

L'homme debout. Imagerie. Le système EOS

Imaging of the standing man. EOS system

G Morvan [1], V Vuillemin, H Guerini, M Wybier, Ph Mathieu, F Zeitoun, Ph Bossard, F Thévenin, F Préaux, S Merran

1. Cabinet d'Imagerie Léonard de Vinci, 43, rue Cortambert, 75016 Paris

Mots clés

- ◆ Rachis
- ◆ Équilibre sagittal
- ◆ Téléradiographie
- ◆ Imagerie numérisée
- ◆ Cyphose
- ◆ Lordose
- ◆ Bassin
- ◆ Sacrum

Résumé

L'homme, bipède permanent, vit debout et se déplace dans un monde soumis aux lois de la gravitation. La morphologie du corps humain, sa statique et les relations entre les membres inférieurs, le pelvis et le rachis sont directement en rapport avec ces contraintes gravitationnelles et la bipédie. Cette position a entraîné un élargissement et un redressement du bassin, l'apparition de courbures rachidiennes sagittales caractéristiques ainsi qu'une profonde transformation de la musculature de soutien du rachis. Le bassin de chaque individu est caractérisé par son angle d'incidence, reflet de la morphologie sagittale du bassin et de la position du *sacrum*. Cette caractéristique anatomique fondamentale, propre à chaque individu, détermine pour un individu donné l'équilibre sagittal le moins consommateur d'énergie possible. L'angle d'incidence conditionne la pente sacrée, à l'origine de la lordose lombaire, elle-même régissant la version pelvienne, la cyphose thoracique, la position du rachis cervical et de la tête ainsi que la statique des membres inférieurs. Tous ces points peuvent être étudiés et mesurés sur une simple téléradiographie de profil. La connaissance de ces interrelations fonctionnelles est indispensable à la compréhension des troubles statiques du rachis.

Les téléradiographies, en général numérisées, constituent à ce jour le moyen d'étude le plus habituel de la station humaine érigée. Ces téléradiographies sont source de l'irradiation importante d'un large territoire radiosensible (le tronc et le bassin) et, dans l'ensemble, de qualité médiocre. Certaines tables télécommandées, équipées d'une translation simultanée du tube radiogène et du capteur, permettent la réalisation de radiographies par balayage, avec un gain en qualité et en dose qui demeure habituellement modeste.

EOS est un nouvel système qui permet d'obtenir une vue du corps entier debout, d'excellente qualité, de face, de profil ou simultanément dans ces deux incidences. Ce système, grâce à des récepteurs gazeux de Charpak particulièrement sensibles et à une très forte collimation des faisceaux de rayons X, ne requiert qu'une faible dose de rayons, de six à neuf fois inférieure aux radiographies habituelles. A partir de ces seules vues frontale et sagittale, une reconstruction tridimensionnelle de l'enveloppe du squelette pelvirachidien et des membres inférieurs est possible grâce à une technique de « bone morphing ». Cette reconstruction permet d'avoir accès au plan axial, qui échappait jusqu'ici aux radiographies, et d'obtenir des mesures précises dans ce plan : rotation de chaque vertèbre, torsion des membres inférieurs...

Ce système EOS, encore à ses débuts, joue d'ores et déjà et jouera selon toute vraisemblance dans le futur, un rôle majeur dans l'évaluation de la statique humaine.

Keywords

- ◆ Spine
- ◆ Sagittal balance
- ◆ Teleradiography
- ◆ Digitalized spinal radiographs
- ◆ Kyphosis
- ◆ Lordosis
- ◆ Posture
- ◆ Sagittal balance

Abstract

Man, with his erect posture, evolves in a world subject to the laws of gravity. His skeleton reflects these constraints. The morphology and static of human spine and biomechanical relationships between spine and pelvis are in direct relation with bipedia. Owing to this position, the pelvis widened and straightened, characteristic sagittal spinal curves appeared and the perispinal muscles were deeply reorganized. Each pelvis is characterized by a major anatomical landmark: the pelvic incidence angle that reflects the sagittal morphology of the pelvis and the position of the *sacrum*. Based on this anatomical characteristic, a chain of reactions determines the more efficient equilibrium of the whole body in the sagittal plane in term of energy consumption. Incidence affects the sacral slope, which determines lumbar lordosis, which itself influences the pelvic tilt, the thoracic kyphosis, the position of the cervical spine and the head and even the hips and knees' position. All these landmarks can easily be studied on a sagittal whole body radiograph. Knowledge of these functional relationships is essential to understand the origin of sagittal imbalance and above all before surgical treatment of spine disorders, especially when a surgical arthrodesis is considered.

Nowadays, digitalized teleradiography remains the most commonly used tool for the study of the body sagittal balance. The irradiation given by this technique is important, and concerns large areas (trunk and pelvis) very sensitive to radiations for often a poor photographic result. Some radiographic tables allow the realization of digitalized spinal radiographs by simultaneous translation of X-ray tube and receptor.

EOS system is a new low dose system which gives very good quality images, permits a simultaneous acquisition of upright frontal and sagittal views, is able to cover in the same time the spine and the lower limbs and study the axial plane on 3D envelope reconstructions by bone-morphing technique. This new EOS low dose system take already a great place in the study of the pelvispinal balance and will take a greater one in the future.

Correspondance :

Gérard Morvan

Cabinet d'Imagerie Léonard de Vinci, 43, rue Cortambert, 75016 Paris

E-mail : gerard.morvan@yahoo.fr

Disponible en ligne sur www.acad-chirurgie.fr

1634-0647 - © 2013 Académie nationale de chirurgie. Tous droits réservés.

L'homme vit debout et se meut dans un monde soumis aux lois de la gravitation universelle. La morphologie et la statique du rachis humain ainsi que les relations entre rachis, bassin et membres inférieurs sont directement en rapport avec la bipédie et la pesanteur. Par rapport aux autres mammifères - même les autres grands singes - la position debout permanente d'Homo a été à l'origine d'un redressement du bassin, de l'apparition de courbures rachidiennes sagittales caractéristiques et d'une profonde modification de la musculature de soutien du rachis (1). Les troubles de la statique pelvirachidienne, bien que fortement pathogènes (douleurs, spondylolisthésis par lyse ischémique, arthrose zygapophysaire, sténoses, spondylolisthésis dégénératifs...) sont souvent ignorés. Or, ces troubles statiques peuvent être facilement détectés et quantifiés sur de simples radiographies de face et de profil de l'ensemble du rachis.

La bipédie humaine

Les représentants du genre Homo ont tous été bipèdes exclusifs, mais la bipédie n'est nullement l'apanage de l'homme. Il a existé au fil du temps - et il existe encore - de nombreuses espèces usant de formes très variées de bipédie : des dinosaures archosauriens qui utilisaient leur queue comme balancier aux oiseaux actuels, de certains primates non humains aux ours... Oiseaux mis à part, la majorité des bipèdes n'utilisent qu'occasionnellement cette position, inconfortable et fatigante pour eux. La bipédie humaine est différente : elle est exclusive, stable et ergonomique. Exclusive et permanente, elle libère complètement le membre supérieur, dès lors disponible pour accomplir des tâches ou porter des objets. Stable, malgré un polygone de sustentation particulièrement réduit, elle dispense d'un d'ancrage du pied au sol, autorise le port de charges et la course et permet une position parfaitement verticale, le plan du regard étant horizontal, fixe et stable, condition indispensable à un référentiel efficace des canaux semi-circulaires et donc à un bon équilibre. Ergonomique et faible consommatrice d'énergie, elle permet les marches prolongées et le trot sans fatigue excessive, conditions indispensables à la survie des peuples de chasseurs (2). Ce type de bipédie a impliqué de profondes modifications du corps humain, qui s'est spécialisé de la tête aux pieds dans la marche et la course, en délaissant nombre de ses caractères arboricoles originels.

Figure 1. Haut : Squelette de tigre : bassin et rachis lombaire horizontaux. Droite : La position de départ du sprint reproduit la position quadrupède pour un maximum de poussée de membres inférieurs. Bas : Squelette humain (Vésale) : bassin et rachis lombaire verticaux.



Les transformations du corps humain nécessaires à la bipédie

Les structures portantes (rachis, membres inférieurs et bassin) se sont bien plus modifiées que les membres supérieurs.

Membres inférieurs

Les primates non humains marchent genoux et hanches fléchis. Chez l'homme, qui tient debout hanches et genoux en extension maximale, le fémur s'est allongé et verticalisé, la trochlée fémorale creusée pour stabiliser la patella pendant la marche et l'extrémité proximale du tibia élargie en plateau. Le pied s'est profondément transformé et a perdu sa fonction de préhension pour se consacrer à l'amortissement, la stabilisation et la propulsion. Il est devenu, bien plus que la main, le propre de l'homme.

Bassin

La verticalisation a fait du bassin une structure essentielle de l'appareil moteur humain : d'une structure horizontale propulsive qu'il est chez le quadrupède, le bassin s'est transformé en un organe vertical porteur chez le bipède. Cette évolution fut un compromis entre deux impératifs opposés : supporter le tronc et le rachis - ce qui sous-entend un bassin petit, massif et rigide - et permettre l'accouchement d'un enfant dont la tête s'est considérablement agrandie au fil du temps, ce qui voudrait un pelvis large et souple. Le bassin s'est donc redressé et élargi.

Le bassin s'est redressé : d'horizontal qu'il était chez les quadrupèdes, simple trait d'union entre tronc et membres postérieurs qui transmet au premier la force propulsive des seconds (c'est la position spontanément adoptée par les sprinters lors du départ pour favoriser la propulsion initiale) (fig01) le bassin s'est verticalisé. Le *sacrum* est devenu un piédestal, un socle pour le rachis. De la position de ce socle, plus ou moins incliné en avant, dépend étroitement celle du rachis lombaire (comme l'incurvation du tronc d'un arbre qui pousse sur une pente) et, par voie de conséquence, celui de la colonne vertébrale dans son ensemble.

Le bassin s'est élargi : d'allongé et étroit dans le plan transversal qu'il était chez les quadrupèdes, y compris chez les primates, le bassin humain est devenu plus large, plus bas et plus robuste pour soutenir les viscères et le poids du tronc, d'où le terme de bassin. Les ailes iliaques se sont élargies vers l'avant. L'*acétabulum* a découvert la partie antérieure des têtes fémorales, pour favoriser les mouvements de flexion de la hanche, de loin les plus importants dans la biomécanique humaine. Bien que le bassin ne se soit élargi que du strict minimum compatible avec l'accouchement, cet élargissement et ce redressement ont nécessité une considérable augmentation de puissance, donc de volume, des muscles glutéaux : moyen glutéal pour stabiliser latéralement le bassin lors de la marche, grand glutéal pour l'ériger.

Comme le bassin est en équilibre antéropostérieur sur les hanches, on comprend que la morphologie et la position respective des hanches, du bassin et du tronc jouent un rôle essentiel dans la statique du corps humain.



Figure 2a : Équilibre sagittal du bassin : éléments de comparaisons.

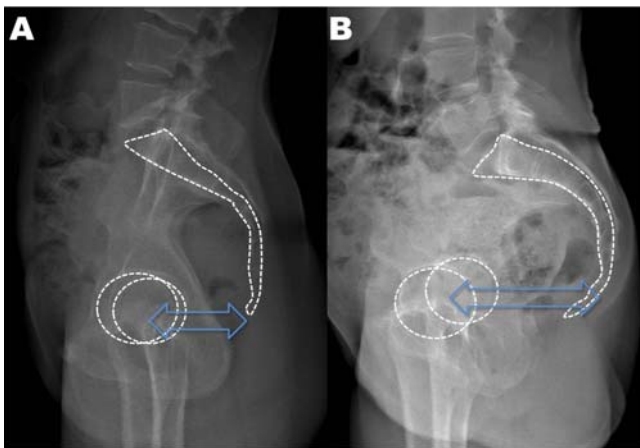


Figure 2b : Équilibre sagittal du bassin : éléments de comparaisons.

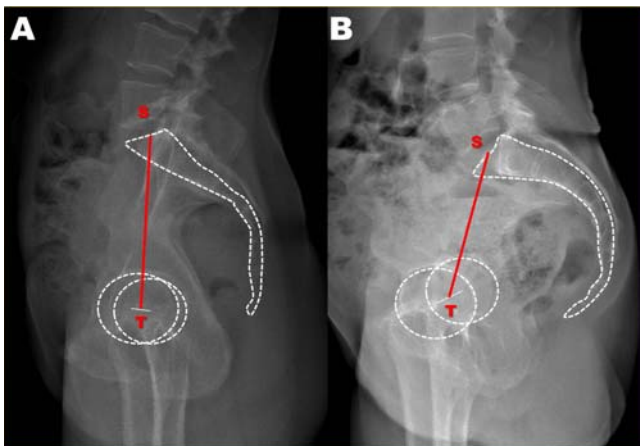


Figure 2c : Équilibre sagittal du bassin : éléments de comparaisons.

Rachis

La bipédie a induit des modifications majeures du rachis et de ses relations avec le bassin. Par rapport aux autres primates, la colonne vertébrale humaine possède non pas une, mais trois courbures sagittales (lordose lombaire, cyphose thoracique, lordose cervicale) auxquelles s'ajoute la cyphose sacrée. Alors que, chez les grands singes, le rachis est rigide et fait bloc avec le cou et le bassin, l'homme a un rachis cervical long et mobile. Sa tête, dégagée des épaules, peut se mouvoir indépendamment du tronc. Le rachis cervical humain est le seul à faire un angle droit avec la base du crâne, dont le *foramen magnum* est en position très antérieure. De même, la longueur et la souplesse du rachis lombaire humain et sa relative indépendance par rapport au bassin, sont de nature à faciliter la rotation axiale de ce dernier indispensable à la

marche rapide et la course. Ces trois courbures rendent le rachis humain mieux adapté à la station debout : il est plus résistant, plus souple et plus apte à bénéficier d'un haubanage musculaire efficace.

La statique frontale du bassin et du rachis

La statique rachidienne frontale du rachis et du bassin est simple : la colonne vertébrale est verticale, son axe de symétrie passant par le milieu du *sacrum* et de la symphyse pubienne. Le bassin normal est horizontal, avec des repères symétriques situés sur la même horizontale.

La statique sagittale du bassin et du rachis

La statique sagittale du rachis, nettement plus complexe, fait intervenir de nombreux facteurs, à la fois rachidiens et extrarachiens.

Facteurs extrarachiens

Les facteurs extrarachiens sont essentiellement les muscles inclus dans leurs fascias ainsi que les viscères. La station érigée nécessite une verticalisation du bassin, due essentiellement aux très puissants muscles grands glutéaux, et un haubanage du rachis dû aux muscles érecteurs qui raidissent, stabilisent et mobilisent ce dernier. Ces muscles participent activement à la lordose lombaire, dans la concavité de laquelle certains d'entre eux prennent place. Ils sont équilibrés en avant par les psoas (puissants, mais dont le bras de levier court est mécaniquement défavorable) et les muscles de la paroi abdominale (moins puissants, mais avec un bras de levier plus long). Les fascias des muscles érecteurs, dont la tension peut être contrôlée en fonction du degré de contraction des muscles, jouent un rôle majeur de stabilisation passive du rachis, encore mal connu, comparable à celui de la bandelette iliotibiale dans la statique passive du bassin et de la hanche. Les viscères abdominopelviques, pour peu qu'ils soient sanglés par des muscles pariétaux suffisamment puissants (théorie du caisson), contribuent à supporter une grande partie du poids du corps, ce qui soulage d'autant le rachis. Bien que ces éléments extrarachiens de sustentation du rachis soient indispensables à une station érigée normale, le rôle majeur revient au rachis lui-même (vertèbres, disques, divers ligaments intervertébraux, articulations zygapophysaires...) ainsi qu'aux relations, fondamentales, entre le rachis et le bassin.

Statique sagittale du bassin

L'angle d'incidence

Comment définir l'équilibre sagittal du bassin, compte tenu de la variabilité de sa morphologie, notamment dans le plan sagittal ? Soient deux bassins A et B radiographiés de profil (fig02a). Leur forme est différente : la distance entre les têtes fémorales et la partie verticale du *sacrum* est plus petite dans le bassin A que dans le bassin B (fig02b) : le premier bassin est donc moins « épais » sagittalement que le second. On pourrait concevoir de mesurer cette distance pour différencier les deux bassins, mais ceci ne prendrait pas en compte la position du plateau sacré, piédestal du rachis. D'où une autre idée : tracer la droite joignant le centre des têtes fémorales (T) au centre du plateau sacré (S) (fig02c) dont la longueur et la pente pourraient être chiffrées. Cependant, ce repère est encore imparfait puisqu'il ne prend pas en compte l'inclinaison du plateau sacré sur l'horizontale, moins marquée dans le bassin A que dans le B. Or, via le rachis, le poids

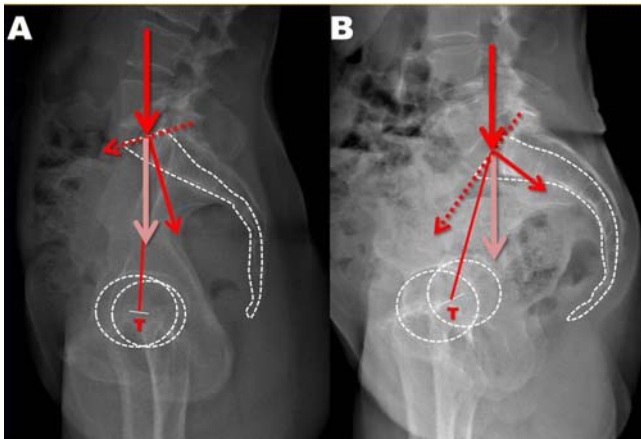


Figure 2d : Équilibre sagittal du bassin : éléments de comparaisons.

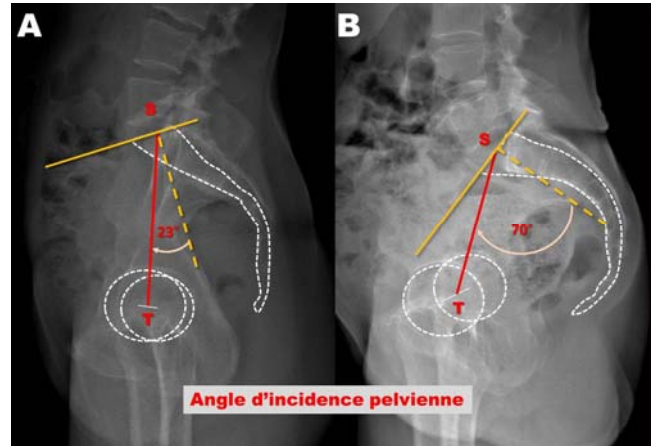


Figure 2e : Équilibre sagittal du bassin : éléments de comparaisons.

du corps s'applique sur le bassin au niveau du plateau sacré et, de là, passe aux têtes fémorales. Le vecteur vertical qui représente le poids du corps peut être décomposé en deux autres vecteurs, l'un parallèle au plateau sacré, l'autre perpendiculaire à ce dernier (fig02d). D'où l'idée simple et lumineuse de Duval-Beaupère (3) : associer la ligne TS et la tangente au plateau sacré et mesurer l'angle que font la ligne TS et la perpendiculaire au plateau sacré (fig02e). C'est l'angle d'incidence pelvienne. Le mot « incidence » vient de l'optique (ou du billard...) : c'est l'angle que fait le rayon incident (ici la ligne TS) avec la normale à une surface (ici la tangente au plateau sacré). Cet angle d'incidence, spécifique à chacun de nous, comme l'est la forme de notre nez ou la couleur de nos yeux, indépendant de la position du bassin, est en moyenne est de $55^\circ \pm 10^\circ$. Il peut en fait aller d'une vingtaine de degrés à plus de 80° , cette notion de moyenne n'ayant donc qu'un intérêt très limité à l'échelon individuel. C'est cet angle d'incidence, dont l'importance est fondamentale, qui conditionne la position du rachis. Pourquoi ?

Les angles de version pelvienne et de pente sacrée

Cet angle est fondamental parce qu'il est la somme de deux autres angles : la version pelvienne et la pente sacrée. La version pelvienne est l'angle que fait la ligne joignant le centre des têtes fémorales au centre du plateau sacré avec la verticale. La pente sacrée est l'angle que fait la tangente au plateau sacré avec l'horizontale (fig03). Une construction

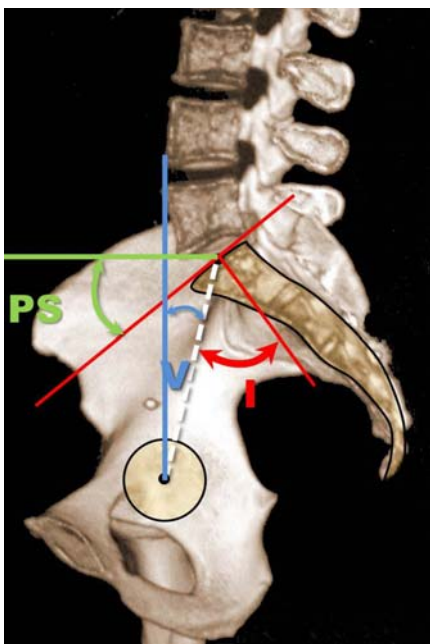


Figure 3 : Angles de version pelvienne (V) et de pente sacrée (PS). Leur somme égale l'angle d'incidence (I).

géométrique simple montre que la somme de ces deux angles égale l'angle d'incidence.

La version pelvienne (version vient de vertere : tourner, notion que l'on retrouve dans le geste de verser) reflète la position du bassin en équilibre autour d'un axe transversal passant par les têtes fémorales par rapport à la verticale. En prenant comme repère la partie crâniale du bassin, on parle d'antéversion quand cette partie pivote vers l'avant, de rétroversion quand elle bascule vers l'arrière (fig04). En moyenne, l'angle de version pelvienne est ouvert en arrière d'une dizaine de degrés : en position debout, à l'état normal, le bassin est donc légèrement penché vers l'avant. La valeur de cet angle de version pelvienne représente environ 15 à 20 % de celle de l'angle d'incidence. L'antéversion verticalise le plateau sacré, tandis que la rétroversion l'horizontalise (fig04).

De nombreuses affections dégénératives de la colonne s'accompagnent d'une diminution de ses courbures sagittales. Une rétroversion pelvienne réactionnelle représente le mécanisme d'adaptation le plus commun. Comme la version pelvienne est environ le cinquième de l'incidence, on conçoit que plus l'incidence est élevée, plus la possibilité de version du bassin est grande. La capacité de compensation d'un trouble de la statique sagittale du rachis par le biais de la rétroversion est donc proportionnelle à l'incidence. Les patients à forte incidence sont capables de compenser longtemps un trouble d'équilibre sagittal du rachis en rétroversant de manière importante leur bassin.

Quand le bassin s'antéverse, l'acétabulum vient couvrir les têtes fémorales en avant (fig04) et les découvre en arrière. Lors de la rétroversion, c'est l'inverse : la hanche est découverte en avant et trop recouverte en arrière (fig04). Ceci est également vrai pour les prothèses de hanche. Une rétroversion importante du bassin peut ainsi limiter l'extension de la hanche prothétique, voire luxer la tête en avant par effet

Figure 4. Antéversion, version normale et rétroversion du bassin.

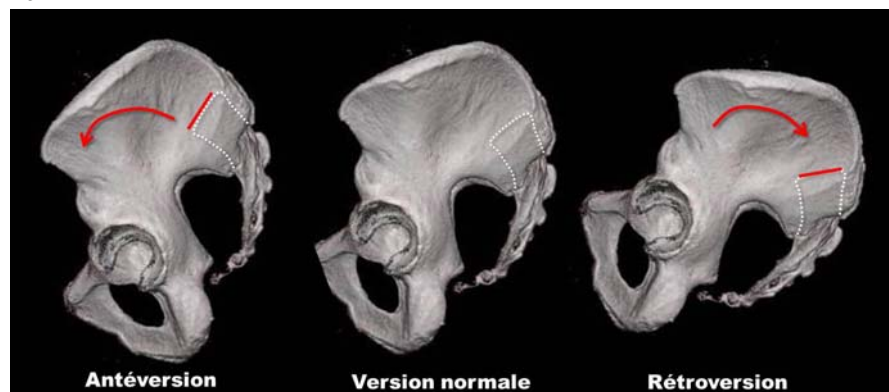




Figure 5. Mesure de la position fonctionnelle de l'acétabulum prothétique en position debout sur le système EOS.

came (4), d'où l'importance de la mesure de la position fonctionnelle de l'acétabulum en position debout, autorisée par le système EOS (fig05).

Un bassin anté ou rétroversé a un aspect caractéristique, immédiatement reconnaissable sur une radiographie de face (fig06) : le bassin antéversé semble vu de dessus avec des ailes iliaques étalées, un détroit supérieur ouvert et un sacrum, une symphyse pubienne et des trous obturateurs vus en enfilade. Inversement, le bassin rétroversé paraît vu de dessous, avec des trous obturateurs trop visibles, une symphyse étalée, trop haute et un sacrum verticalisé. Au vu d'une radiographie de bassin de face, on peut donc au premier coup d'œil se faire une idée de sa version, donc de la position du sacrum et de l'acétabulum.

La pente sacrée est l'angle que font le plateau sacré et l'horizontale. Sa valeur moyenne est de $41^{\circ} \pm 8^{\circ}$, soit l'essentiel (plus des trois-quarts) de l'angle d'incidence (5). L'inclinaison plus ou moins prononcée du plateau sacré conditionne la position du rachis lombaire sus-jacent, exactement comme la pente d'un terrain conditionne la courbure compensatrice du tronc de l'arbre qui y pousse. Plus l'incidence est grande, plus la pente sacrée est importante, et plus le rachis lombaire est

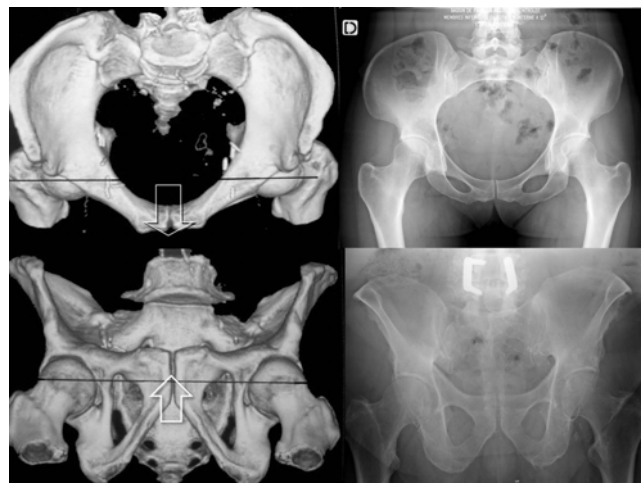


Figure 6. En haut, bassin antéversé. En bas, bassin rétroversé.

cambré. Comme la somme pente sacrée + version pelvienne est fixe (incidence), quand l'un des termes de l'addition augmente, l'autre diminue. Une antéversion augmente la pente sacrée, une rétroversion la diminue.

Statique sagittale du rachis

Les courbures rachidiennes sont acquises. Elles n'existent pas à la naissance, apparaissent progressivement lors de la marche (6) et sont susceptibles de se modifier sous diverses influences : sexe, âge, poids, dégénérescence arthrosique... On peut mesurer (entre autres) les angles suivants par la méthode de Cobb (angle formé par les tangentes aux plateaux des vertèbres extrêmes limitant une courbure donnée) (fig07) :

- la lordose lombaire (LL). *Stricto sensu*, c'est l'angle entre le plateau crânial de L1 et le plateau caudal de L5, dont la valeur moyenne est de $41^{\circ} \pm 11^{\circ}$ chez l'homme, de $46 \pm 11^{\circ}$ chez la femme (5). De nombreux auteurs ne prennent pas en compte ces limites théoriques : ils considèrent la LL maximale et en précisent les limites. L'essentiel (70 % à 75 %) de la LL se situe au niveau des deux derniers étages, entre L4 et S1 (5), d'où l'extrême importance des arthrodeses limitées à ces deux niveaux (les plus fréquentes) dans la statique sagittale du rachis. La LL est intimement liée à la pente sacrée et à l'incidence. En pratique, la LL = incidence + 10° . Comme la lordose L4S1 est d'environ les trois quarts de la LL totale, la lordose L4S1 = $75\% LL + 10^{\circ}$ (7) ;
- la cyphose thoracique (CT). C'est théoriquement l'angle entre le plateau crânial de Th1 et le plateau caudal de Th12. Sa valeur moyenne est de $40^{\circ} \pm 10^{\circ}$ (5). Les liens entre CT et LL sont lâches (coefficient de corrélation faible à 0,34) (8). Comme pour la LL, certains mesurent la CT maximale en en précisant les limites ;
- la gîte sagittale en Th9 (GTh9). C'est l'angle, ouvert en arrière, entre la verticale et la droite joignant le centre des têtes fémorales et le centre de Th9. Pour Duval-Beaupère (3), le centre de gravité de la partie du corps portée par les têtes fémorales se situe 15 mm en avant du bord ventral de Th9. La valeur normale de la GTh9 est de $10^{\circ} \pm 3^{\circ}$ (5). Plus la GTh9 diminue, plus le tronc penche en avant ;
- la verticale abaissée de C7 ou de T1 (C7 plumb line) doit normalement passer par l'angle postérosupérieur de S1 et un peu en arrière des têtes fémorales (9). On peut aussi utiliser la verticale abaissée des méats auditifs, qui intègre la position du rachis cervical et de la tête.

Ces repères chiffrant la manière dont le patient a trouvé ou non son équilibre sagittal, l'axe de gravité du tronc devant passer un peu en arrière des têtes fémorales pour une station érigée confortable. De nombreux autres critères ont été dé-

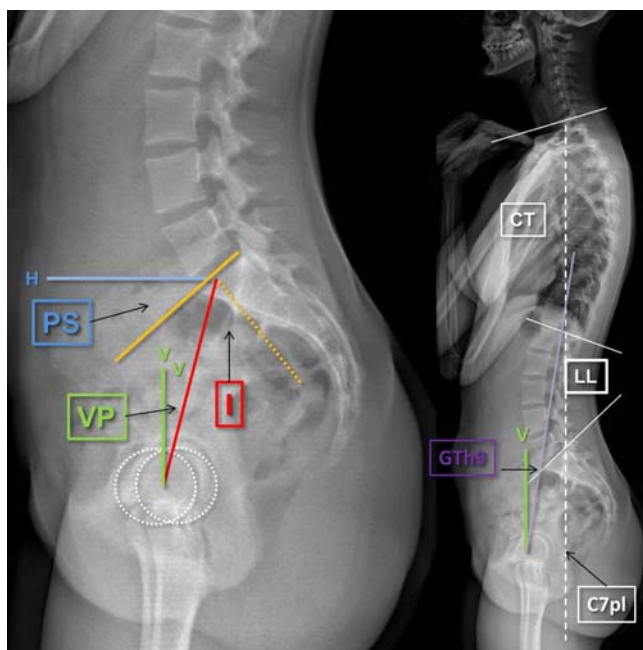


Figure 7. Les principaux paramètres pelviens [PS (pente sacrée), VP (version pelvienne), I (Incidence) et rachidiens (LL (lordose lombaire), CT (cyphose thoracique), GTh9 (gîte en Th9), C7pl (verticale abaissée de C7)].

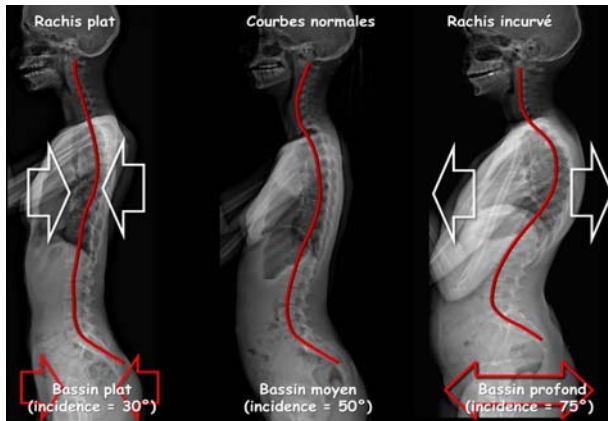
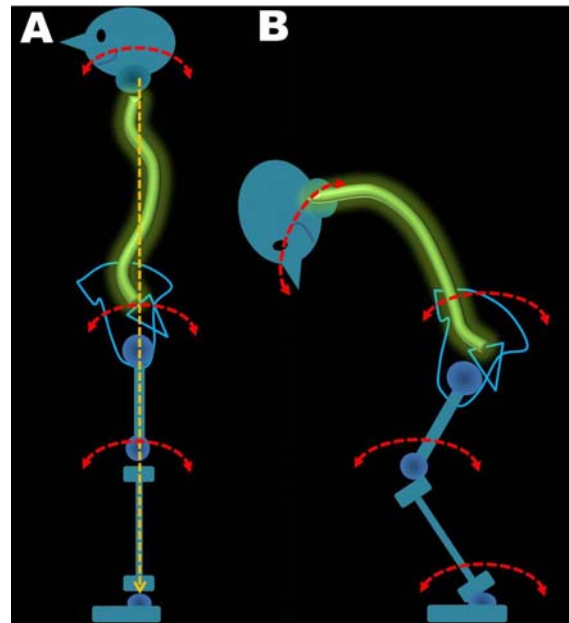


Figure 8. Le bandonéon pelvirachidien. Trois exemples différents, mais normaux.

Figure 9. a. L'homme est debout grâce à une superposition d'équilibres. b : mode habituel de faillite de cet équilibre.



crits, en fonction des différents auteurs ou écoles (8). Leur objectif est le même que celui des critères retenus ci-dessus.

Relations entre statiques du bassin et du rachis

L'étude de sujets normaux (5) a montré qu'il existe des relations plus ou moins étroites entre les paramètres pelviens et rachidiens. Des équations (5) permettent de passer de l'un à l'autre et donc de prévoir, en connaissant un ou plusieurs paramètres, la valeur théorique des autres. Ces équations sont utiles pour chiffrer l'importance d'un trouble de la statique, en particulier lors du bilan préopératoire, pour régler la position d'une arthrodèse... En pratique, on peut considérer que le bloc rachis/bassin se comporte comme un bandonéon dans le plan sagittal : quand on comprime d'avant en arrière le bassin (petite incidence), on comprime aussi le rachis (courbures faibles) ; quand on étire le bassin (grande incidence), on étire aussi le rachis (fortes courbures) (fig08).

Une grande incidence s'accompagne donc de courbures sagittales rachidiennes importantes. L'avantage de ce morphotype est de disposer, par le biais d'une possibilité de rétroversion importante du bassin, d'une grande réserve adaptative en cas de diminution des courbures naturelles du rachis. Ses inconvénients sont une surcharge zygapophysaire lombaire basse, source de douleurs, d'arthrose, de spondylolisthésis, de sténose dégénérative... En cas d'arthrodèse lombaire ou lombosacrée, il est difficile, voire parfois impossible au chirurgien de rétablir dans son intégralité l'importante lordose que requiert idéalement cette forte incidence. À l'inverse, une incidence faible s'accompagne de courbes sagittales peu accentuées et d'une marge d'adaptation étroite du rachis aux situations pathologiques, faute de disposer d'une capacité de rétroversion suffisante. Ces rachis sont par ailleurs sujets à une surcharge discale, génératrice de discarthrose. En cas d'arthrodèse, le chirurgien devra procéder à un réglage particulièrement précis.

En pratique, l'incidence d'un individu détermine sa pente sacrée. La lordose lombaire est normalement proportionnelle à l'importance de cette pente. Bassin et rachis lombaire se mettent ensuite en place, en jouant sur les possibilités de version pelvienne et de lordose lombaire, de façon à trouver un équilibre idéal, le plus économique possible en énergie, entre la cyphose thoracique sus-jacente et la position du segment sous-pelvien (fig09). Cette chaîne dynamique aboutit idéalement à un parfait équilibre sagittal où le poids du corps passe un peu en arrière de l'axe de rotation des deux têtes fémorales. Cette petite bascule postérieure est équilibrée par les muscles abdominaux au prix d'un effort minime, compte tenu de la longueur de leur bras de levier.

La majorité des situations pathologiques entraîne une diminution de la lordose lombaire à l'origine d'un déséquilibre antérieur avec inclinaison du rachis vers l'avant, ce qui sollicite anormalement les muscles érecteurs du rachis, contractés en permanence pour éviter la chute en avant. Pour échapper à

cette tension douloureuse, le patient rétroverse son bassin afin, en horizontalisant son plateau sacré, de rééquilibrer son rachis vers l'arrière. Cette rétroversion n'est vraiment efficace que chez les patients à forte incidence. Quand la rétroversion est insuffisante ou impossible le patient est contraint de compenser au niveau du segment sous-pelvien en fléchissant les cuisses et les genoux. Il se tient debout dans la position où l'on est habituellement assis.

Les déséquilibres postérieurs sont en général mieux supportés, en partie compensés par une cyphose thoracique sus-jacente : ils entraînent en revanche à la longue une dégénérescence arthrosique des zygapophysies lombaires, elle-même à l'origine de pathologies diverses : douleurs, sténoses canalaire, spondylolisthésis dégénératifs, instabilité...

Le système EOS

Les principes de fonctionnement du système EOS

Il s'agit d'un système d'imagerie récent (10-13) (EOS Imaging, Paris, France) basé sur quatre concepts originaux (tableau I).

Deux couples orthogonaux tubes/récepteurs dans un statif rigide, pouvant fonctionner simultanément

Un statif rigide, parfaitement calibré, sorte de cage verticale (fig 10) contient deux puissants tubes à rayons X placés orthogonalement et deux récepteurs faisant face à ces tubes (fig 11,12). Le tout coulisse verticalement, de manière synchrone, sur une hauteur allant de 5 à 180 cm, soit peu ou prou celle d'un corps humain. Il devient donc possible, pour la première fois, d'imager un être humain dans sa totalité en position debout. La présence de deux tubes permet d'obtenir une vue frontale, une vue sagittale, ou encore, simultanément, une vue frontale et sagittale de tout ou partie du patient. Cette simultanéité est également une première.

- Deux couples orthogonaux tubes/récepteurs dans un statif rigide pouvant fonctionner simultanément
- Un faisceau de rayons X et un récepteur très collimatés
- Des récepteurs gazeux de Charpak
- Une possibilité de modélisation 3D

Tableau I : Les principes de fonctionnement du système EOS



Figure 10. Vue d'ensemble du système EOS.

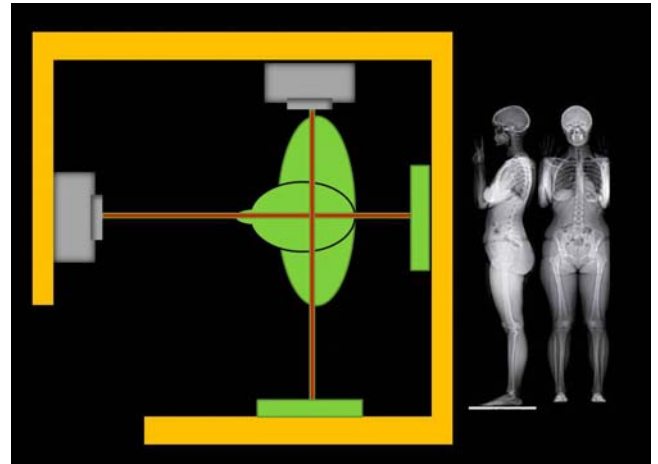


Figure 11. Vue de dessus. Deux tubes à RX et deux récepteurs qui leur font face, étroitement solidarisés, permettent des vues frontales et/ou sagittales.

512. Un faisceau de rayons X très collimaté

Le faisceau de rayons X, très fortement diaphragmé sous forme d'une fine lame horizontale, atteint un récepteur dont l'ouverture se réduit à une fente de 0,5 mm d'épaisseur (fig 13). Cette extrême collimatation, en limitant le rayonnement diffusé, augmente le rapport signal/bruit et permet de diminuer la quantité de rayons X. Elle supprime la distorsion verticale des images et autorise de mesures linéaires précises dans le plan vertical.

Des récepteurs gazeux de Charpak (fig 14)

Les récepteurs sont des chambres à fils de Georges Charpak, qui reçut le prix Nobel de physique en 1992 pour cette invention. Ces détecteurs au xénon ont pour caractéristique une extrême sensibilité, liée à leur énorme capacité d'amplification du signal. Elle permet une importante diminution de la dose de rayons X (13,14). Une étude comparative du système EOS vs un système de radiologie numérisée d'utilisation courante a montré un gain de dose d'un facteur 6 à 9 au niveau du tronc (15). La cinétique particulière de ces récepteurs permet d'obtenir une gamme de gris très étendue (30 000 nuances) à l'origine d'une excellente lisibilité globale. Des zones anatomiques d'épaisseurs très différentes, impossibles à visualiser simultanément sur les radiographies habituelles malgré tous les artifices utilisés deviennent visibles : par exemple, sur le profil, le bassin et le rachis cervical, ou sur la face, les chevilles et les hanches. Ceci facilite et améliore l'analyse des documents, en particulier sur les vues latérales. Un pixel de 250 μm^2 procure une bonne définition et une importante possibilité d'agrandissement des images (fig 19).

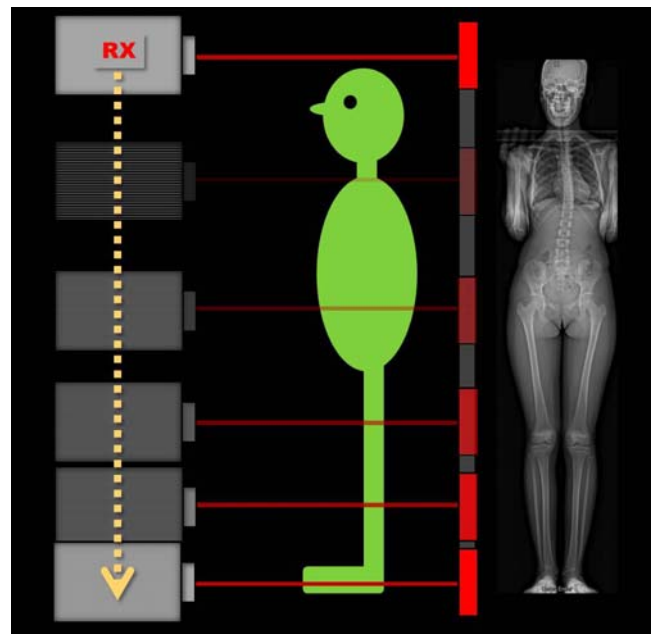


Figure 12. Vue latérale. Balayage vertical du corps par l'ensemble tube(s)/récepteur(s).

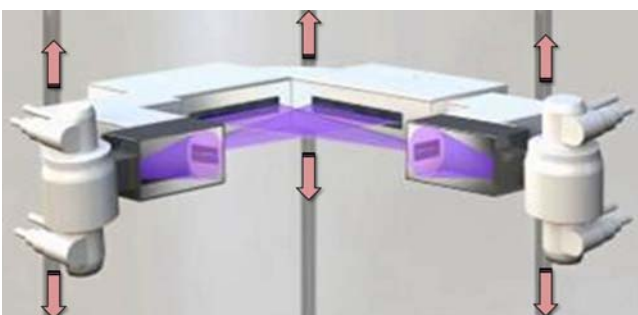


Figure 13 : Cet ensemble tubes/récepteurs coulisse sur des tiges verticales.



Figure 14 : Détecteur gazeux de Charpak.

Figures 15 :
Scoliose
idiopathique
thoracique
droite. Fem-
me de 30 ans.



Figure 15a : Acquisition simulta-
née sagittale et frontale du
corps entier.

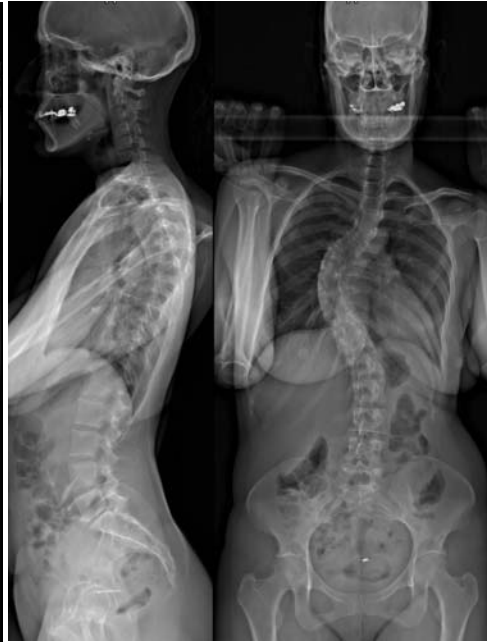


Figure 15b : Agrandissement sur le tronc.



Figure 15c : Bone morphing rachidien : plaquage
d'un modèle théorique de rachis sur les clichés
réels de face et de profil, puis modelage de ce
modèle jusqu'à ce que toutes les vertèbres
coïncident parfaitement, de face et de profil,
avec le rachis réel.

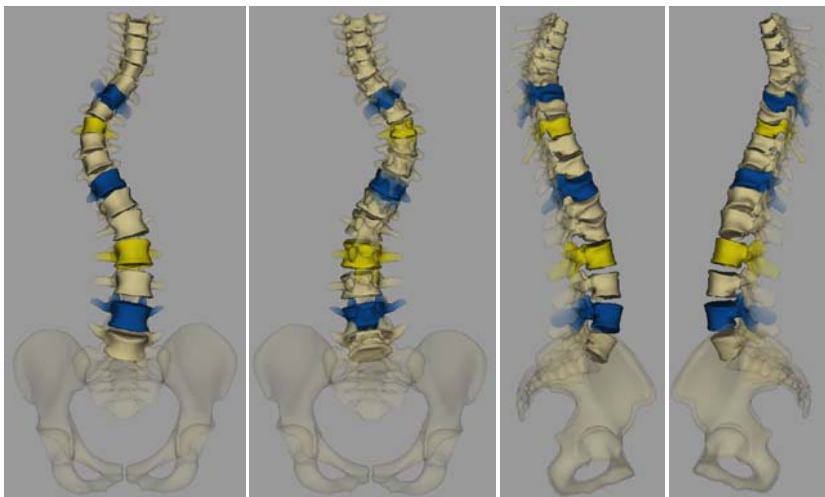
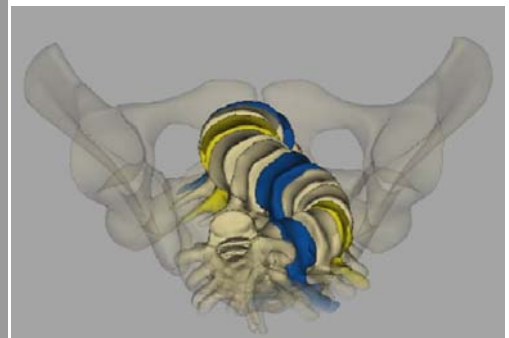


Figure 15d, e, f, g, h : Enveloppe 3D du rachis debout en
vue antérieure, postérieure, latérales droite et gauche,
crâniale.



Figures 16. Scoliose dégénérative lombaire gauche. Femme de 66 ans.

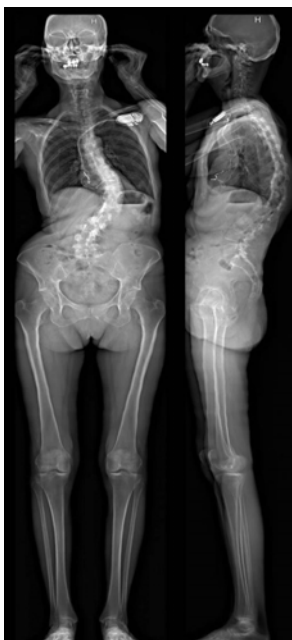


Figure 16a : Acquisition simulta-
née sagittale et frontale du corps
entier.

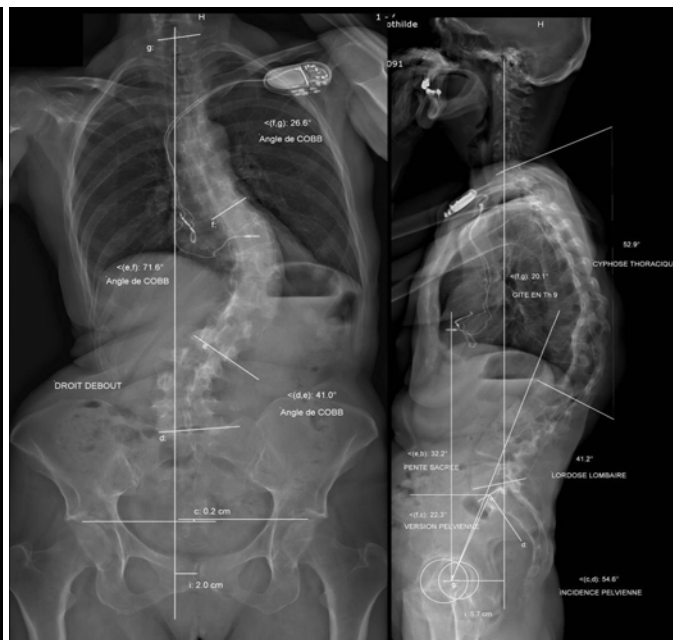


Figure 16b : Agrandissement sur le tronc. L'angle de Cobb est de 71.5°.

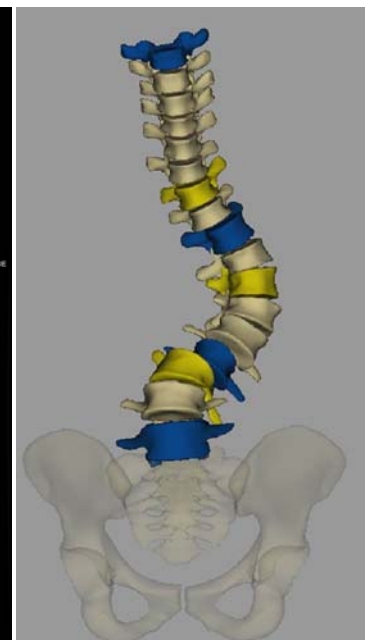


Figure 16c : Remodelage 3D du rachis en
vue frontale. Excellente visualisation de
la dislocation rotatoire L2L3.

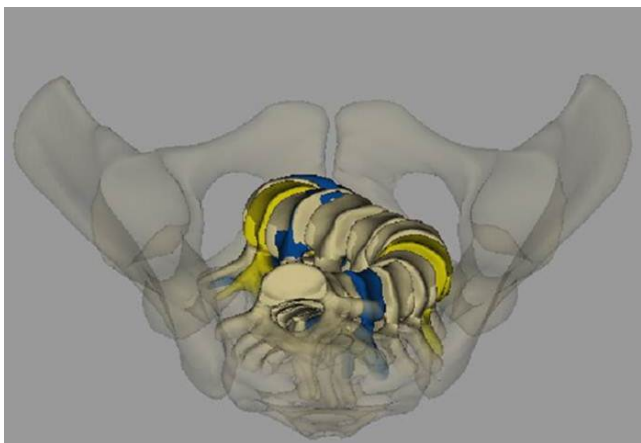


Figure 16d : Vue axiale.

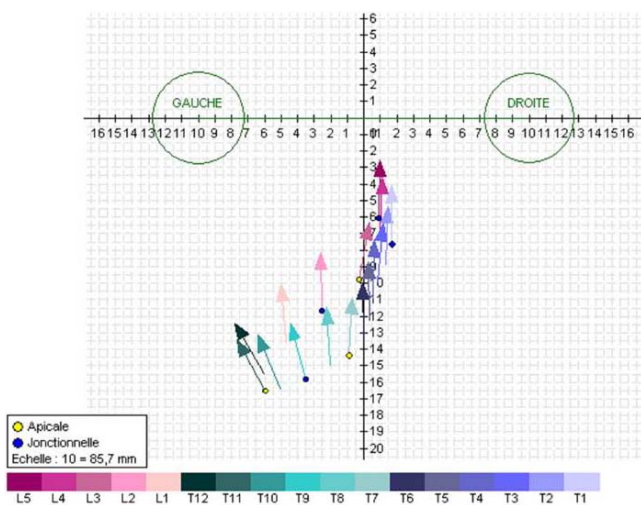


Figure 16f : Position et direction des vecteurs représentant chaque vertèbre, par rapport à l'axe sagittal de symétrie du corps, selon Ilies (17).

Une possibilité de modélisation 3D

A partir seulement des acquisitions frontale et sagittale simultanées, un logiciel de bone-morphing semi-automatique (Laboratoire de Biomécanique de l'École Nationale des Arts et Métiers. Paris ; Laboratoire de Recherches en Imagerie et Orthopédie (LIO) Montréal) (16) permet de modéliser l'enveloppe externe du squelette pelvi-rachidien (fig 15,16) ainsi, à l'heure actuelle, que celui des membres inférieurs (fig 17). A partir de cette modélisation, il est possible de mesurer les paramètres frontaux et sagittaux du rachis et les paramètres pelviens en ramenant automatiquement le bassin dans un plan strictement frontal, point d'importance majeure pour la mesure de l'angle de Cobb dans les scolioses (fig 16) et celle de la déviation frontale des membres inférieurs (fig 17). Il est également possible d'apprécier dans l'espace la position des vertèbres en charge (fig 16,17) ainsi que de mesurer précisément leur rotation par rapport à l'axe de symétrie sagittal du corps (17).

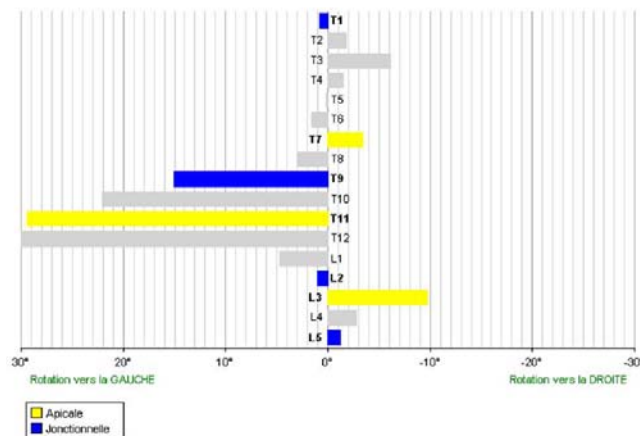


Figure 16e : Mesure de la rotation individuelle de chaque vertèbre par rapport à l'axe bifémoral : 30° de rotation vers la gauche pour Th12.

Paramètres pelviens	Valeur	Diagramme	Paramètres pelviens	Valeur	Diagramme
Incidence pelvienne (1)	58°		Obliquité pelvienne (1)	3 mm	
Pente sacrée (1)	35°		Rotation axiale du bassin (2)	1°	
Version pelvienne (1)	23°				

Figure 16g : Paramètres pelviens.

Paramètres scoliose (1)		Valeur	Diagramme
Courbure (T9-T11-L2)	Cobb (T9-T11-L2)	66°	
	Rotation axiale de la vertèbre apicale T11	29°	
Courbure (T1-T7-T9)	Cobb (T1-T7-T9)	19°	
	Rotation axiale de la vertèbre apicale T7	-3°	
Courbure (L2-L3-L5)	Cobb (L2-L3-L5)	41°	
	Rotation axiale de la vertèbre apicale L3	-10°	

Equilibre sagittal (1)		Valeur	Diagramme
Cyphose T1 / T12		43°	
Cyphose T4 / T12		44°	
Lordose L1 / L5		46°	
Lordose L1 / S1		67°	

(1) Paramètres calculés dans le repère du patient (basé sur un plan vertical passant par le centre des cotyles), qui corrige l'effet d'une potentielle rotation axiale du bassin lors de l'acquisition. Une rotation axiale de la vertèbre est de signe positif lorsque celle-ci est en rotation vers le côté gauche du patient.

Figure 16h : Paramètres rachidiens, calculés sur le remodelage 3D, avec correction d'une éventuelle rotation du bassin (ce qui est le cas ici) replacé dans le plan frontal. L'angle de Cobb est de 66°, soit un peu différent de celui calculé sur les vues planes (71.5°).

Figures 17 Anomalie de l'axe mécanique du membre inférieur gauche.



Figure 17a, b : acquisition simultanée sagittale et frontale du corps entier en station bipodale. Droite : 2° genu valgum, 5° recurvatum ; gauche : 2° genu varum, 26.5° recurvatum.

Figure 17c, d : Station monopodale gauche. 2D : 10° genu VARUM, 27° recurvatum.

Indications actuelles du système EOS

Elles sont listées dans le tableau II et actuellement en pleine évolution. Le lecteur comprendra qu'il ne nous est pas possible d'approfondir, dans le cadre de cet article, ces différentes indications, faute de place et pour certaines d'entre elles, de stratégie consensuelle.

EOS et statique rachidienne

Le tableau III résume les principales indications d'EOS dans ce cadre.

EOS et déviation axiale des membres inférieurs

Dès lors qu'il existe une déviation dans deux plans de l'espace (en général *varus/flessum* ou *valgus/recurvatum*) et, a fortiori, une rotation axiale, le classique pangonogramme frontal ne reflète plus la réalité (19) (fig 17). On ne connaît pas actuellement de manière précise à partir de combien de degrés de déviation associée à la déviation frontale une étude 3D devient nécessaire. En pratique, nous la réalisons quand existe, associée à la déviation frontale, une déviation sagittale d'une dizaine de degrés et/ou une rotation du membre inférieur.

- Etude de la statique rachidienne
- Etude des déviations axiales des membres inférieurs
- Position des prothèses de hanche en station debout
- Etude morphologique de régions anatomiques étendues
 - Rachis dans son ensemble (recherche de tassements vertébraux...)
 - Squelette (myélome, maladie des exostoses multiples...)
- Etude morphologique de structures anatomiques radiosensibles, avec une faible irradiation
 - Bassin/hanche de l'enfant ou de l'adulte jeune
 - Abdomen
 - Rachis lombaire de l'enfant ou de l'adulte jeune ...

Tableau II : Principales indications actuelles du système EOS

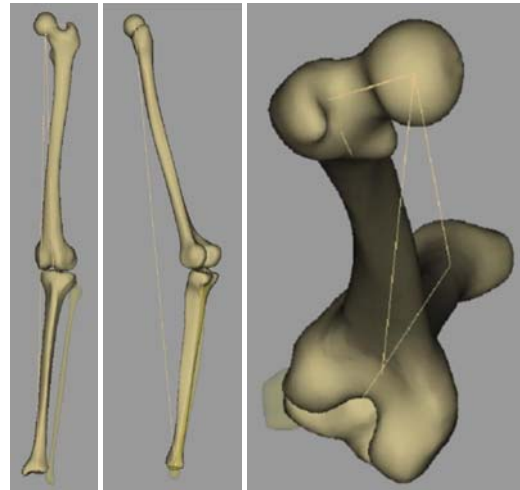


Figure 17e, f, g, h : Mème station monopodale gauche. 3D. 8° genu VALGUM, 26° recurvatum, nette rotation interne du genou qui explique cette discordance.

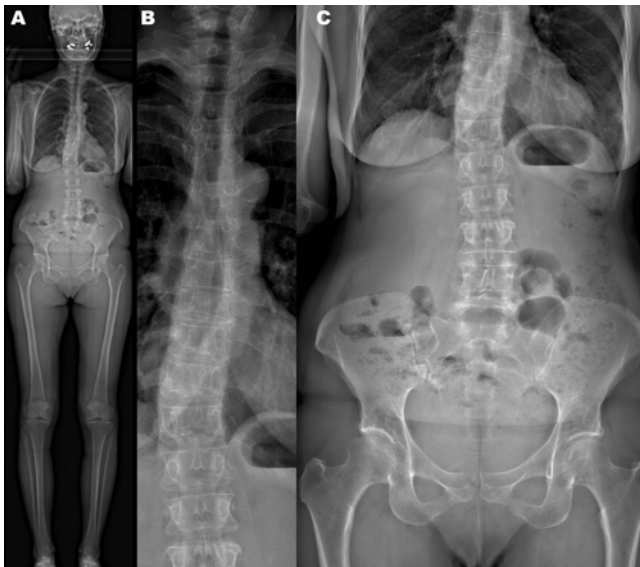
Paramètres membres inférieurs			
	Droit	Gauche	
Longueurs (3)			
Longueur fémur	-	41.3 cm	
Longueur tibia	-	33.7 cm	
Longueur fonctionnelle	-	73.5 cm	
Longueur anatomique	-	74.9 cm	
Hanche (3)			
Diamètre tête fémorale	-	41 mm	
Offset fémoral	-	39 mm	
Longueur col	-	51 mm	
Angle cervico-diaphysaire (CCD)	-	131°	
Genou (4)			
Valgus/Varus	-	Valgus 8°	
Flessum/Recurvatum	-	Recurv. 26°	
Angle fémoral mécanique	-	95°	
Angle tibial mécanique	-	97°	
HKS	-	3°	
Torsions			
Torsion fémorale	-	36°	
Torsion tibiale	-	32°	
Rotation fémoro-tibiale	-	10°	

(3) Paramètres calculés en 3D.
(4) Paramètres calculés relativement au plan bicondylien postérieur.

Fin du rapport

- Scoliose Idiopathique de l'Adolescent
 - Diagnostic et suivi
 - Bilan préopératoire et suivi postopératoire
- Autres troubles statiques rachidiens (troubles de la statique sagittale...) (18)
 - Diagnostic et suivi
 - Bilan préopératoire et suivi postopératoire
- Troubles statiques dégénératifs du rachis de l'adulte
 - Diagnostic et suivi
 - Bilan préopératoire avant arthrodesè
 - Suivi postopératoire
 - Bilan de douleurs résiduelles ou réapparues après arthrodesè rachidiennes
- Bilan préopératoire avant pose de prothèse de hanche ou de genou en cas de trouble statique rachidien associé
- Tassements vertébraux traumatiques, ostéoporotiques ou secondaires

Tableau III : Indications d'EOS dans le cadre de l'étude de la statique rachidienne



Position des prothèses de hanche en station debout

La position spatiale d'un *acétabulum* prothétique en position debout peut d'ores et déjà être mesurée à l'aide du système EOS (fig05) et la position de l'implant fémoral est en passe de l'être. Cet acquis original prend toute son importance dans le cadre de l'exploration d'une instabilité non expliquée par une malposition des éléments prothétiques en décubitus.

Etude morphologique de régions anatomiques étendues

La faible irradiation, l'excellente latitude de contraste et la bonne définition des images EOS tendent à les faire utiliser pour les études du rachis dans son ensemble (par exemple à la recherche de tassements vertébraux) (fig 18) et pour celles du squelette complet (myélome (fig 19) maladie des exostoses multiples...), quitte à les compléter si besoin par des clichés centrés.

Etude morphologique de structures anatomiques radio-sensibles avec une faible irradiation

De plus en plus, en particulier cadre des radiographies des zones radiosensibles (pelvis, tronc, cou...) chez les jeunes patients, EOS peut représenter une alternative complète ou partielle à la radiographie traditionnelle, avec une qualité suffisante et une dosimétrie nettement moins importante.

Figure 19. Myélome. Dorsalgie non traumatique chez une patiente de 73 ans sans pathologie connue. a : EOS corps entier de profil. b : Agrandissement sur le rachis : tassement corporel Magerl A1 de Th8 (flèche). c : EOS corps entier simultané de face. d : Agrandissement sur le fémur droit : lacunes à l'emporte-pièce (flèches). e : Agrandissement de la région scapulothoracique droite : multiples lacunes à l'emporte-pièce de l'humérus, de la scapula et des côtes. Fractures costales (flèches). L'ensemble évoque très fortement un myélome. Confirmation ultérieure.



Figures 18A et B. Patiente de 61 ans suivie et traitée pour sclérose en plaque depuis 40 ans. Corticothérapie au long cours. Dorsalgie brutale. A. a : EOS corps entier face ; b, c. Agrandissement sur le rachis thoracique et lombaire. B. a : EOS corps entier profil. b, c, d : Agrandissements sur le rachis cervical, thoracique et lombaire. Tassement ostéoporotique Magerl A1 de Th8. Pas d'autres anomalies, si ce n'est une cervicarthrose et une lombarthrose. Remarquez la qualité des clichés agrandis, qui suffisent à étudier convenablement le rachis, sans besoin de radiographies complémentaires.

Bien que l'absence de scopie et la position debout ou assise obligatoires constituent un facteur limitant, cette alternative est de plus en plus employée par les centres qui disposent de cet outil, aussi bien pour les clichés statiques que les clichés dynamiques (fig 20).

Conclusion

L'équilibre sagittal du corps humain, directement lié à la biopédie, est le résultat d'une chaîne biomécanique souple qui relie les membres inférieurs au bassin et au rachis. Cette chaîne aboutit normalement à un équilibre ergonomique, obtenu de façon variable en fonction des différents morphoty-

Figures 20. Clichés dynamiques du rachis lombaire sur le système EOS. Ces deux clichés délivrent une dose équivalente au quart d'une radiographie habituelle.



pes. Il est indispensable de connaître les grandes règles de cet équilibre pour en comprendre certains dysfonctionnements douloureux. Les grandes règles de la chirurgie d'arthrodèse du rachis en découlent. Le système EOS est en passe de révolutionner cette approche en permettant pour la première fois une étude globale du squelette, plane ou volumique, au prix d'une irradiation modérée.

Références

1. Cazeau C. Faut-il s'intéresser à la bipédie ? Analyse anatomique et biomécanique dans diverses classes animales. Utilité pour la recherche de la phylogénie humaine. *Maîtrise Orthopédique* n°155 : juin 2006.
2. Berge C. Du marcheur au coureur de fond. *Historia mensuel* n° 716 : août 2006.
3. Duval-Beaupère G, Schmidt C, Cosson P. A barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng* 1992 ; 20 : 451-62.
4. Lazennec JY, Rousseau MA, Sari-ali E, Rolland E, Catonné Y. Biomécanique du complexe lombo-pelvi-fémoral. Conséquences fonctionnelles des relations hanche-rachis. In : Bassin et Hanche, sous la direction de Drapé JL, Bard H, Migaud et al, GETROA-Gel opus XXXIV. Montpellier, Sauramps Médical 2007 : 17-33.
5. Vialle R, Levassor N, Rillardon L, Templier A, Skalli W, Guigui P. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. *J Bone Joint Surg Am* 2005 ; 87 : 260-7.
6. Cil A, Yazici M, Uzumcugil A et al. The evolution of sagittal segmental alignment of the spine during childhood. *Spine* 2005 ; 30 : 93-100.
7. Le Huec JC, Aunoble S, Pellet N, Sibilla F, Saddiki, Roussouly P. Importance de l'analyse de l'équilibre sagittal dans les lombalgies. Rôle de la balance spinopelvienne dans les indications chirurgicales. *Rev Rhum* 2011 ; 78 : 92-100.
8. Carvalho A, Lazennec JY, Sari-Ali E, Saillant G. Equilibre sagittal du rachis et du complexe lombo-pelvien. Quelles sont les données actuelles ? In : Le complexe lombo-pelvien. De l'anatomie à la pathologie, sous la direction de JY Lazennec. Montpellier Sauramps Médical 2005 : 9-34.
9. Jackson RP, McManus AC. Pelvic lordosis and pelvic incidence: the relationship of pelvic parameters to sagittal spinal profile. *Curr Opin Orthop* 2004 ; 15 : 150-3.
10. Charpak G. Prospects for the use in medicine of new detectors of ionizing radiation. *Bull Acad Natl Med* 1996 ; 180 : 161-8.
11. Kalifa G, Charpak G, Maccia C et al. 1998. Evaluation of a new low-dose digital xray device: first dosimetric and clinical results in children. *Pediatr Radiol* 1998 ; 28 : 557-61.
12. Dubousset J, Charpak G, Dorion I, Skalli W, Lavaste F, Deguise J et al. Le système EOS. Nouvelle imagerie ostéoarticulaire basse dose en position debout. *Emem Acad Natle Chir* 2005 ; 4 : 22-7.
13. Dubousset J, Charpak G, Dorion I et al. Une nouvelle imagerie ostéoarticulaire basse dose en position debout : le système EOS. *Radioprotection* 2005 ; 40 : 245-55.
14. Dubousset J, Charpak G, Dorion I et al. Une nouvelle imagerie ostéo-articulaire basse dose en position debout: le système EOS. *Bull Acad Natl Med* 2005 ; 189 : 287-300.
15. Deschênes S, Charron G, Beaudoin G, Labelle H, Dubois J, Miron MC, Parent S. Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager. *Spine* 2010 ; 35 : 989-94.
16. Deschênes S, Godbout B, Branchaud D et al. 3D reconstruction of the human spine from bi-planar radiographs: using multi-scale wavelets analysis and splines interpolators for semi-automation. *SPIE Medical Imaging* 2003.
17. Illés T, Tunyogi-Csapó M, Somoskeöy S. Breakthrough in three-dimensional scoliosis diagnosis: significance of horizontal plane view and vertebra vectors. *Eur Spine J* 2011 ; 20 : 135-43.
18. Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J. Analyse géométrique et mécanique de la lordose lombaire dans une population de 160 adultes asymptomatiques : essai de classification. *Rev Chir Orthop* 2003 ; 89 : 632-9.
19. Than P, Szuper K, Somoskeöy S, Warta V, Illés T. Geometrical values of the normal and arthritic hip and knee detected with the EOS imaging system. *Int Orthop* 2012 ; 36 : 1291-7.