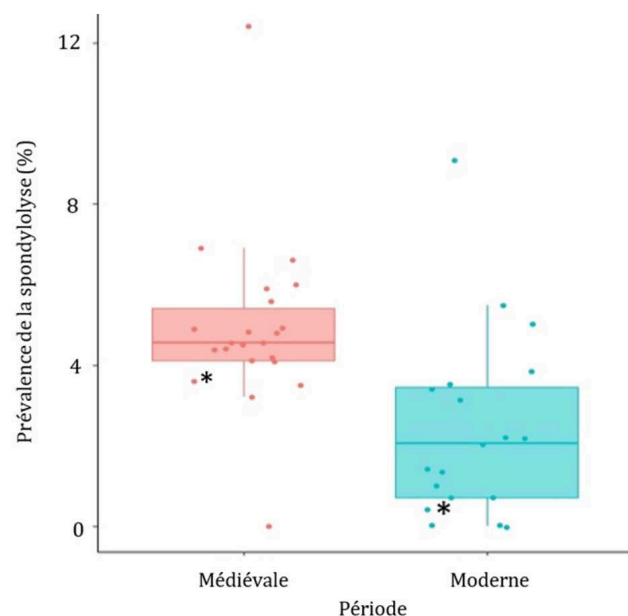


Figure 7. Prévalences de la spondylolyse au sein de la collection NDB et des collections européennes en fonction des périodes médiévale et moderne. Chaque point représente la prévalence au sein d'une collection. Les données issues de NDB sont signalées par * / Prevalence of spondylolysis within the NDB collection and European collections for the mediaeval and modern periods. Each dot represents the prevalence within a collection. Data from NDB are indicated by *

études européennes de grande ampleur sur la spondylolyse se sont fondées sur l'analyse de radiographies. Or, la sensibilité de la radiographie est inférieure à celle de la TDM pour le diagnostic de cette lésion (Leone et al., 2011). Nos résultats sont cohérents avec ceux d'autres études tomodensitométriques internationales réalisées chez des patients adultes asymptomatiques issus de la population générale : prévalence de 5,9 % dans une étude japonaise menée sur 2 000 patients (Sakai et al., 2009), prévalence de 8,0 % dans une étude nord-américaine ayant porté sur 2 555 patients (Brooks et al., 2010). Actuellement, la prévalence de la spondylolyse dans la population générale semble donc comparable quelle que soit l'origine géographique. Les études récentes ne mettent pas non plus en évidence de différence de prévalence en fonction de l'âge chez les adultes, ce qui conforte l'hypothèse d'une augmentation de la prévalence de la spondylolyse durant l'enfance et l'adolescence, puis de sa stabilisation à l'âge adulte (Beutler et al., 2003 ; Sakai et al., 2009 ; Brooks et al., 2010).

L'absence de différence de sexe ratio relevée est en accord avec les résultats d'Urrutia et al., (2017) dans leur étude scanographique de 463 individus, mais va à l'encontre des résultats d'autres études qui sont en faveur d'une prévalence de 1,5 à 3 fois plus élevée chez les sujets de sexe masculin (Belfi et al., 2006 ; Sakai et al., 2009 ; Brooks et al., 2010). La raison de la surreprésentation masculine parfois décrite n'a toujours pas été éclaircie (Sakai et al., 2009). Le rôle de l'activité est suggéré, cependant peu de données sont disponibles sur le sexe ratio de la spondylolyse parmi les jeunes athlètes d'élite, qui représentent le groupe contemporain avec la plus forte prévalence (Rossi et Dragoni, 1994 ; Micheli et Wood, 1995 ; Sousa et al., 2017). Les études concernant les athlètes féminines sont composées d'effectifs d'individus trop faibles pour pouvoir conclure sur la prévalence (Bennett et al., 2006).

La prédominance masculine de la SBO retrouvée dans notre étude est elle aussi rapportée dans la littérature (Fidas et al., 1987 ; Sakai et al., 2009 ; Urrutia et al., 2017). En revanche, sa prévalence chez les adultes apparaît très variable selon les études, allant de 7,7 % (Urrutia et al., 2017) à 59 % (Fredrickson et al., 1984). Certains auteurs considèrent même qu'il s'agit d'une variante de la normale (Copp et al., 2013). Cette diversité s'explique au moins en partie par l'absence de consensus quant aux critères diagnostics de SBO (Fidas et al., 1987 ; Eubanks et Cheruvu, 2009) et à l'utilisation de techniques diagnostiques différentes en fonction des études (radiographies *versus* TDM). Cependant, il a été suggéré à partir d'études radiographiques, puis confirmé par le biais d'études scanographiques, que la spondylolyse est associée à la présence de SBO (Fredrickson et al., 1984 ; Sakai et al., 2009 ; Urrutia et al., 2016). Nos résultats sont en faveur de cette association. Sairyo et collaborateurs (2006), grâce à l'emploi d'un modèle mathématique, ont montré que la présence de *spina bifida* lombaire n'augmente pas le stress au niveau de la pars *interarticularis* de la vertèbre impliquée. Or, les spondylolyses sont plus fréquemment associées à une SBO de la vertèbre sous-jacente

à la spondylolyse, de sorte que l'hypothèse biomécanique reste toujours privilégiée.

Paléopidémologie de la spondylolyse

L'étude d'un corpus de 455 individus issu de site funéraires en usage depuis l'Antiquité tardive jusqu'à la période moderne nous a permis d'identifier 9 cas de spondylolyse. Il s'agit à notre connaissance de la plus large étude paléopathologique spécifiquement dédiée à l'analyse des spondylolyses et de leur terrain pathologique rachidien sous-jacent menée à ce jour en France. Au sein de l'échantillon étudié, nous n'avons pas révélé de différence de prévalence de la spondylolyse entre hommes et femmes. Les résultats paléopathologiques concernant les prévalences en fonction du sexe sont toutefois à prendre avec précaution, divers facteurs, tels que le recrutement funéraire d'un site ou le nombre des sujets de sexe indéterminé, pouvant être sources de biais (Stirland, 1996 ; Vidal et al., 2013 ; Barbet et al., 2014). Les résultats de nombreuses études sont en faveur d'une surreprésentation masculine de la spondylolyse sans pour autant être significatifs (Arriaza, 1997 ; Fibiger et Knüsel, 2005 ; Merbs, 1996b, 2002 ; Roche et Rowe, 1951 ; Stewart, 1931 ; Weiss, 2009). Le rôle de l'activité est principalement évoqué pour expliquer ces différences, notamment dans les groupes aux activités connues comme les Chamorros sur l'île de Guam (Arriaza, 1997). Par ailleurs, les différences biologiques entre les sexes pourraient aussi prédisposer les sujets masculins à la survenue de cette lésion. Weiss (2009), dans son étude sur une série sud-américaine, a mis en évidence que la présence de spondylolyse était associée à la lombalisation sacrée chez les hommes uniquement.

L'extrême variabilité des prévalences de spondylolyse selon les collections à l'échelle mondiale met en évidence les difficultés rencontrées lors de l'étude de cette lésion en paléopathologie. Par ailleurs, le peu de données sur la spondylolyse en Amérique du Sud, Asie, Océanie et Afrique ne permet pas d'extrapoler davantage les informations paléopidémologiques. Il est à noter que la pratique de la crémation était très répandue en Asie et en Afrique dans les populations anciennes, ainsi qu'en Europe durant l'Antiquité, ce qui explique en partie le faible nombre de collections disponibles (Cousin, 2007 ; Sakai et al., 2009).

Nos résultats montrent que l'interprétation des prévalences issues de collections ostéologiques est très délicate, tant pour les raisons précédemment évoquées (recrutement, état de conservation), qu'en raison du fait que le mode de calcul utilisé n'est pas toujours renseigné, ce qui ne permet que rarement des comparaisons fiables (Merbs, 1996). Dans leur étude diachronique menée en Grande-Bretagne, Fibiger et Knüsel (2005) ont montré que la prévalence de la spondylolyse au sein d'une même population varie de moins de 1 % à plus de 12 % en fonction du mode de calcul retenu. Malgré la grande diversité des collections étudiées, la prévalence de la spondylolyse lombo-sacrée au sein des populations européennes semble plus fréquente à la période

médiévale qu'à la période moderne comme le suggéraient déjà les résultats des travaux de Waldron (1991) et de Fibiger et Knüsel (2005). Cette différence en fonction des périodes peut suggérer un mode de vie moins ardu physiquement à la période moderne qu'à la période médiévale. De même, les prévalences très élevées au sein des 16 collections Inuits et Eskimos recensées soulignent le rôle probable du mode de vie dans la survenue de cette lésion.

Seuls quelques cas de spondylolyses atypiques ont été recensés dans l'ensemble de notre travail d'analyse et bibliographique : un cas de spondylolyse double isthmique et pédiculaire sur une même vertèbre chez un sujet issu de la collection des Iboussières et deux cas de spondylolyse sacrée (l'un au sein du corpus de NDB et l'autre décrit par D'Angelo del Campo et collaborateurs (2017)). Il s'agit d'une atteinte rarement décrite, un seul article de paléopathologie faisant référence exclusivement aux spondylolyses sacrées (Merbs, 1996b). Par ailleurs, nous n'avons pas trouvé de description de spondylolyse sacrée dans la littérature clinique. Il s'agit d'une lésion probablement plus facile à mettre en évidence sur os sec que par des examens d'imagerie médicale. Il semble intéressant de continuer à documenter ces lésions atypiques en paléopathologie, qui impliquent une biomécanique du rachis potentiellement différente des spondylolyses lombaires isthmiques comme le suggère Merbs (1996b).

Au sein du corpus de NDB, 12 % des individus avaient une SBO mais seulement un cas était associé à une spondylolyse. Nous n'avons donc pas mis en évidence de lien entre SBO et spondylolyse. Dans la littérature paléopathologique, plusieurs auteurs décrivent des cas de spondylolyses associées à une SBO lombaire ou sacrée sans lien statistiquement significatif (Signoli et al., 1996 ; Paja, 2001 ; Thomann, 2004 ; Vidal et al., 2013), y compris lors de l'étude dédiée menée par Waldron (1993). Or, cette association a bien été mise en évidence en clinique et confirmée par la partie tomodynamométrique de notre étude. Cette différence pourrait s'expliquer du fait que l'analyse des images tomodynamométriques permet une étude complète et exhaustive du rachis qui est parfois impossible en paléopathologie compte tenu de l'état de conservation, du sacrum notamment. Par ailleurs, comme le souligne notre revue de la littérature, les anomalies rachidiennes lombaires associées à la spondylolyse sont rarement renseignées dans les études paléopathologiques. Dans la littérature paléopathologique et clinique, plusieurs éléments seraient en défaveurs d'une tendance séculaire de la SBO. Dans leur étude portant sur 1 943 individus issus de séries préhistoriques et historiques nord-américaines, Mulhern et Wilczak (2015) ne mettent pas en évidence de différence quant à la prévalence des *sacrum bifidum* complets en fonction des périodes. Par ailleurs, si la supplémentation en folates est un moyen efficace pour prévenir les dysraphies spinales sévères, il n'y a pas de différence concernant la prévalence de la SBO chez les sujets nés avant ou après la supplémentation systématique en folates des femmes enceintes (Copp et al., 2013 ; Urrutia et al., 2016). L'absence de preuve d'une tendance séculaire

de la SBO nous permet de conclure que, par analogie, la SBO était probablement aussi associée à la spondylolyse dans les populations anciennes.

De nouvelles études sur de grands ensembles ostéologiques homogènes (comme des charniers de pestiférés) seraient intéressantes afin de documenter de manière robuste la spondylolyse et son lien avec la SBO dans le passé. La mortalité non sélective dont est responsable la peste permet en effet une vision globale des pathologies à signification osseuse au sein d'une population vivante à une période donnée en se prémunissant de biais de recrutement inhérents aux collections issues de cimetières paroissiaux notamment (Kacki, 2017). Une nouvelle étude menée sur des séries anatomiques d'âge et de sexe connus pourrait par ailleurs permettre d'étayer les résultats obtenus par Roche et Rowe sur les collections anatomiques Todd et Terry en 1951, en s'affranchissant des problèmes liés à la conservation.

Conclusion

La prévalence de la spondylolyse au sein de la série actuelle française étudiée est de 5,2 %. Cette lésion est plus fréquente chez les sujets atteints de SBO. La création d'un modèle de *sacrum bifidum* serait intéressante pour étayer l'hypothèse biomécanique de cette association. Au sein de la collection ostéoarchéologique de NDB, la prévalence de la spondylolyse est de 2 % toutes périodes confondues. La prévalence de la spondylolyse semble plus élevée à la période médiévale qu'à la période moderne en Europe. De nouvelles études sur des populations aux activités connues avec une méthodologie reproductible seraient utiles afin de confirmer nos résultats et de documenter l'association entre spondylolyse et SBO en paléopathologie.

Remerciements

Nous remercions le personnel de l'ostéothèque DRAC PACA au dépôt archéologique régional d'Aix les Milles de nous avoir permis d'étudier la collection Notre-Dame-du-Bourg. Nous remercions le Pr Chagnaud, service d'imagerie médicale au CHU Conception à Marseille pour la mise à disposition du logiciel pour la relecture des scanners.

Informations supplémentaires

Les informations supplémentaires sont disponibles sur : <https://journals.openedition.org/bmsap/10279?file=1>

Références

- Albanese M, Pizzutillo PD (1982) Family study of spondylolysis and spondylolisthesis. *Journal of Pediatric Orthopedics* 2(5): 496-499 [<https://doi.org/10.1097/01241398-198212000-00006>]
- Ardagna Y (2001) Method for re-evaluating the prevalence of spinal diseases in human paleopathology. *Proceedings of the XIIIth European Meeting of the Paleopathology Association, Chieti, Italy, 18th-23rd September 2000*, 11-16

- Arriaza BT (1997) Spondylolysis in prehistoric human remains from Guam and its possible etiology. *American Journal of Physical Anthropology* 104(3):393-397 [https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199711)104:3<393::AID-AJPA8>3.0.CO;2-W]
- Barbet G, Joan L, Ancel MJ (2014) La nécropole gallo-romaine des “Charmes d’Amont” à Tavaux (Jura)
- Barnes E (2012) Atlas of Developmental Field Anomalies of the Human Skeleton: A Paleopathology Perspective. John Wiley & Sons, 232 p
- Belfi LM, Ortiz AO, Katz DS (2006) Computed Tomography Evaluation of Spondylolysis and Spondylolisthesis in Asymptomatic Patients. *Spine* 31(24):E907 [https://doi.org/10.1097/01.brs.0000245947.31473.0a]
- Bennett DL, Nassar L, DeLano MC (2006) Lumbar spine MRI in the elite-level female gymnast with low back pain. *Skeletal Radiology* 35(7):503-509 [https://doi.org/10.1007/s00256-006-0083-7]
- Beutler WJ, Fredrickson BE, Murtland A et al (2003) The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis: 45-year follow-up evaluation. *Spine* 28(10):1027-1035; discussion 1035 [https://doi.org/10.1097/01.BRS.0000061992.98108.A0]
- Bouchez I (2010) Évolution des marqueurs non conventionnels âge et sexe dépendants : Apport de la paléopathologie : étude de l’ostéoartrrose rachidienne [http://www.theses.fr/15148984X] (Consulté le 4 mai 2019)
- Bridges PS (1989) Spondylolysis and its relationship to degenerative joint disease in the prehistoric southeastern United States. *American Journal of Physical Anthropology* 79(3):321-329 [https://doi.org/10.1002/ajpa.1330790308]
- Brooks BK, Southam SL, Mlady GW et al (2010) Lumbar spine spondylolysis in the adult population: Using computed tomography to evaluate the possibility of adult onset lumbar spondylolysis as a cause of back pain. *Skeletal Radiology* 39(7):669-673 [https://doi.org/10.1007/s00256-009-0825-4]
- Bruzek J (2002) A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology* 117(2):157-168 [https://doi.org/10.1002/ajpa.10012]
- Buikstra JE, Ubelaker DH (1994) Standards for Data Collection from Human Skeletal Remains: Proceedings of a Seminar at the Field Museum of Natural History, Fayetteville, Arkansas Archeological Survey (Arkansas Archeological Survey Research Series, 44). Arkansas Archeological Survey.
- Copp AJ, Stanier P, Greene ND (2013) Neural tube defects: Recent advances, unsolved questions, and controversies. *The Lancet Neurology* 12(8):799-810 [https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70110-8]
- Coqueugniot H, Weaver TD, Houët F (2010) Brief communication: A probabilistic approach to age estimation from infracranial sequences of maturation. *American Journal of Physical Anthropology* 142(4):655-664 [https://doi.org/10.1002/ajpa.21312]
- Cousin J (2007) La crémation la mort. *Études sur la mort* 132(2): 87-100
- D’Angelo del Campo MD, Suby JA, García-Laborde P et al (2017) Spondylolysis in the past: A case study of hunter-gatherers from Southern Patagonia. *International Journal of Paleopathology* 19:1-17 [https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2017.07.001]
- Démians D’Archimbaud G, Pelletier JP, Flavigny F et al (2010) Notre-Dame du Bourg à Digne. Fouilles, restauration et aménagements liturgiques : une chronique monumentale de vingt siècles, Plan patrimoine Antique, 133 p
- Deverly D, Dutour O, Ardagna Y (2002) Étude paléopathologique de la spondylolyse et son rapport avec le spina bifida. Université Aix-Marseille II, Faculté de médecine de Marseille
- Ellis H (1981) Cunningham’s textbook of anatomy. Edited G.J. Romanes. Oxford University Press, Oxford 1078 p
- Eubanks JD, Cheruvu VK (2009) Prevalence of sacral spina bifida occulta and its relationship to age, sex, race, and the sacral table angle: An anatomic, osteologic study of three thousand one hundred specimens. *Spine* 34(15):1539-1543 [https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181a98560]
- Fibiger L, Knüsel CJ (2005) Prevalence rates of spondylolysis in British skeletal populations. *International Journal of Osteoarchaeology* 15(3):164-174 [https://doi.org/10.1002/oa.766]
- Fidas A, MacDonald HL, Elton RA et al (1987) Prevalence and patterns of *spina bifida occulta* in 2707 normal adults. *Clinical Radiology* 38(5):537-542 [https://doi.org/10.1016/S0009-9260(87)80150-2]
- Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ et al (1984) The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 66(5):699-707
- Grobler LJ, Robertson PA, Novotny JE et al (1993) Etiology of spondylolisthesis. Assessment of the role played by lumbar facet joint morphology. *Spine* 18(1):80-91
- Ikata T, Miyake R, Katoh S et al (1996) Pathogenesis of sports-related spondylolisthesis in adolescents. Radiographic and magnetic resonance imaging study. *The American Journal of Sports Medicine* 24(1):94-98 [https://doi.org/10.1177/036354659602400117]
- Jiménez-Brobeil S, Roca-Rodríguez M, Al OI et al (2012) Vertebral pathologies and related activity patterns in two mediaeval populations from Spain. *Collegium Antropologicum* 36(3): 1019-1025
- Kacki S (2017) Influence de l’état sanitaire des populations du passé sur la mortalité en temps de peste : Contribution à la paléopidémologie. *Bulletins et Mémoires de la Société d’Anthropologie de Paris* 29(3-4):202-212 [https://doi.org/10.1007/s13219-017-0189-6]
- Lanteri L (2016) Recrutement, paléodémographie et cémento-chronologie : Application à un contexte d’inhumation paroissial d’Ancien Régime : Notre-Dame du Bourg à Digne (04) [http://www.theses.fr/199525366] (consulté le 29 avril 2019)
- Leone A, Cianfoni A, Cerase A et al (2011) Lumbar spondylolysis: A review. *Skeletal Radiology* 40(6):683-700 [https://doi.org/10.1007/s00256-010-0942-0]
- Lessa A (2011) Spondylolysis and lifestyle among prehistoric coastal groups from Brazil. *International Journal of Osteoarchaeology* 21(6):660-668 [https://doi.org/10.1002/oa.1172]
- Lovejoy CO, Meindl RS, Pryzbeck TR et al (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(1):15-28 [https://doi.org/10.1002/ajpa.1330680103]

- Mays S (2006) Spondylolysis, spondylolisthesis, and lumbosacral morphology in a medieval English skeletal population. *American Journal of Physical Anthropology* 131(3):352-362 [https://doi.org/10.1002/ajpa.20447]
- Merbs CF (1996a) Spondylolysis and spondylolisthesis: A cost of being an erect biped or a clever adaptation? *American Journal of Physical Anthropology* 101(S23):201-228 [https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(1996)23+<201::AID-AJPA8>3.0.CO;2-7]
- Merbs CF (1996b) Spondylolysis of the sacrum in Alaskan and Canadian Inuit skeletons. *American Journal of Physical Anthropology* 101(3):357-367 [https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(1996)101:3<357::AID-AJPA5>3.0.CO;2-W]
- Merbs CF (2002) Spondylolysis in Inuit skeletons from Arctic Canada. *International Journal of Osteoarchaeology* 12(4):279-290 [https://doi.org/10.1002/oa.623]
- Micheli LJ, Wood R (1995) Back pain in young athletes. Significant differences from adults in causes and patterns. *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine* 149(1):15-18 [https://doi.org/10.1001/archpedi.1995.02170130017004]
- Miyake R, Ikata T, Katoh S et al (1996) Morphologic Analysis of the Facet Joint in the Immature Lumbosacral Spine With Special Reference to Spondylolysis. *Spine* 21(7):783-789 [https://doi.org/10.1097/00007632-199604010-00001]
- Mulhern DM, Wilczak CA (2015) Frequency of Complete Cleft Sacra in a Native American Sample. *International Journal of Osteoarchaeology* 25(2):226-233 [https://doi.org/10.1002/oa.2280]
- Murail P, Bruzek J, Houët F et al (2005) DSP: A tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 17 (3-4):167-176 [https://doi.org/10.4000/bmsap.1157]
- Nakai M (2001) Vertebral age changes in Japanese macaques. *American Journal of Physical Anthropology* 116(1):59-65 [https://doi.org/10.1002/ajpa.1102]
- Ogilvie JW, Sherman J (1987) Spondylolysis in Scheuermann's disease. *Spine* 12(3):251-253 [https://doi.org/10.1097/00007632-198704000-00010]
- Ortner DJ (2003) *Identification of Pathological Conditions in Human Skeletal Remains*, Academic Press, San Diego, California, 664 p
- Paja L (2001) Palaeopathological and palaeodemographical examination and analysis in the series of Hyères-Saint Pierre, Mémoire de Diplôme Universitaire en Anthropologie Biologique, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille 2, Faculté de Médecine
- Parmentier S (2010) Une nouvelle méthode d'estimation du nombre minimum d'individus (NMI) par une approche allométrique : le NMI par exclusions. Applications aux séries ostéologiques de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Thesis, Aix-Marseille 2
- Pilloud MA, Canzonieri C (2014) The Occurrence and Possible Aetiology of Spondylolysis in a Pre-contact California Population. *International Journal of Osteoarchaeology* 24(5):602-613 [https://doi.org/10.1002/oa.2245]
- Roche MB, Rowe GG (1951) The incidence of separate neural arch and coincident bone variations; a survey of 4,200 skeletons. *The Anatomical Record* 109(2):233-252 [https://doi.org/10.1002/ar.1091090207]
- Rojas-Sepúlveda C, Ardagna Y, Dutour O (2008) Paleoepidemiology of vertebral degenerative disease in a Pre-Columbian Muisca series from Colombia. *American Journal of Physical Anthropology* 135(4):416-430 [https://doi.org/10.1002/ajpa.20762]
- Rosenberg NJ, Bargar WL, Friedman VB (1981) The incidence of spondylolysis and spondylolisthesis in nonambulatory patients. *Spine* 6(1):35-38 [https://doi.org/10.1097/00007632-198101000-00005]
- Rossi F, Dragoni S (1994) Lumbar spondylolysis and sports. The radiological findings and statistical considerations. *La Radiologia Medica* 87(4):397-400
- Sairyo K, Goel VK, Vadapalli S et al (2006) Biomechanical comparison of lumbar spine with or without spina bifida occulta. A finite element analysis. *Spinal Cord* 44(7):440-444 [https://doi.org/10.1038/sj.sc.3101867]
- Sakai T, Sairyo K, Takao S et al (2009) Incidence of lumbar spondylolysis in the general population in Japan based on multidetector computed tomography scans from two thousand subjects. *Spine* 34(21):2346-2350 [https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181b4abbe]
- Schmitt A (2005) Une nouvelle méthode pour estimer l'âge au décès des adultes à partir de la surface sacro-pelvienne iliaque. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 17(1-2):89-101 [https://doi.org/10.4000/bmsap.943]
- Signoli M, Da Silva J, Georgeon E et al (1996) Vérification de la mort durant la Grande Peste de marseille : Données anthropologiques issues de la fouille du charnier de l'Observance (Marseille). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 322:333-339
- Sonne-Holm S, Jacobsen S, Røvsing HC et al (2007) Lumbar spondylolysis: A life long dynamic condition? A cross sectional survey of 4,151 adults. *European Spine Journal* 16(6):821-828 [https://doi.org/10.1007/s00586-006-0250-5]
- Sousa T, Skaggs DL, Chan P et al (2017) Benign Natural History of Spondylolysis in Adolescence With Midterm Follow-Up. *Spine Deformity* 5(2):134-138 [https://doi.org/10.1016/j.jspd.2016.10.005]
- Stewart TD (1931) Incidence of separate neural arch in the lumbar vertebrae of Eskimos. *Am J Phys Anthropol* 16:51-62 [https://doi.org/10.1002/ajpa.1330160116]
- Stirland A (1996) Patterns of trauma in a unique medieval parish cemetery. *International Journal of Osteoarchaeology* 6(1):92-100 [https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1212(1996)6:1<92::AID-OA260>3.0.CO;2-L]
- Team RC (2013) *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria
- Thomann A (2004) Pratiques funéraires et anthropologie biologique d'une population en contexte rural au haut Moyen Âge en Provence. Le site de Saint-Estève le Pont (Berre l'Étang, Bouches-du-Rhône), Université de la Méditerranée
- Trinkaus E (2018) An abundance of developmental anomalies and abnormalities in Pleistocene people. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(47):11941-11946 [https://doi.org/10.1073/pnas.1814989115]
- Urrutia J, Cuellar J, Zamora T (2016) Spondylolysis and *spina bifida occulta* in pediatric patients: Prevalence study using computed tomography as a screening method. *European Spine* 25(2):590-595 [https://doi.org/10.1007/s00586-014-3480-y]

- Urrutia J, Zamora T, Cuellar J (2017) Does the Prevalence of Spondylolysis and *Spina Bifida Occulta* Observed in Pediatric Patients Remain Stable in Adults? *Clinical Spine Surgery* 30(8): E1117-E1121 [<https://doi.org/10.1097/BSD.000000000000209>]
- Vidal L, Seguin M, Ardagna Y (2013) Laudun : Saint-Jean-de-Todon alias Saint-Jean-de-Rousigues, notice archéologique, Bilan scientifique régional Languedoc-Roussillon, pp 81-82
- Waldron HA (1991) Variations in the prevalence of spondylolysis in early British populations. *Journal of the Royal Society of Medicine* 84(9):547-549
- Waldron T (1993) A case-referent study of spondylolysis and spina bifida and transitional vertebrae in human skeletal remains. *International Journal of Osteoarchaeology* 3(1):55-57 [<https://doi.org/10.1002/oa.1390030109>]
- Ward CV, Latimer B (2005) Human evolution and the development of spondylolysis. *Spine* 30(16):1808-1814 [<https://doi.org/10.1097/01.brs.0000174273.85164.67>]
- Ward CV, Mays SA, Child S et al (2010) Lumbar vertebral morphology and isthmic spondylolysis in a British medieval population. *American Journal of Physical Anthropology* 141(2):273-280 [<https://doi.org/10.1002/ajpa.21142>]
- Weiss E (2009) Spondylolysis in a pre-contact San Francisco Bay population: Behavioural and anatomical sex differences. *International Journal of Osteoarchaeology* 19(3):375-385 [<https://doi.org/10.1002/oa.986>]
- Wiltse LL, Newman PH, Macnab I (1976) Classification of spondylolysis and spondylolisthesis. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 117:23-29
- Yamada A, Sairyo K, Shibuya I et al (2013) Lumbar Spondylolysis in Juveniles from the Same Family: A Report of Three Cases and a Review of the Literature. *Case Reports in Orthopedics* [<https://doi.org/10.1155/2013/272514>]