

LA MÉCANIQUE HUMAINE,

**ENTRE
LIFE IN MOTION
ET
MOTION IN LIFE**



LE RACHIS CERVICAL

*Jean-Marc TENENHAUS
Ostéopathe D.O., EurOst, D.O.*

COPIE NON AUTORISÉE

OST
DOCUMENT EN LECTURE SEULE

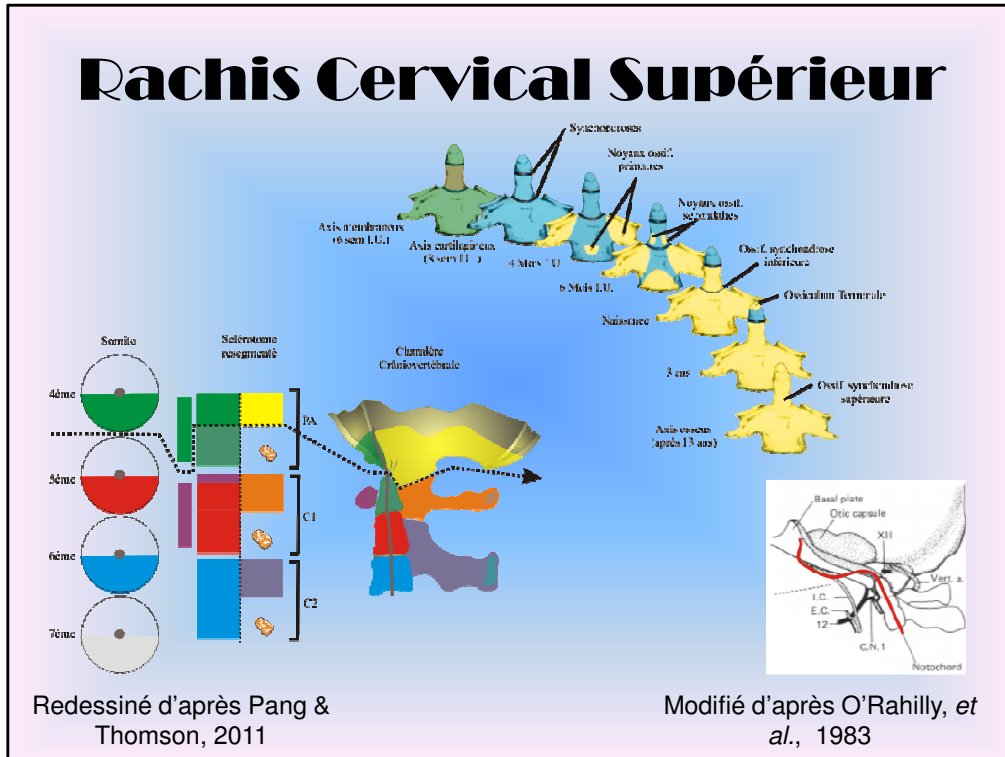
LE RACHIS CERVICAL SUPÉRIEUR

Sur le plan fonctionnel, il est admis de séparer le rachis cervical en un rachis cervical supérieur et un rachis cervical inférieur (Castaing & Santini, 1960; Kapandji, 1986).

Plus récemment (Bogduk & Mercer, 2000), une subdivision en quatre parties a été proposée : le berceau (Atlas), l'axe (Axis), la racine (jonction C2–C3), et la colonne (jonctions C3–C4 à C7–Th1). Cette classification rend compte de la complexité, et de l'aspect hétérogène de la biomécanique du rachis cervical supérieur.

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Supérieure



Odontoïde composée de 2 segments unis au Corps vertébral

Atlas = partie somitique sclérotome C1

Axis = parties somitiques sclérotomes C1 + C2 + C3

Fusion Odontoïde-Axis entre 3-6 ans

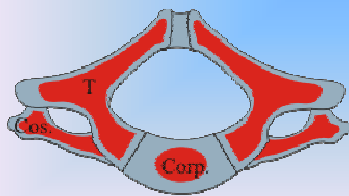
Ossiculum Terminale (Noyau extrémité sup. Odontoïde) apparaît entre 3 et 8 ans, fusion entre 10 et 13 ans – Fusion complète vers 25 ans (Ghanem, et al., 2008)

Relation entre malformation Axis et malformations Atlas – C7 – Clavicule – 1^{ère} Côte (Li et al., 2011)

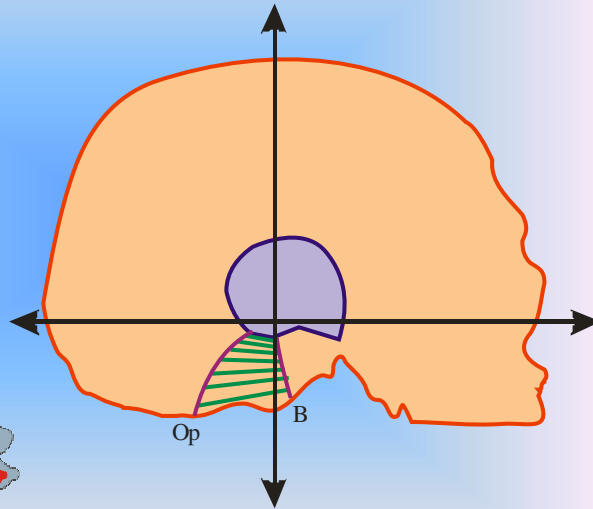
DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Supérieur

Naissance = 20°
7 mois = 5°
4 ans = 0°
22 ans = -15°



Redessiné d'après Gegenbaur 1889



Redessiné d'après Cousin & Fenart, 1971

Hominisation => modification orientation Foramen Magnum au cours de la croissance (Cousin & Fenart, 1971; Cousin & Fenart, 1981; Luboga & Wood, 1990; Aiello & Dean, 2002; Langdon, 2005)

Le processus d'encéphalisation au cours de l'évolution humaine s'accompagne d'une indépendance

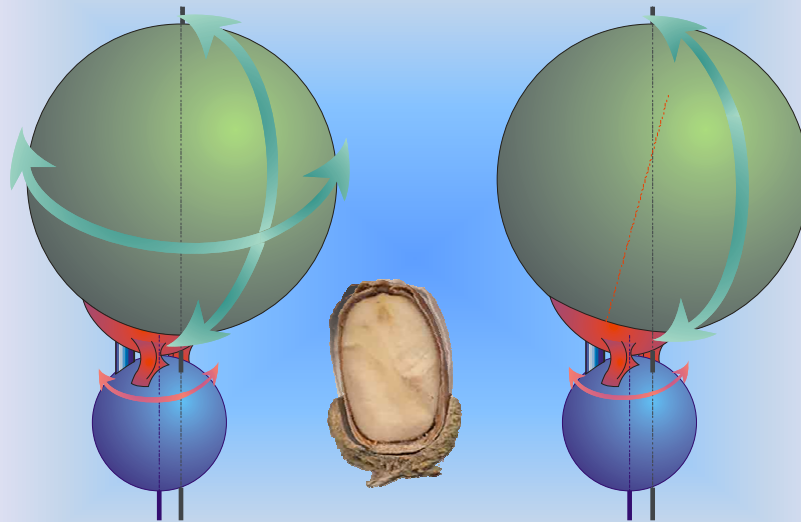
- Entre l'orientation des condyles et les autres paramètres occipitaux (Olivier, 1975)
- Entre l'orientation du Foramen magnum et des condyles occipitaux avec le syst. Masticateur (Aiello & Dean, 2002)
- Entre orientation des Condyles et dynamique cervicale (Johnson & Schimm, 2009)

Il existe une relation entre l'angle de la base du crâne et les classes occlusales (Anderson & Popovitch, 1983; Bjork & Palling, 1955; Bjork, 1955)

- Plate = Classe II
- Fermé = Classe I ou Normal, jamais III

L'inclinaison du Foramen Magnum diminue les forces musculaires nécessaires au maintien en équilibre de la tête (DuBrul, 1950; Aiello & Dean, 2002)

Rachis Cervical Supérieur



À gauche conception selon Penning, 1978; Kapandji, 1986; White & Panjabi, 1990.
A droite selon Sappey, 1867; Castaing & Santini, 1960; Bogduk & Mercer, 2000.

2 conceptions de la mobilité niveau Occiput –atlas

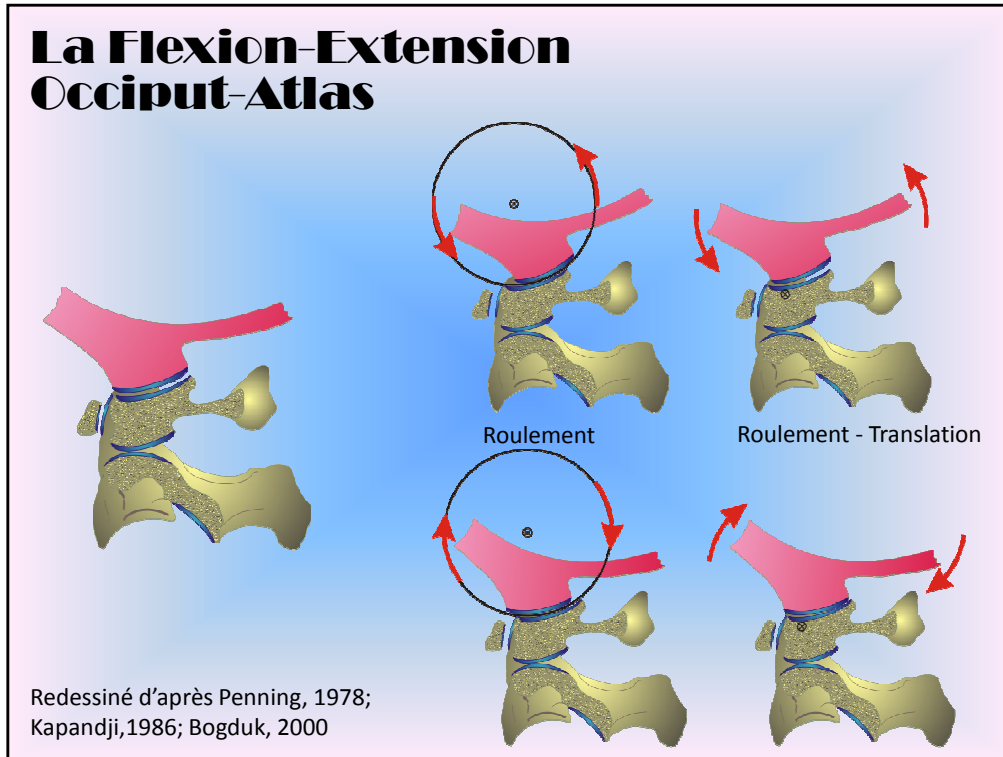
- Soit bille dans soucoupe = mobilité 3D
- Soit péricarpe dans cupule = mobilité 2D (pas de rotation)

Atlas

- Diamètre transversal plus imp. Hommes que Femmes, mais diamètres antéro-postérieur et canalaire non-sexués (Le Double, 1912)
- Modification orientation et implantation des masses latérales avec l'acquisition d'une Bipédie permanente

Muscle Long du Cou = seul muscle mobilisateur actif de l'Atlas (Bogduk & Mercer, 2000)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



Relation Atlanto-Occipitale

Pour Kapandji, 1986 = Flex-Ext par Roulement pur

Pour Bogduk, 2000; White & Panjabi, 1990 = Flex-Ext par Roulement-Glisserment

=> sinon mise en tension excessive du syst. Capsulo-ligitaire et butée osseuse

Centre des rotation situé +/- niveau Trou de Magendie pour Kapandji; au-dessus du sommet de l'Ap. Odontoïde pour Bogduk, *Op. Cit.*

Sur coupe anat, convexité des condyles centrée sur CV4

Rôle protecteur de la Membrana Tectoria sur la moelle spinale (Tubbs et al., 2007)

Peu de contraintes sur Art. Vertébrale dans ce plan de mobilité (Penning, 1978)

Sur Muscle Long du Cou (Longus Cervicis) agit sur la flexion, il n'a pas d'antagoniste (Bogduk, 2000)

Levator Scapulae = action omoplate pas atlas

Rectus Capitis Minor, Rectus Anterior et Rectus Lateralis = action sur Occiput

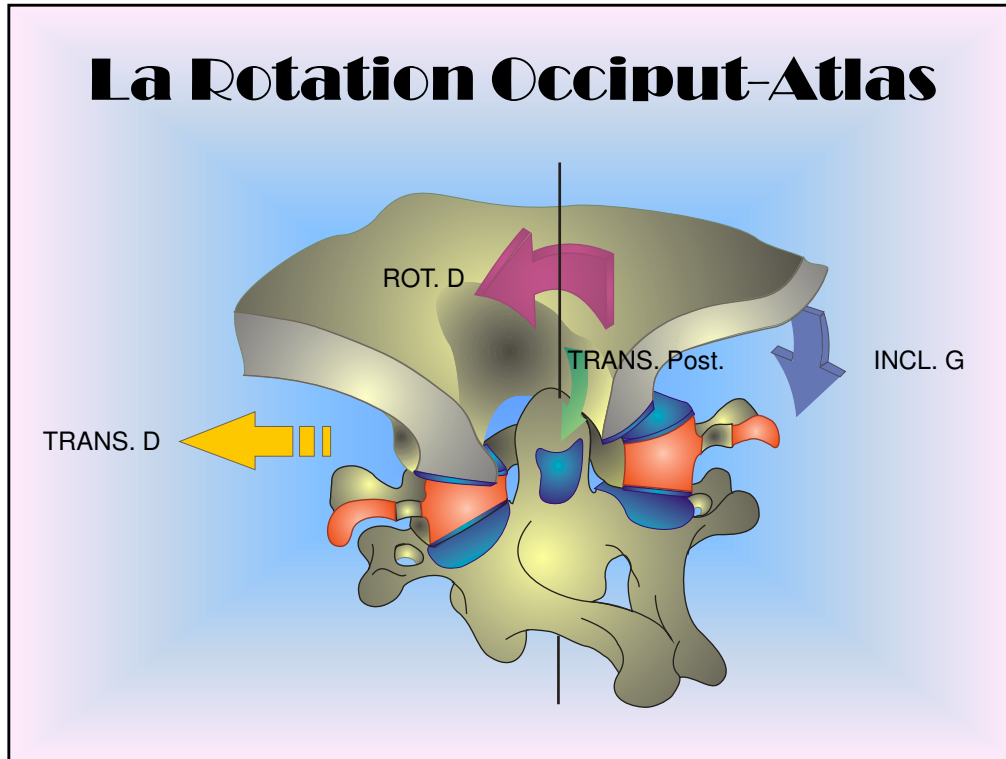
Rapport Flex / Ext = 1:2, (Goel et al., 1988) = plus d'extension que de flexion – propre H.

Sapiens et à la bipédie

Flex-Ext Occ-Atlas

- Souvent accompagnée d'une Flex-Ext Atlas-Axis (Penning, 1978)
- Représente entre 25 et 45% de l'amplitude totale de Flex-Ext Cervicale

La Rotation Occiput-Atlas



Plusieurs conceptions s'affrontent:

- Mobilité impossible = Castaing & Santini, 1960
- Mobilité possible avec association Rotation avec Incl. Controlat. + Translation Homolat = Kapandji, 1986; Dvorak et al., 1988
- Mobilité possible seulement si Axis fixé et ne peut pas être induit par une contraction musculaire = Bogduk, *Op. Cit.*

La mobilité de l'Atlas est limitée par les Ligts Alaires+ syst. Capsulo-ligitaire Atlanto-axoïdien

- Ligts alaires = action secondaire stabilisatrice odontoïde

Rupture Ligts Alaires

- Augmente la Flex (surtout à G) mais pas l'Ext de Occ/Atlas
- Augmente Flex et Ext de Atlas/Axis
- Rupture du Ligt Gauche augmente Incl. Lat Dte
- Rupture Ligts Drt+G augmente Incl Lat G (Panjabi et al., 1991)

Atteinte rhumatismale possible des Ligts Alaires (Soubai et al., 2012)

La NZ (Zone Neutre) représente (Panjabi et al., 1988)

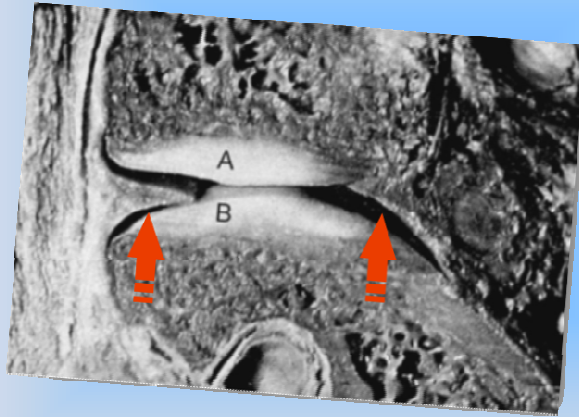
- 1,1° en Flex-Ext
- 1,6° en Rot. Axiale
- 1,5° en Incl. Lat.

⇒ Adaptation aux réactions posturales fines

Ligt Odontoïdien = Incst – retrouvé entre 2 et 9/10 selon les études (Dvorak & Panjabi, 1987; Osmotherly et al., 2013; Poirier, 1901; Cave 1934)

La rotation de l'Occiput / Atlas s'accompagne mise en tension Ligament Odontoïdien (ou ligament Alaire) qui induit une translation latérale du côté de la rotation mais aussi une translation postérieure des condyles

Relation Atlas-Axis



Modifié d'après Boszczyk, *et al.*, 2012

Présence de replis méniscoïdes semi-lunaires, de type fibreux en C1-C2 (rarement fibreux autres niveaux cervicaux)

Les replis ventraux > replis dorsaux

Replis plus volumineux à Drte qu'à G

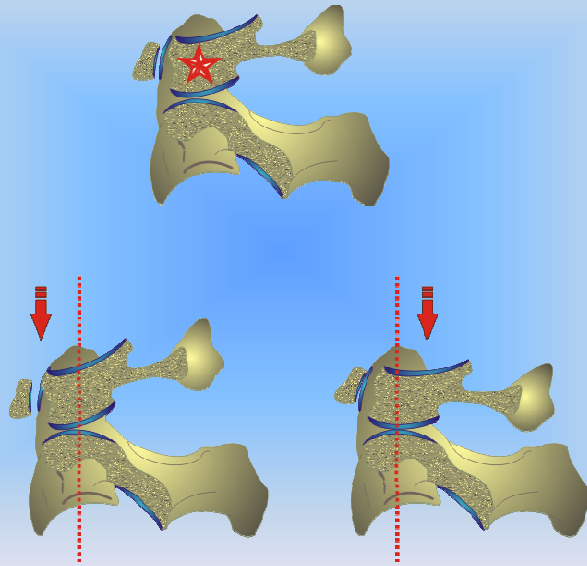
Rôles de ces replis encore mal connu

- Présence de nombreux nocicepteurs (Inami et al., 2001)
 - Rôle probable dans lésions aiguës hyperalgiques
- Possible rôle dans nutrition et répartition des pressions

Corrélation avec

- Taille individu
- Augmentation amplitude de Flex-Ext
- Augmentation Amplitude Rotation G (Webb et al., 2009)

Flexion-Extension Atlas-Axis



Redessiné d'après Kapandji, 1986; Bogduk, 2000

Pour Kapandji, axe situé à proximité centre de l'Ap. Odontoïde

Mobilité essentiellement passive pour Bogduk, en fonction de la compression transmise sur les masses latérales.

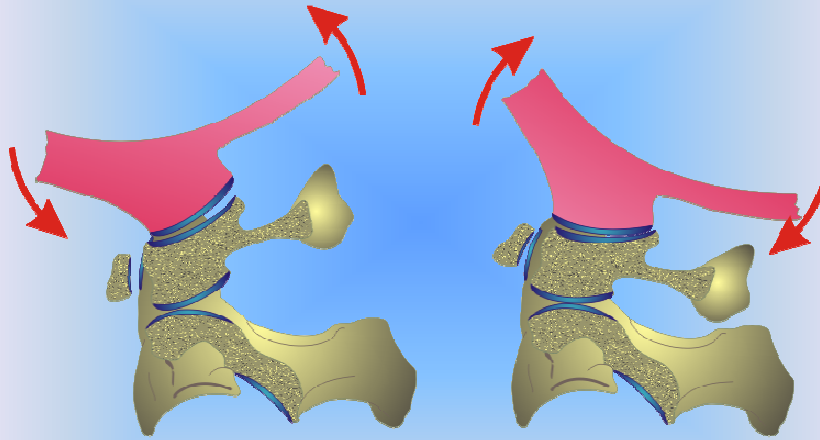
Compression Ant. = Flex

Compression Post. = Ext.

Peu de limitations capsulo-ligitaire = Flex-Ext possible jusqu'à contact osseux du processus épineux de C1 sur écaïlle Occ. Ou Processus épineux de C2

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Flexion-Extension Atlas-Axis



Cinétique globale O.A.A.

Cinétique globale O.A.A. en Flex-Ext

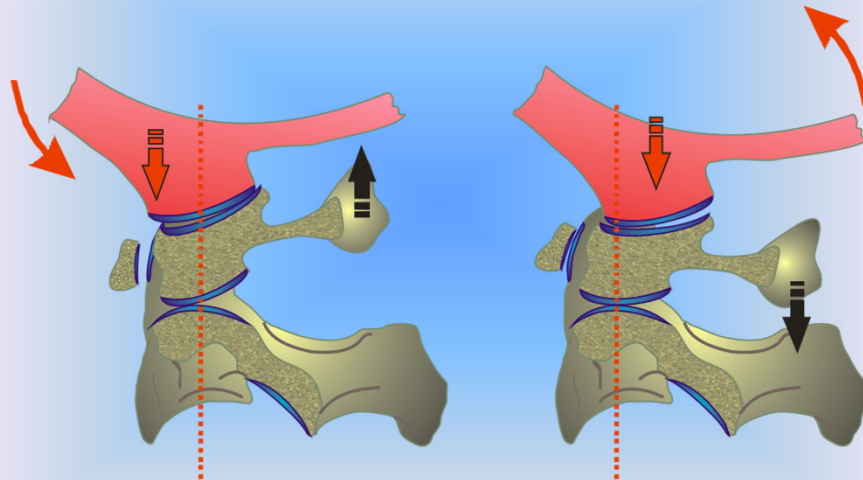
Mise en jeu ++ Ligt Transverse

Mobilité passive de l'Atlas dans le sens de la mobilité globale du Rachis cervical le plus souvent mais...

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Flexion-Extension Atlas-Axis

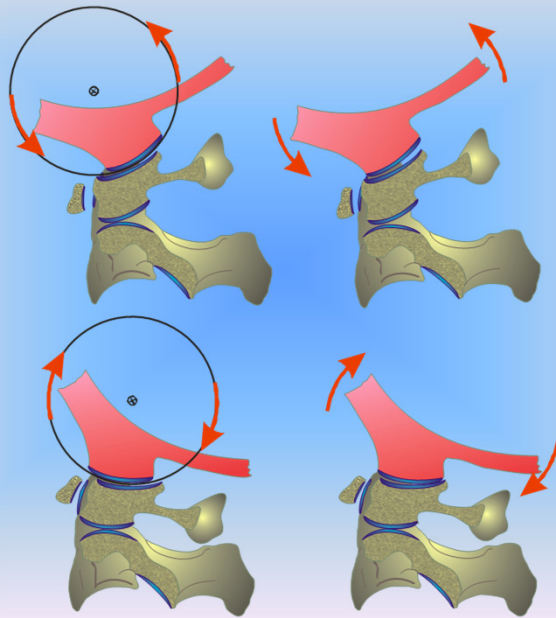


Mouvements paradoxaux Atlas

....Mouvements paradoxaux Atlas

- => Compression veineuse du Sinus Veineux Sous-Occipital lorsque l'écaïlle Occ et Porc. Ép. Atlas se rapprochent
- ⇒ Phénomène de stabilisation Hydraulique Atlas-Axis par turgescence des réseaux veineux intra- et extra-rachidiens (Reesink et al., 2001)
 - ⇒ Phénomène d'apparition précoce au cours de l'évolution chez A. Robustus en réponse à la Bipédie, l'Encéphalisation et à la thermo-régulation encéphalique (Kinz & Hiadis, 2007)
 - ⇒ Avec l'avancée en âge, le drainage veineux devient exclusivement jugulaire (Kapelman et al., 2013)
- ⇒ Au niveau de ce réseau, la position debout diminue la pulsativité veineuse de 57%, la pulsativité du LCR de 48% et diminue la circulation cérébrale globale de 12% (Alperin et al., 2005)
- ⇒ La pression de perfusion diminue d'1/3 lors d'une Ext de 30 à 45°; la circu cérébrale diminuant de moitié de 0 à 45° (Morain et al., 2000)
- ⇒ Notion de contrôle actif de la circu. Veineuse par des fibres muscu; lisses mais aussi par la présence de coudes formant de véritables système valvulaires (Van der Kuip et al., 1999)

Flexion-Extension Atlas-Axis



Redessiné d'après Kapandji, 1986; Bogduk, 2000

Mobilité de l'Atlas surtout passive

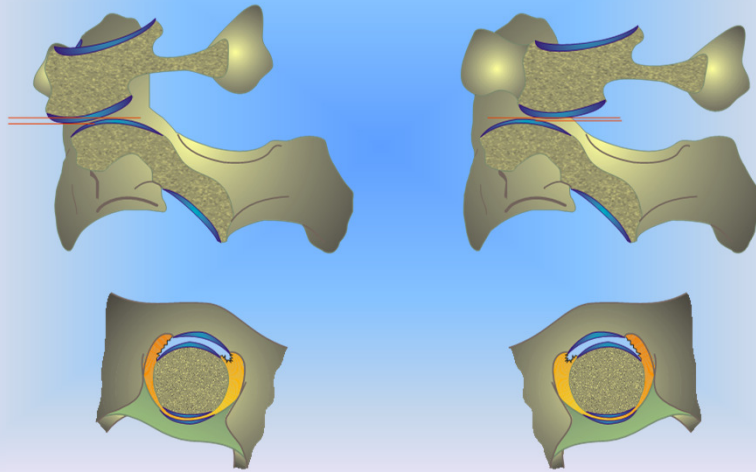
Se comporte en essie-glace sur l'Axis à partir d'une induction soit Occipitale soit Axis

On retrouve deux conceptions sur la localisation des centres de rotations

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rotation Atlas-Axis



Redessiné d'après Penning, 1978; Kapandji, 1986; Bogduk, 2000

Rotation atlas/axis =

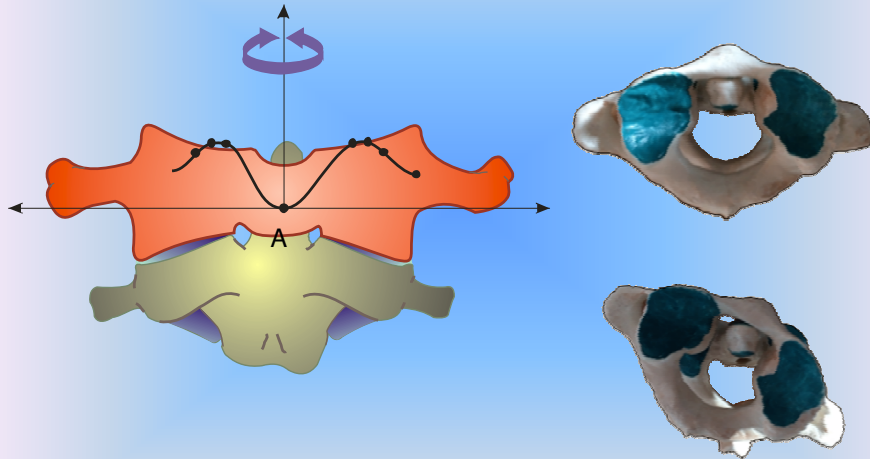
- Rotation arche antérieure/ odontoïde
- Glissement Masse latérales/ Axis

⇒ Descente des masses latérales lors de la rotation = mouvement hélicoïdal

Rotation Atlas par transfert du couple rotateur du SCM et Splénius Capitis par l'intermédiaire Occiput (la disposition des insertions du splénius majeure le phénomène (Bogduk, 2000))

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rotation Atlas-Axis



Redessiné d'après White & Panjabi, 1990

La convexité des surfaces entraîne, lors de la rotation un déplacement du point A vers les positions 1-4 => notion de translation

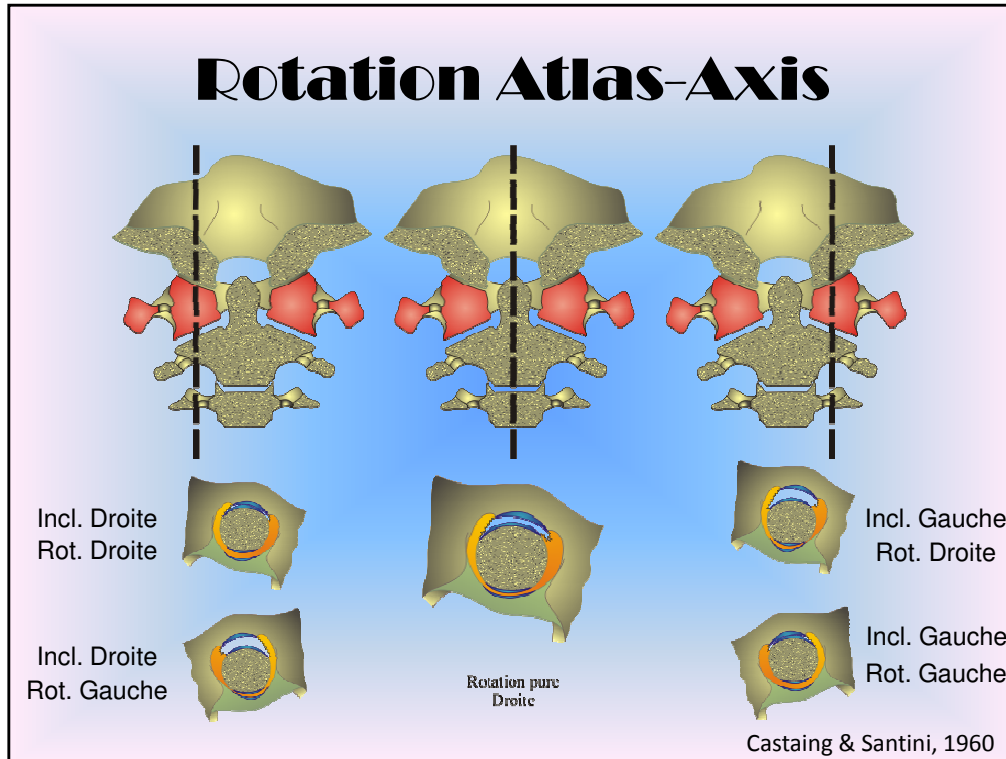
Lors de la rotation axiale, le canal vertébral diminue de 30 à 40% (Reesink et al., 2001) sans que cela soit contraignant pour la moelle qui n'occupe que 25 à 30 % de l'espace

Il y a congestion stabilisatrice des plexus veineux intra-rachidiens. Alors que le rapport initial est de 50:50, il est de 20:80 au-dessus de C1-C2 et 80:20 en-dessous de C1-C2 (Reesink et al., 2001)

À ce niveau, 34% des veines possèdent des valves bicuspides, et des fibres musculaires à vascularisation et innervation propre (Stringer et al., 2012)

L'innervation de la région provient des nerfs Sinu Vertébraux C1-C2-C3 s'étendant jusqu'à l'Art. Vertébrale et la Carotide Int. (Bogduk, 2001)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



Il existe 3 types de rotations axiales possibles :

- 1) Rotation « standard » = rotation autour d'un axe vertical passant par l'Odontoïde, c'est celle décrite par Kapandji
- 2) Fixation par compression de la masse latérale Droite
 - 1) Rotation possible soit par distension Ligt Transverse
 - 2) Soit par compression relation atlanto-odontoidienne antérieure (notion de plasticité osseuse odontoïde)
- 3) Fixation par compression de la masse latérale Gauche
 - 1) Même possibilités que précédemment

⇒ La masse latérale mobile présente une « descente dans le plan frontal du fait de la convexité des surfaces articulaires => paramètre d'inclinaison latérale

⇒ Implique Élasticité Ligt Transverse, Plasticité Ap. Odontoïde, Congestion Sinus Caverneux Sous-occipital (Ghanem et al., 2008)

⇒ Le ligt Transverse ne restreint pas le glissement antérieur de l'Atlas/Axis (Bogduk & Mercer, 2000)

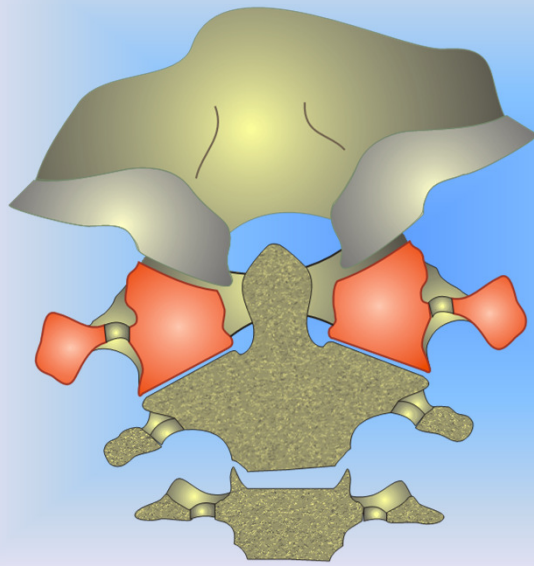
⇒ Mobilité plus importante en pré-pubertaire en raison de la non soudure de la synchondrose => plasticité Ap. Odontoïde +++

⇒ Mobilité qui correspond aux types I et II de la classification de Fielding des sub-luxations Atlanto-Axiïdiennes (Fielding & Hawking, 1997)

⇒ = Variation de la normale mise en évidence quand pathologique (Ghanem et al., 2008)

⇒ Torticolis aigu puis déformation chronique R. Cervical+ Cranioplagie + Aplatissement de la face côté inclinaison. Lié à des trauma musculaires, des angines, inf. ORL, ...

Inclinaison Atlas-Axis



Inclinaison Atlas/ Axis

Kapandji = Nulle

Penning = Très Faible,
possible avec une
rotation

Redessiné d'après Kapandji,1986; Penning,1978

Encore une fois plusieurs conceptions s'affrontent

⇒ incl. Atlas/Axis impossible pour Kapandji

⇒ Possible mais avec une rotation pour Bogduk et Penning

⇒ Ampl. très limitée (Ligt Alaire) assimilable à un phénomène de translation

⇒ Glissement latéral du condyle (Bogduk & Mercer, 2000)

⇒ **Rot. Puis Incl.** = $4,1^\circ \pm 1,4^\circ$ d'inclinaison en Occ-Atla

$3,8 \pm 3,0^\circ$ d'inclinaison en Atlas-Axis

Inclinaison du côté opposé à la Rotation

Extension automatique de $13,3 \pm 4,9^\circ$ en Occ-Atlas

$6,9 \pm 3,0^\circ$ en Atlas-Axis (Ischii et al.,

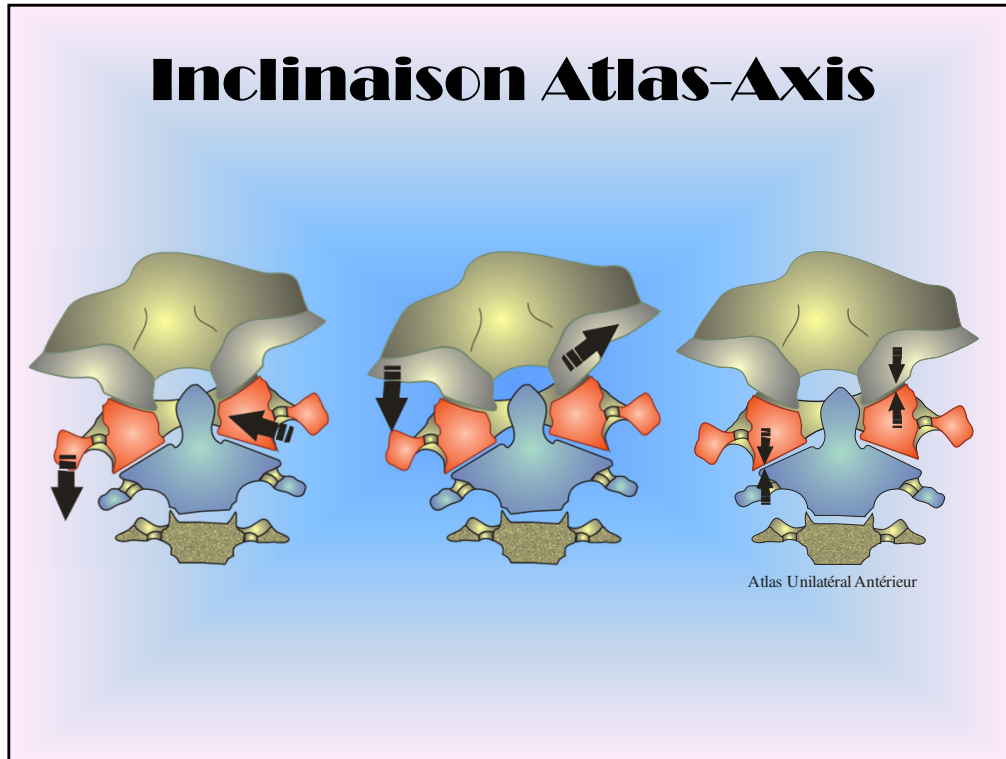
2004)

⇒ **Incl puis Rot** = $0,2^\circ$ de rotation en Occ-Atlas

17° de rotation en Atlas-Axis (Ischii et al., 2006)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Inclinaison Atlas-Axis

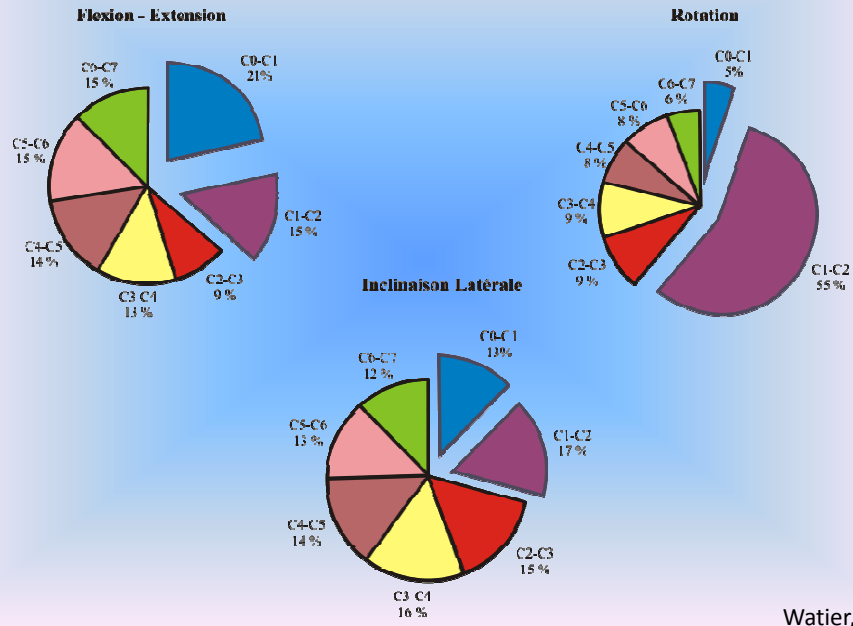


Inclinaison de l'atlas possible par :

- 1) Translation de l'Atlas
- 2) Du côté opposé la masse latérale glisse sur la convexité => descente de l'ap. transverse donc Incl Latérale
- 3) Glissement antérieur masse latérale (mise en tension ligt Transverse)
- 4) Secondairement, l'Occiput effectue une translation et une Inclinaison (mise en tension Ligts Alaires)
- 5) Au retour à la position initiale, si dysfonction => **Atlas Antérieur Unilatéral**

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Supérieur

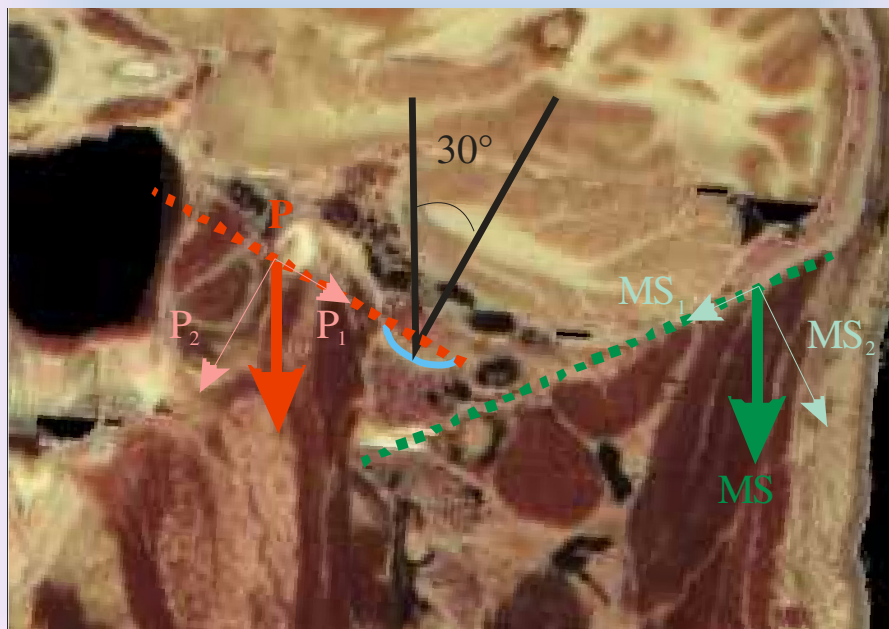


Récapitulatif des différentes mobilités selon les niveaux (en % de l'amplitude totale)
 => Intérêt diagnostique des proportions dans la détermination des dysfonctions

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Supérieur



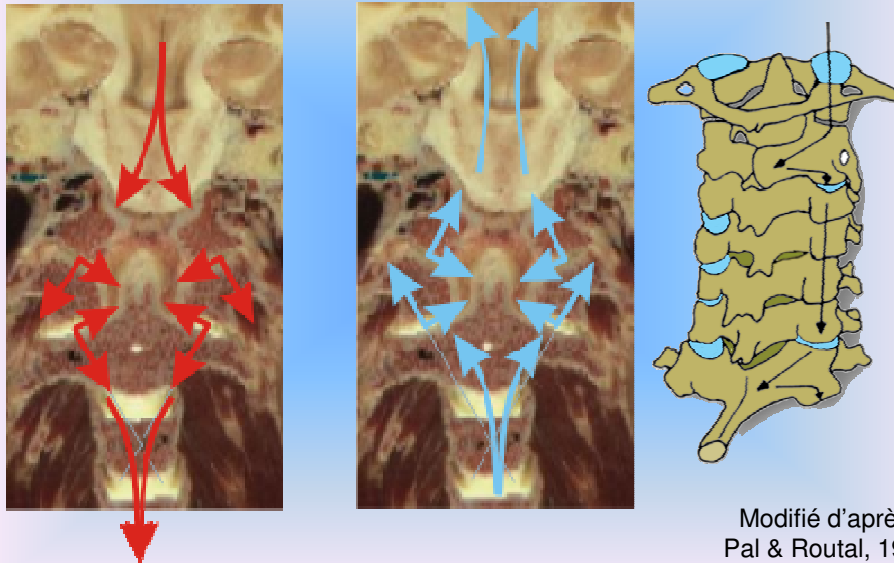
Paramètre d'Extension automatique Occ-Atlas

- ⇒ Diminution du poids apparent de la tête à environ 5% du poids corporel chez Homme contre 7% chez autres primate
- ⇒ Diminution par 2 du coût énergétique pour garder la tête horizontale
- ⇒ Diminution par 6 du coût énergétique pour lever la tête au-dessus horizontale (Schultz, 1942)

Favorisé au cours de l'évolution humaine par la variation de l'orientation des condyles (regardent en bas et en avant chez Homme contre en bas et en arrière chez autres primates
+ évolution de l'orientation au cours de la croissance (compensation graduelle de l'augmentation du poids du segment céphalique)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Supérieur



Les Lames vertébrales supportent la charge céphalique lors de l'Extension mais répartition non homogène

⇒ Rôle prépondérant de C2 et C7

⇒ Diffusion des contraintes dans l'ordre C2-C7-C3-C6-C4-C5 (Pal & Panjabi, 1996)

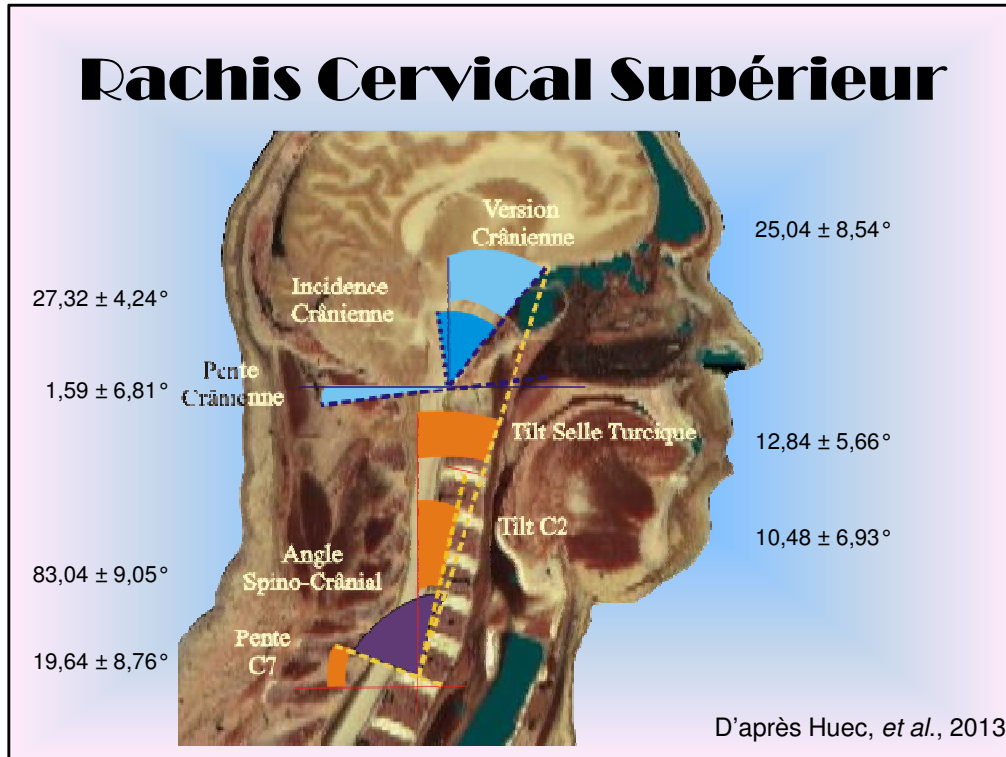
Variations ethniques et sexuées (Xin-yu et al., 2011)

Aire du canal vertébral est plus grande à la partie inf. qu'à la partie sup; de chaque vertèbre cervicale du fait de l'obliquité des lames.

La relation C0-C1-C2 présente une organisation des orientations des facettes articulaires telle que cette région diffuse et absorbe les contraintes soit en provenance de l'extrémité céphalique soit en provenance du corps (impact de la prise de contact au sol lors de la marche par ex).

Le système permet également un centrage automatique de l'Axis, en particulier de l'Ap. odontoïde

Rachis Cervical Supérieur



Il existe un certain nombre d'angles dont la définition permet l'analyse du comportement dynamique, statique et postural du rachis cervical.

Ils sont retrouvés régulièrement dans la littérature sans toutefois faire figure de référence comme peut l'être la pelvimétrie ou la coxométrie par exemple

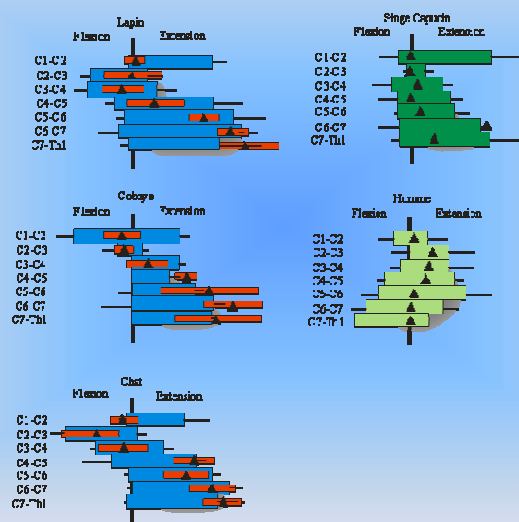
- Pente de C7 (angle formé entre l'horizontale et le plateau inférieur de C7) mesure $19,64 \pm 8,76^\circ$
- Tilt C2 : angle formé entre la droite joignant les centres des plateaux inférieurs de C7 et de C2 avec la verticale. Il mesure $10,48 \pm 6,93^\circ$
- Tilt de la Selle Turcique : angle formé par la droite joignant le milieu du plateau inférieur de C7 au milieu de la selle turcique et la verticale. Il mesure $12,84 \pm 5,66^\circ$
- Angle Spino-crânial : angle formé par la droite joignant le milieu du plateau inférieur de C7 au milieu de la selle turcique et le plateau inférieur de C7. Il mesure $83,04 \pm 9,05^\circ$
- Version crânienne : angle formé entre le milieu de la ligne de Mc Gregor et l'horizontale. Elle mesure $25,04 \pm 8,54^\circ$.
- Incidence crânienne : angle formé entre la ligne joignant le milieu de la ligne de Mc Gregor au milieu de la selle turcique et la verticale. Elle mesure $27,32 \pm 4,24^\circ$.
- La pente crânienne : angle formé par la perpendiculaire passant par le milieu de la ligne de Mc Gregor et la droite joignant le milieu de cette ligne et le milieu de la selle turcique. Elle mesure $1,59 \pm 6,81^\circ$.

LE RACHIS CERVICAL INFÉRIEUR

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Inférieur



Redessiné d'après Graf, *et al.*, 1995

L'Homme est le seul animal dont la relation C7-Th1 ne fonctionne pas en Extension complète

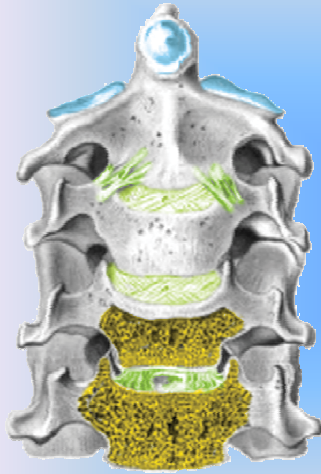
Attitude de repos (Triangle) = Extension du R. Cervical Sup. à la différence des autres animaux non bipèdes permanents

Une diminution de 10° de l'angulation Occ-Axis diminution l'espace pharyngien de 37% pouvant être à l'origine de cette apnée du sommeil (Ota et al., 2011)

N.B : Incidence sur congestion sphère ORL du point de vue Ostéo.

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Relation Unco-Vertébrale



Modifié d'après
Luschka, 1858

- Apparaissent après 9 ans
- Matures vers 18 ans
Kamina, 1995; White & Panjabi, 1990

Cartilage Inconstant

- 45% des vertèbres dont :
 - o 22,5% à Droite,
 - o 2,5% à Gauche
 - o 10% Bilatéral
- 27,5% des parties postéro-inférieures de la vertèbre dont :
 - o 15% à Droite
 - o 7,5% à Gauche
 - o 5% Bilatéral

Remya *et al.*, 2012

Le rachis cervical inférieur est caractérisé par la présence des relations unco-vertébrales qui vont conditionner la mécanique à ce niveau.

LA classification exacte de ces relations fait encore débat.

Décrites par Luschka en 1858, elles sont dénommées « Processus Unciforme » par Trolard en 1893, appellation qui sera acceptée sur le plan international en 1957 (Payne & Spillane, 1957).

Évolution et maturation complexe de la relation

- Dérive de l'arc neural et non de côtes comme longtemps affirmé par les classiques (Poirier)
- Involution du tissu histologique (différent du tissu discal) présent au sein de la relation dès 1 mois I.U. (Hayashi & Yabuki, 1985)
- Fissuration DIV à partir des unco-vertébrales convergent vers le centre du DIV à partir 10-15 ans
 - Fissuration favorise la rotation axiale
- Considérées comme présentes à partir de 9 ans et mature anatomiquement vers 18 ans (Kamina, 1995; White & Panjabi, 1990)
 - Biomécanique cervicale variable selon les âges (Nuckley *et al.*, 2013)
- Plan de clivage transversal vers 30 ans

Importance pathogène connue depuis longtemps (Cave, 1955)

Uncarthrose => Calcif. Coiffe des Rotateurs; Tendinite Biceps; Syndrome des Scalènes; épicondylite; Nausées; Céphalées; Diplopie transitoire (Silberstein, 1965)

Uncus plus haut à droite

C3 = le plus court et le plus large

C5 = le plus haut et le plus étroit (Lee et al., 2012; Tubbs et al., 2012; Kim et al., 2012)
Distance inter-uncus max en C6 => Corrélation avec fréquence des H. Discales à ce niveau ?
Plus la distance entre les Uncus est grande plus la stabilité augmente et plus le rachis fonctionne en NZ

Complexe Disco-Corporéal



Annulus Antérieur :

- En croissant antérieur
- Se termine niveau relation unco-vertébrale
- Disposition des fibres en V inversé
- Nutrition Plaque Inféro-Antérieure



Annulus Postérieur :

- Fin, environ 1mm
- Fibres verticales
- Présent uniquement à la partie médiane
- Paroi Post. Constituée principalement par LLP
- Nutrition Plaque Supéro-Postérieure

Nucléus:

- Volumineux
- S'étend jusqu'aux Processus Unciformes
- Composition évolue de la Naissance à 25 ans

Mercer & Bogduk, 1999 ; Oda, *et al.*, 1988

Rôle (Bogduk & Mercer, 1999)

- Ligt inter-osseux
- Répartiteur de pression

Pas de DIV aux niveaux C0-C1 et C1-C2

Trophicité DIV

- Sous la dépendance interface Nucléus-Plaque Cartilagineuse (Oda et al., 1988)
 - Partie antérieure DIV = Vertèbre sous-jacente
 - Partie postérieure DIV = Vertèbre Sus-jacente
- ⇒ Involution rapide si perturbation

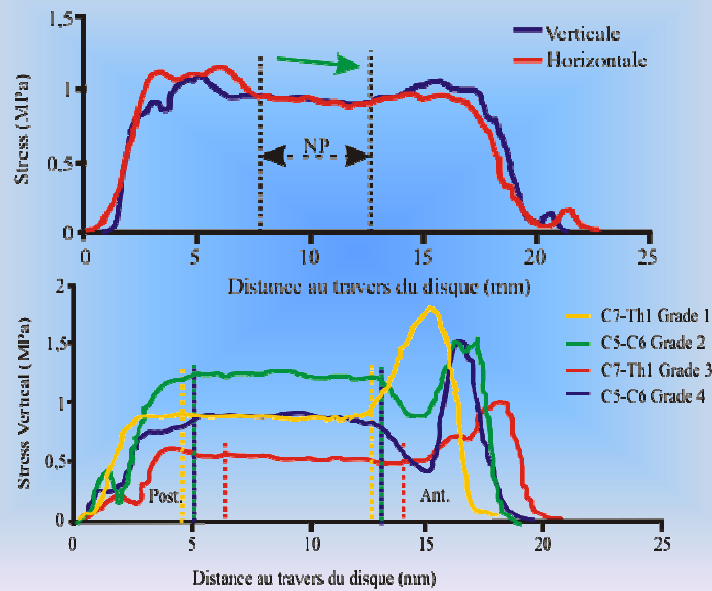
Résistance à la rupture des corps vertébraux diminue avec la destruction de la Plaque Cartilagineuse (Lim et al., 2001)

- La résistance diminue de 33%

Phénomène identique au niveau lombaire (Oxland et al., 2003)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Complexe Disco-Corporéal



Redessiné d'après Skrzypiec *et al.*, 2007

Sur schémas: à G, partie post. DIV; à Dte, partie ant. DIV

En haut = Profilométrie normale en compression et en cisaillement

Léger gradient de pression au niveau du Nucléus

Pression répartie uniformément niveau Nucléus

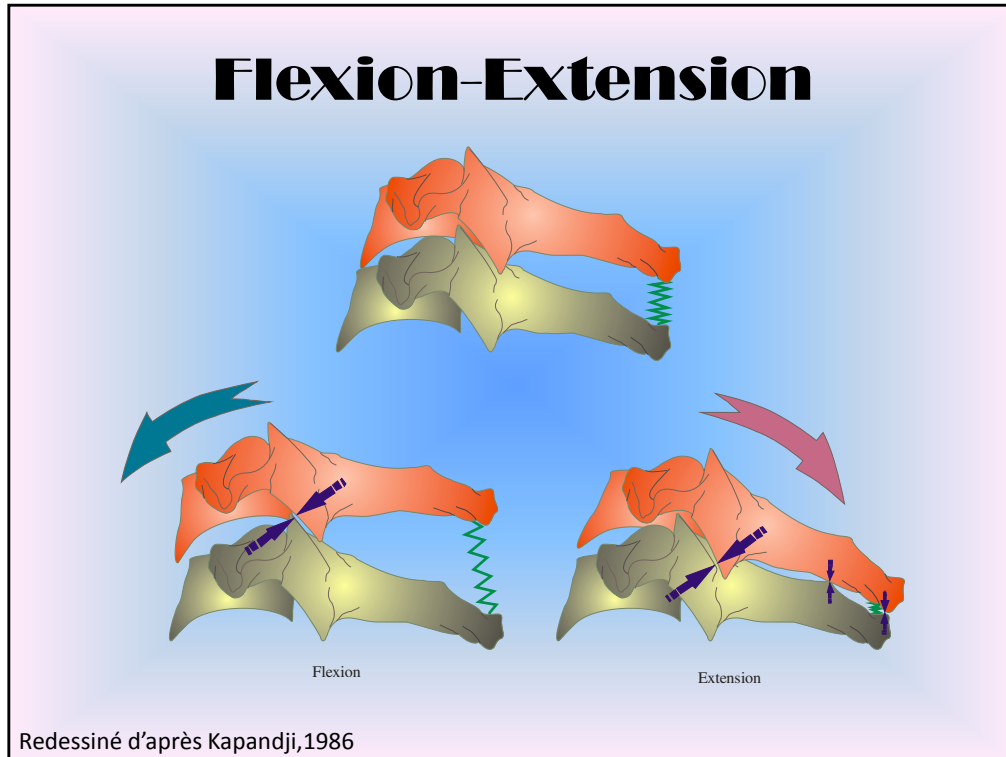
En bas = Profilométries selon grade d'atteinte DIV

Effondrement des résistances

Décalage antérieur des contraintes

- Compensation par Unco-vertébrales
- Posture influence surtout la partie antérieure du DIV
- Diminution hauteur DIV durant la journée

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



Flex-Ext conditionnée par

- Concavité plateau supérieur
- Présence d'Uncus

Max en C4-C5 et **C5-C6** (White & Panjabi, 1990)

C5-C6 considéré comme le niveau le plus mobile du R. Cervical

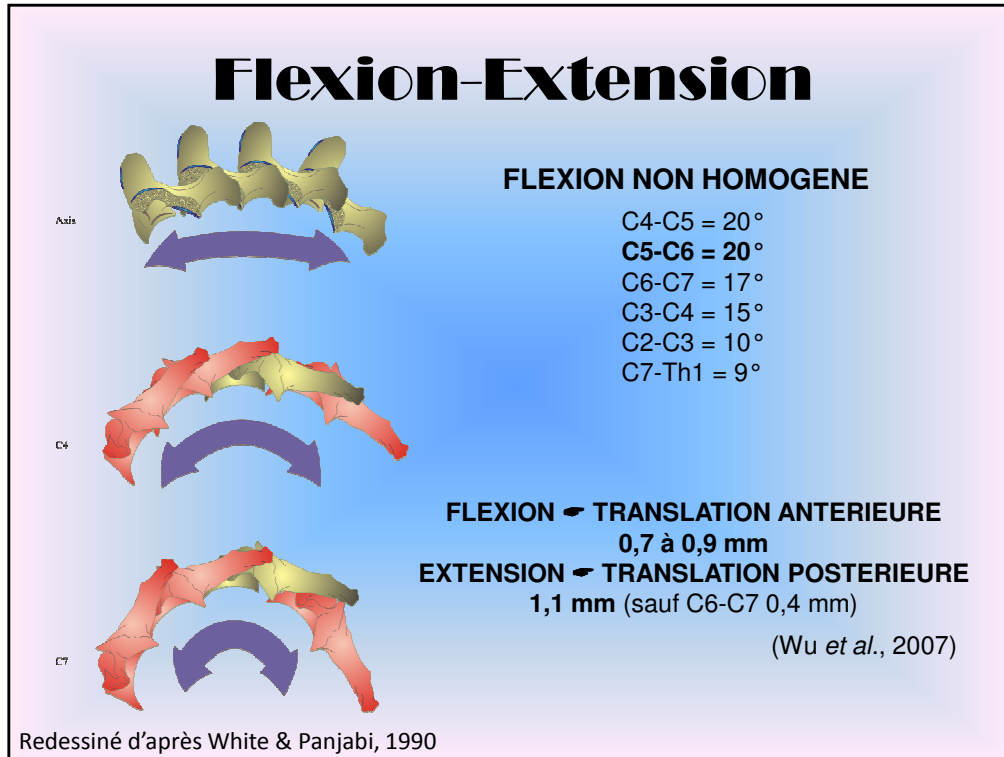
Ici, vision classique selon Kapandji reprise dans les modèles de mécanismes lésionnels ostéo

Flexion

- ⇒ Perte parallélisme facettaire avec distraction postérieure égale à la valeur angulaire de la flexion segmentaire (Kapandji, 1986)
- ⇒ Limitation : LCVP, Ligts Jaunes, Ligts inter- et supra-épineux, capsule articulaire (Kapandji, 1986; Panjabi et al., 1975; White et al., 1975)

Extension

- ⇒ Distraction facettaire antérieure égale à la valeur angulaire de l'extension segmentaire (Kapandji, 1986)
- ⇒ Limitation : LCVA, Butée Ap. épineuses, Butées Lames (Kapandji, 1986, Panjabi et al., 1975)



La Flex-Ext s'accompagne de phénomènes supplémentaires :

- Non-homogène dans sa distribution
- Non-homogène dans son profil
- Associée à translation soit ant. soit post.

Variable (jusqu'à (° de différence) selon (Van Mameren et al., 1990)

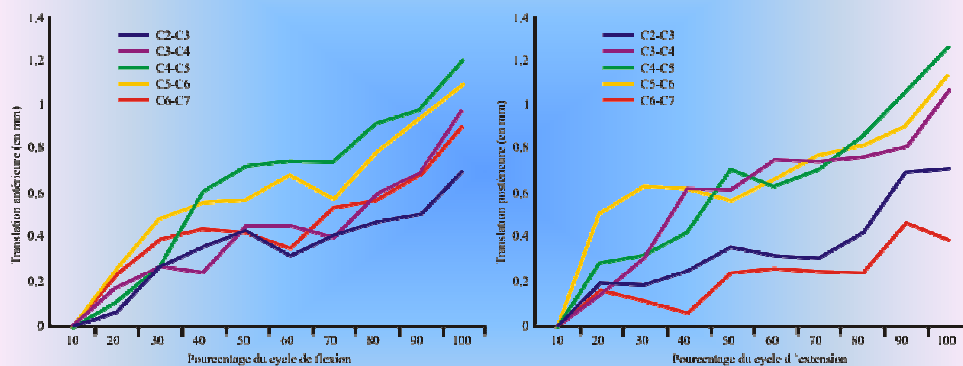
- Les individus
- Les jours
- Les heures

La Flexion segmentaire se termine avant la flexion globale du rachis

Quand la dynamique globale continue => mise en légère extension segmentaire paradoxale (Van Mameren et al., 1990)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

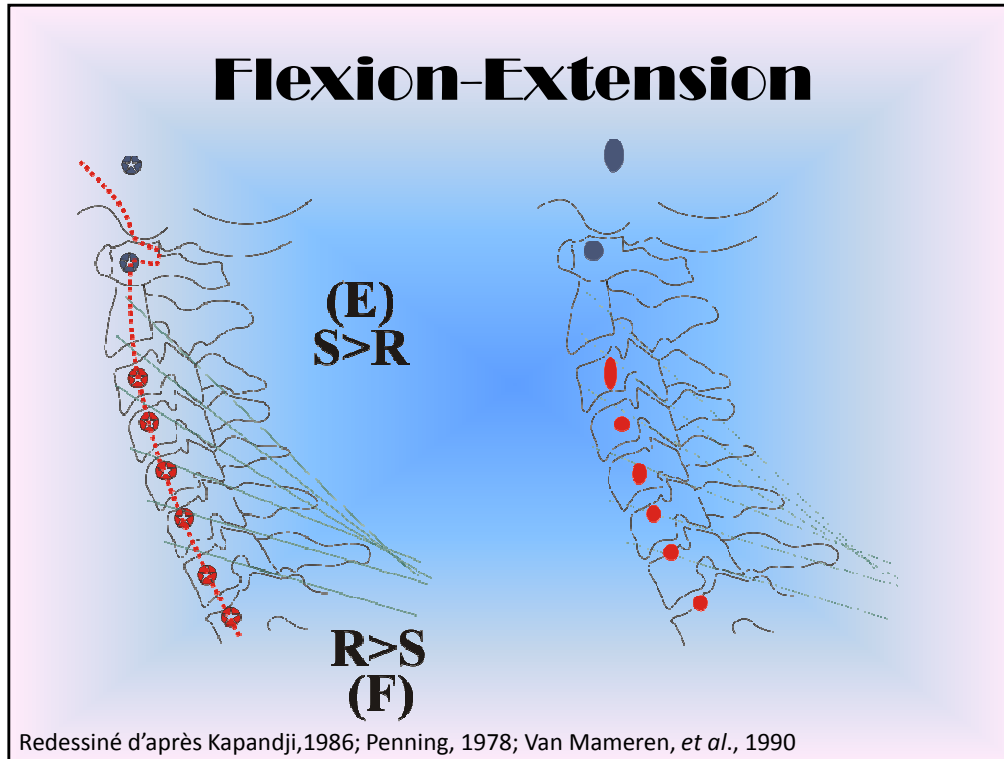
Flexion-Extension



Redessiné d'après Wu, *et al.*, 2007

- Translations Antérieure et Postérieure accompagnant la Flex-Ext
- ⇒ Non linéaire dans le temps et selon les niveaux
- ⇒ Nombreuses variations inter-individuelles (Wu et al., 2007)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



Les C.I..R. de Flex-Ext sont situés au niveau de la vertèbre SOUS-JACENTE (Penning, 1978; Kapandji, 1986; White & Panjabi, 1990; Van Mameren *et al.*, 1990)

Les CIR se situent en projection du trajet de l'Art. Vertébrale

Positions CIR constants selon individus ou circonstances (Amevo *et al.*, 1992; Van Mameren *et al.*, 1992)

- Normalité de position associée à 96% avec indolence
- Anormalité de position associée à 77% avec symptômes
 - En particulier niveaux C2-C3 et C3-C4 (Amevo *et al.*, 1992)

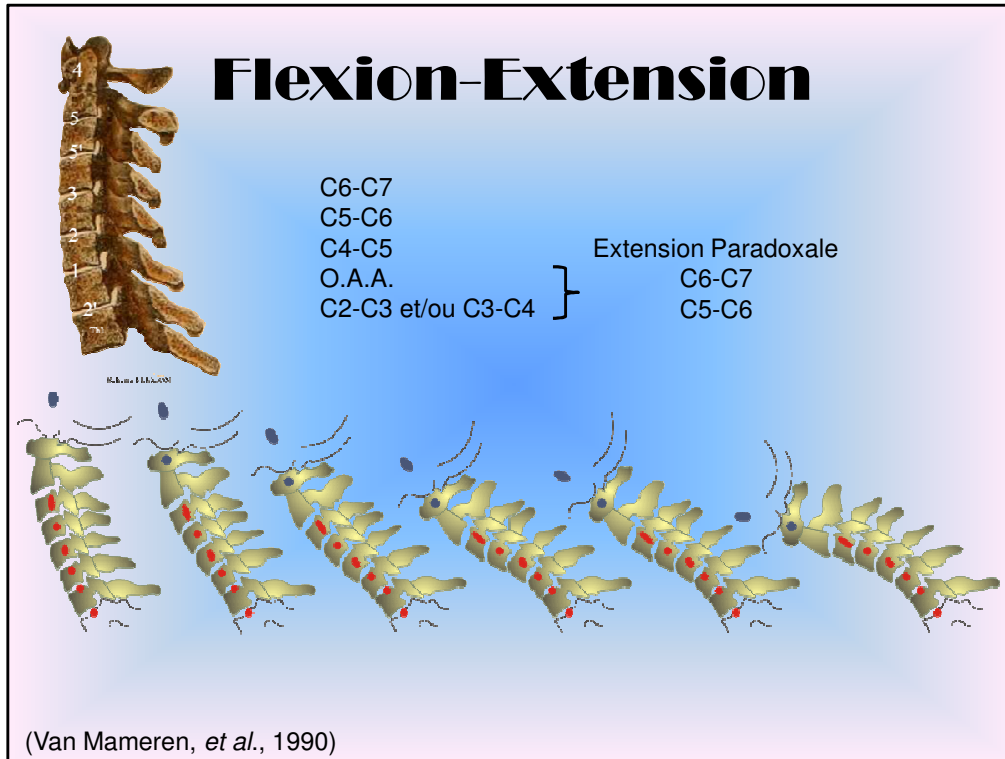
Rotation couplée avec Rotation Axiale (C2-C3=1,4°; C3-C4=2?3°; C4-C5=1,5°)

Flexion couplée avec Rotation Axiale (C5-C6= 0,9°; C6-C7= 2?4°; C7-Th1=3,0°)

(Ischii *et al.*, 200'; Mimura *et al.*, 1989; Zhao *et al.*, 2012)

Attention : Résultats opposés à ceux décrits par Kapandji

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



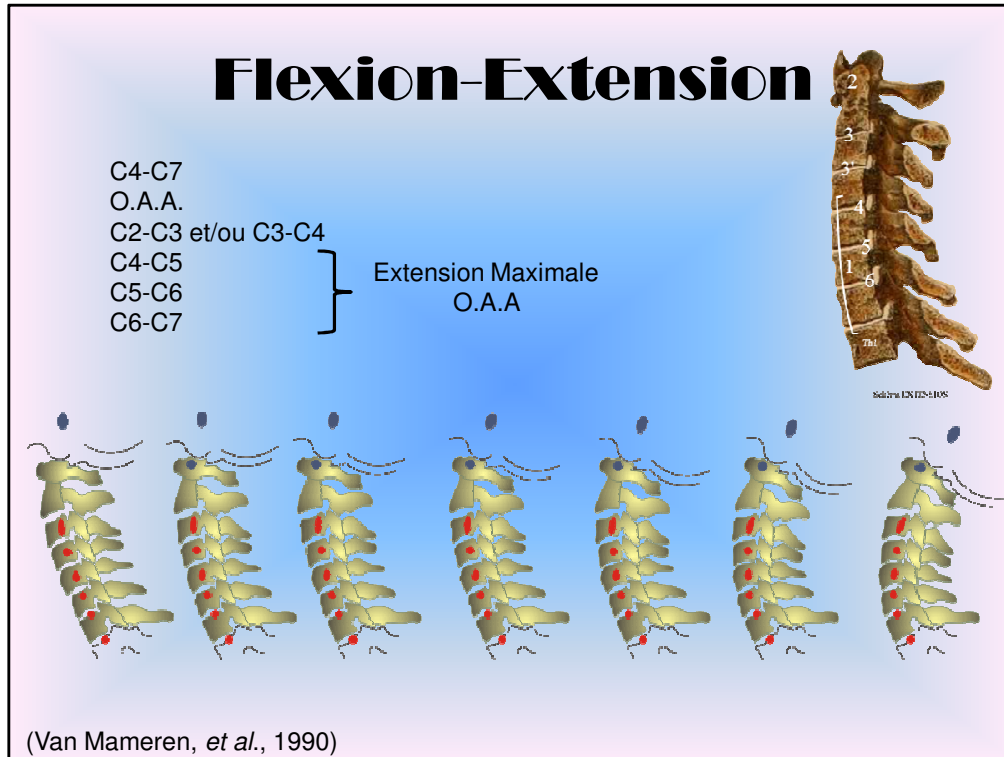
La Flexion n'est pas homogène dans son déroulement et suit un schéma constant entre les individus

Ici, schéma de Flexion (Van Mameren et al., 1990)

COPIE NON AUTORISÉE

EST

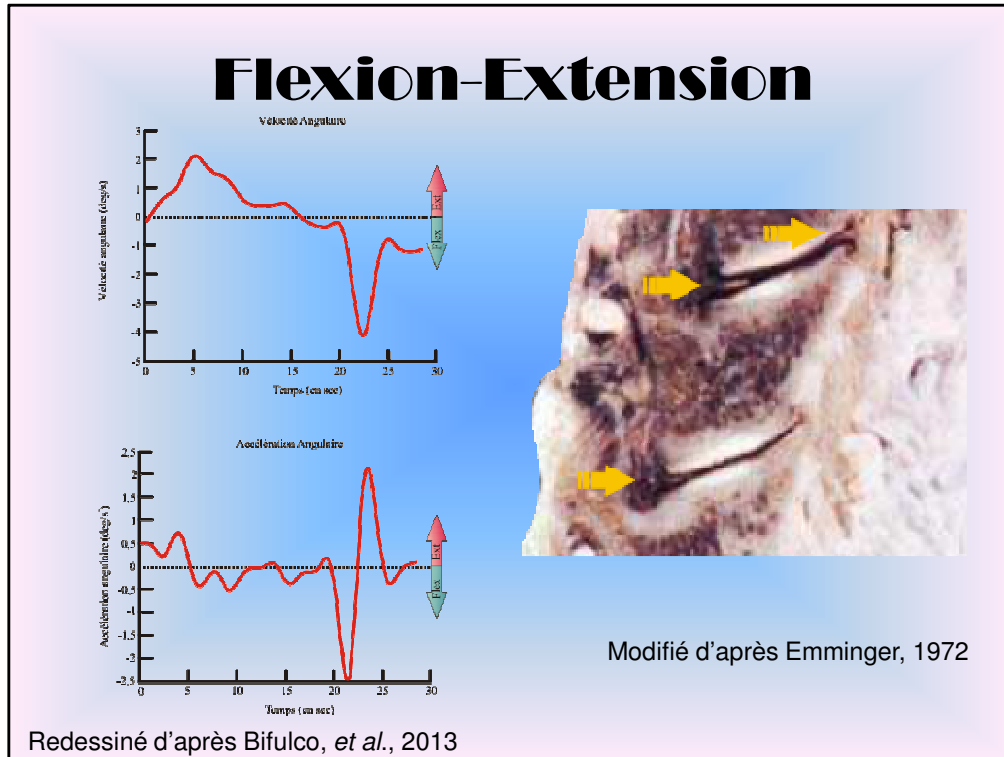
DOCUMENT EN LECTURE SEULE



Ici, schéma d'Extension (Van Mamerren et al., 1990)

Il existe des Flex-Ext sans mobilité du Rachis cervical :

- Déglutition (Mikata et al., 2013) :
 - Flexion C1-C2 et C2-C3 + Extension C5-C6
 - Pas de mobilité C1-C4 et C7
 - Translation vers le Haut C1-C2-C3 + Translation vers le Bas C5-C6
 - Pas de mobilité C1-C7
 - Chant
 - Augmentation angle cranio-cervical de 7°
 - Flex Atlas (6°); Axis (7°); C4 (6°)
 - Augmentation diamètre antéro-postérieur Pharynx (environ 6mm en C3 (Johnson & Skimmer, 2003)
- => Colonne Cervicale en Rectitude (Scotto Di Carlo, 1998)



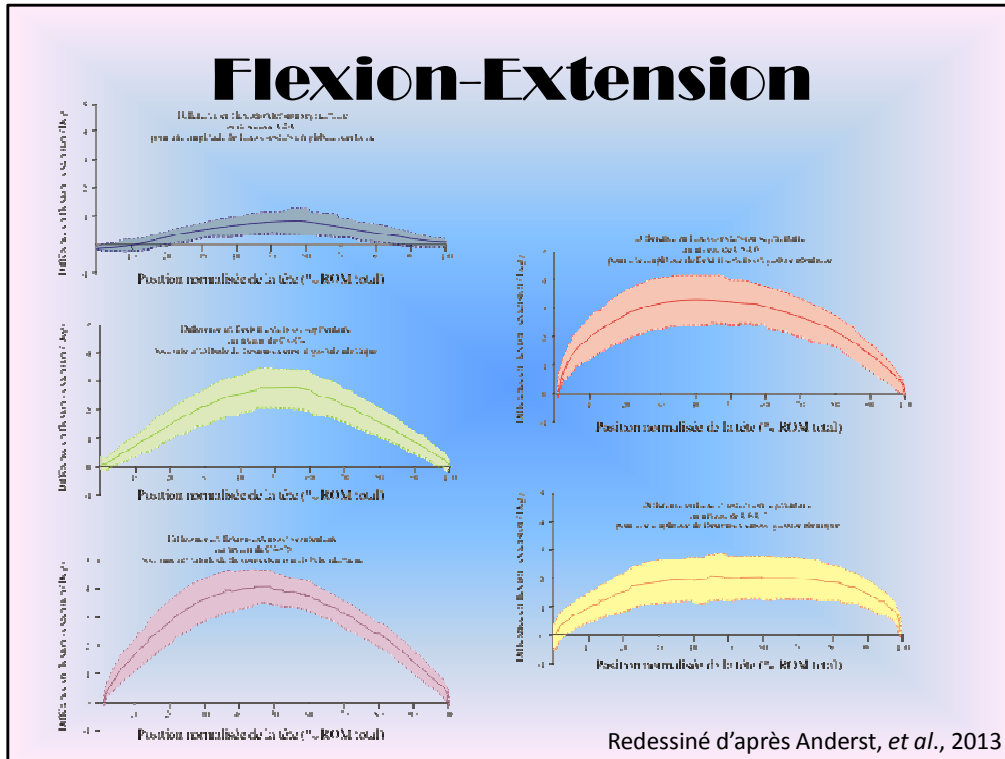
Flex-Ext = Mvt le plus utilisé dans les activités de la vie courante (2x plus que Rotation ou Inclinaison)

= Secteur utile = 15° autour de la verticale

= contre 13° pour la Rotation et 10° pour l'Inclinaison Latérale (Sterling et al., 2008)

- Mouvement non-homogène dans le temps => Vitesse et Accélération variable au cours du mouvement et selon les niveaux (Bifulco et al., 2013)
- Présence de replis ménischoïdes plutôt synoviaux et graisseux que fibreux niveau R. Cervical Inf.

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

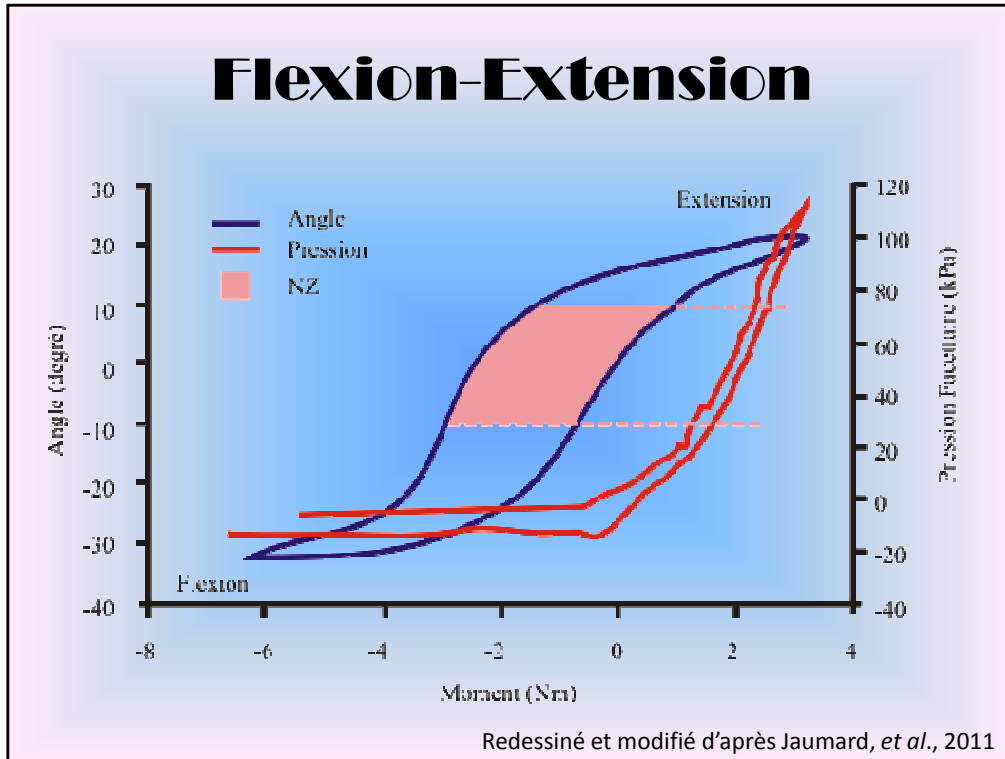


Notion d'Hystérésis segmentaire de la mobilité propre à chaque segment (Anderst et al., 2013; Wateir, 1997, 2006; Jaumard et al., 2011)

Hystérésis le + faible en C2-C3 (environ $0,8^{\circ} \pm 0,6^{\circ}$)

le + grand en C4-C5 (environ $4,1^{\circ} \pm 3,5^{\circ}$) (Anderst et al., 2013)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



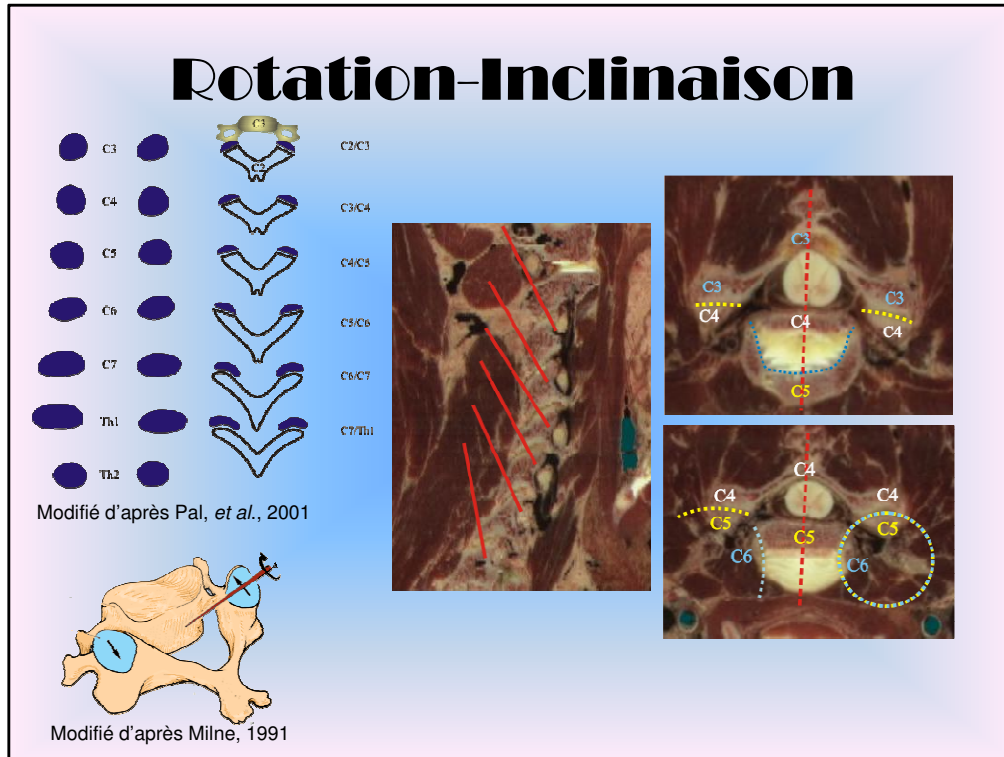
Évolution non-linéaire des pressions facettaires au cours de la Flex-Ext

Pression augmente avec l'Ext; diminue avec la Flex; NULLE à partir d'un certain degré de Flex (Jaumatrd et al., 2011)

COPIE NON AUTORISÉE

EST

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



Largeur osseuse des facettes augmente de haut en bas (Pal et al., 2001)

Par contre largeur cartilagineuse facettes plus importante niveau R. Cervical Sup. (Yogamandan et al., 2003)

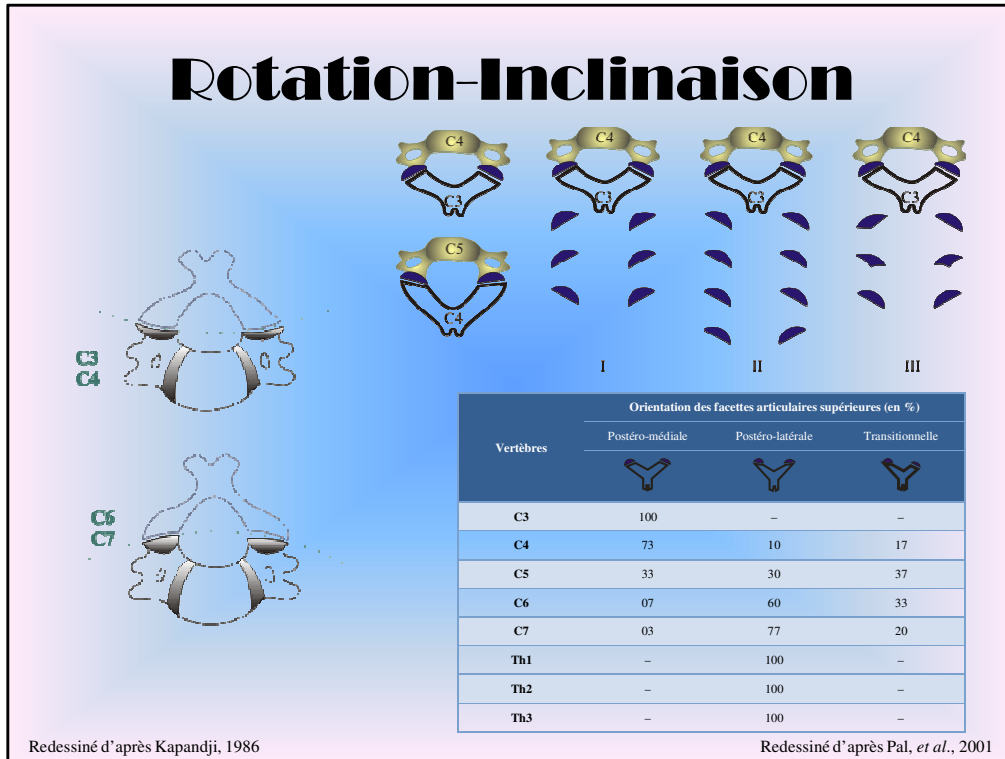
Asymétrie facettaire (Taille+ Inclinaison) en fonction de la latéralité (Pal et al., 2001; Milne, 1991)

Rotation et Inclinaison sont Obligatoirement couplées

(Henke, 1863; Penning, 1978; Castaing & Santini, 1960; Kapandji, 1986; Bogduk & Mercer, 2000)

Dû à :

- Orientation facettes articulaires
- Présence des Uncus (Hadley, 1944; Fielding, 1957; Milne, 1991; Clausen et al., 1997)
- Interligne articulaire facettes et interligne Uncus presque perpendiculaires, parfois compris dans la surface d'une même cercle (association de mouvement favorisée++)
- Uncus spécifique aux Bipèdes (Hall, 1965)



Orientation postéro-médiale constante de C3 = Meilleure stabilité et facilitation rotation C2 (Pal et al., 2001)

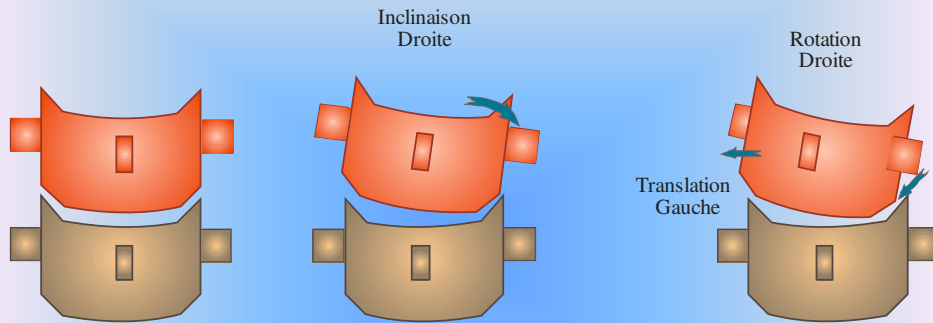
Horizontalisation facettes C5-C6 et C6-C7 serait facteur de lésions

Architecture sous-chondrale C6-C7 similaire à celle de L5-S1 (Wilke et al., 2012; Pritz, 1985)

Au niveau des transitions, Rotation restreinte côté opposé à la facette orientée postéro-médialement => **ne pas confondre avec perte de mobilité pathologique**

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rotation-Inclinaison



Couplage	Occ-C1	C1-C2	C2-C3	C3-C4	C4-C5	C5-C6	C6-C7
Rotation Inclinaison	0,4±0,1	2,6±0,7	0,6±0,2	0,6±0,1	0,5±0,2	0,4±0,1	0,3±0,2
Inclinaison rotation	0,7±0,4	0,2±0,1	0,5±0,4	1,0±0,5	0,7±0,2	0,6±0,1	0,6±0,2

Rapport des mobilités couplées sur les mobilités principales. D'après Watier, 2006

Inclinaison Latérale sollicite relation unco-vertébrale

- Compression homolatérale uncus et distraction controlatérale (Tubbs et al., 2012; Nagamoto et al., 2012)
- Compression latérale au niveau R. Cervical Moyen
- Compression postéro-latérale au niveau R. Cervical Inf. (Nagamoto et al., 2012)

Inclinaison et Rotation de même sens au niveau R. Cervical Inf.

Translation de sens opposé dans les 3 plans de l'espace (Mimura et al., 1989)

Rotation axiale = mêmes phénomènes associés

Axe rotation perpendiculaire axe des facettes

Concavité Post. (peu marquée) C3-C4 = majeure Incl. Latérale

Concavité Ant. C6-C7 = majeure la Rotation

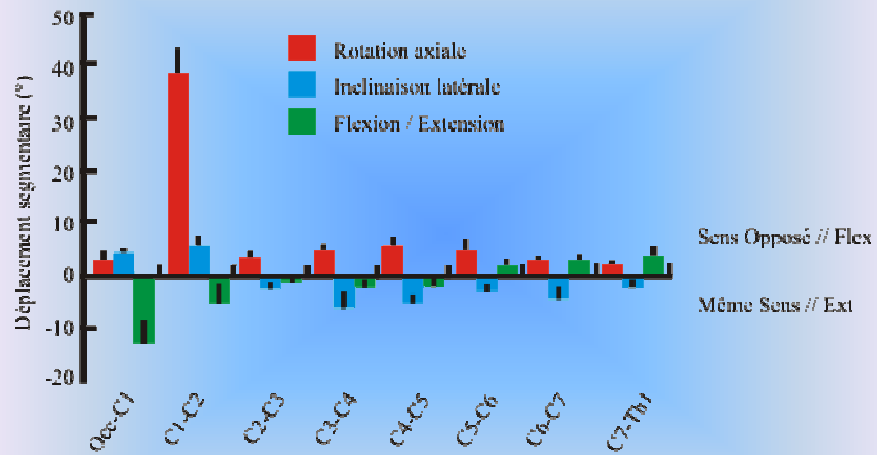
au niveau C7-Th1, Incl facette $\cong 10^\circ \Rightarrow$ Rotation presque pure

Notion Hystérésis mobilité

Au niveau C1-C2, Incl+Rot. 4x supérieure à Incl. Isolée

Au niveau R. Cervical Inf., Incl. Isolée > Incl.+Rot. (Watier, 1997, 2006)

Rotation-Inclinaison



Redessiné d'après Zao, *et al.*, 2013

Déplacement segmentaires dans les 3 plans de l'espace

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rotation-Inclinaison

Mobilité Moyenne		Occ-C1	C1-C2	C2-C3	C3-C4	C4-C5	C5-C6	C6-C7
Flexion Extension	ROM (en °)	26,9±11,8	18,4±8,8	11,2±4,8	16,4±6,1	17,1±5,3	18,7±6,7	15,9±4,9
	NZ (en °)	9,1±9,3	11±3,7	4,8±2,7	11,9±7,5	9,5±3,8	10,7±6,2	7,5±2,4
	NZ/ROM (en %)	±34	±61	±43	±72	±56	±57	±47
	% ROM totale	21	15	9	13	14	15	13
Inclinaison Latérale	ROM (en °)	9,8±2,3	12,2±8,5	11,7±7,0	11,9±6,0	10,9±4,8	10,1±5,2	9,3±4,7
	NZ (en °)	4,3±1,9	7,5±7,0	7,7±3,5	7,4±3,5	6,9±0,8	6,4±1,4	6,0±1,2
	NZ/ROM (en %)	±44	±61	±66	±62	±63	±63	±56
	% ROM totale	13	17	15	16	14	13	12
Rotation Axiale	ROM (en °)	6,7±6,4	73,4±16,3	11,6±6,6	10,0±5,9	10,3±6,9	7,5±4,3	6,2±6,6
	NZ (en °)	4,5±2,7	59,4±4,4	6,6±0,3	6,0±4,8	6,0±3,4	5,2±1,1	3,0±1,1
	NZ/ROM (en %)	±67	±81	±57	±60	±58	±69	±48
	% ROM totale	5	55	9	9	8	8	6

Tableau récapitulatif des valeurs des amplitudes de mouvement du rachis cervical.
ROM : amplitude globale du mouvement. NZ : zone neutre.
Données d'après Watier, 2006; Hoang, 2008

Légère prévalence de la Flex-Incl. Drte-Rot. Drte en NZ (Watier, 1997)

En dehors de la NZ, (Watier, 1997) :

- R. Cervical Sup. plus rigide en Ext (x20) qu'en Flex (x13)
- R. Cervical Inf. plus rigide en Ext (x8) qu'en Flex(x5)
- Rigidité harmonieuse en Incl. Lat (x14) – plus faible en C3-C4
- Rigidité harmonieuse en Rotation (x13) - plus faible en C4-C5

Activité Vie Courante : Ampl. Utiles = 30-50% Ampl. Max. (Bennet et al., 2002; Bible et al., 2010)

- Traverser une rue = 32° Rot. G. - 54° Rot. Drte => études faites pour une circulation automobile à droite; *quid* si circulation à G ?
- Faire un **créneau** = 68° Rot. – 32% Flex-Ext. + 21% Incl. Lat. + 92% Rot.
- Se laver les cheveux = 43° Flex-Ext
- Lacer des chaussures = 66° Flex-Ext

Un Whiplash diminue toutes les amplitudes sauf l'Incl. Lat. G. (Kaalo et al., 2007)

Une lésion de la Membrana Tectoria est associée à une diminution de la Rot. G.

Rotation-Inclinaison

Âge	Flexion-Extension		Inclinaison Latérale		Rotation Axiale		Rotation depuis une Flexion		Rotation depuis une Extension	
	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F
20-29	152,7	149,3	101,1	100,0	183,8	182,4	75,5	72,6	161,8	171,5
30-39	141,1	155,9	94,7	106,3	175,1	186,0	66,0	74,6	158,4	165,8
40-49	131,1	139,8	83,7	88,2	157,4	168,2	71,5	85,2	146,2	153,9
50-59	136,3	126,9	88,3	76,1	166,2	151,9	77,7	85,6	145,8	132,4
>60	116,3	133,2	74,2	79,6	145,6	154,2	79,4	81,3	130,9	154,5

Variations des amplitudes articulaires du rachis cervical selon l'âge et le sexe. D'après Dvorak, *et al.*, 1992

Diminution hauteur DIV +> Diminution largeur+aire Foramen Intervertebral

- Ostéophytose proportionnelle dégénérescence DIV
 - Significative dès 1,2+/-0,78 mm
 - Corrélation entre ostéophytose et compression radiculaire (Sohn et al., 2004)
- ⇒ Présupposer existence ostéophytes si dégénérescence DIV, même si non vus sur clichés Rx et choisir le type de normalisation en conséquence

Augmentation diamètre racine nerveuse de C3 à C6

- Risque max de compression radiculaire en C5-C6 G et C4-C5 Drte (Nishinoma et al., 2012)
 - Conjonction diamètre racine max et aire foramen mini => rapport contenant/contenu le plus faible
 - Foramen normal = 11mm de haut x 5,5mm de large = aire : 5,6mm²
 - Aire C5-C6 G = 4 mm² et Racine = 5,8mm
 - Aire C4-C5 Drte = 3,9 mm² et Racine = 4,6 mm (Nishinoma et al., 2012; Barakat & Hassun, 2012)

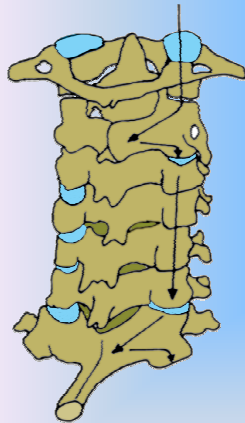
Après 70 ans, risque max +++ Fracture Odontoïde sur mécanisme de faible amplitude type chute de sa hauteur (Muller et al., 1999)

à 95%, fractures de type II (Lakshmanan et al., 2005)

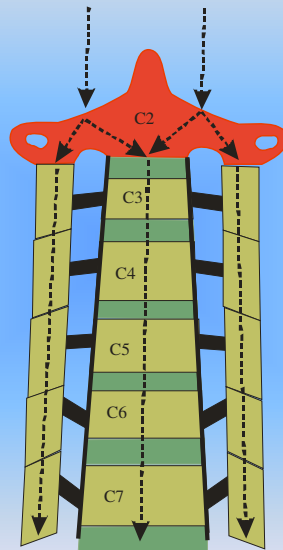
Pas de prévalence significative liée à l'âge pour les douleurs facettaires (manchikanti et al., 2008)

Pas de différence significative entre les niveaux lors vieillissement (Kettler et al., 2007)

Rachis Cervicale Inférieure



Redessiné d'après
Pal et Routal, 1996



Redessiné d'après Pal et Routal, 1985



Transmission des charges aux niveaux cervicaux et thoraciques hauts (Jusque Th4)
Pédicules figurés par des barres noires dont l'épaisseur est à l'échelle
Répartition en tripode au niveau cervical puis bi-focale

Structure interne trabéculaire des pédicules en C inversé avec épaisseur corticale max près du canal vertébral.

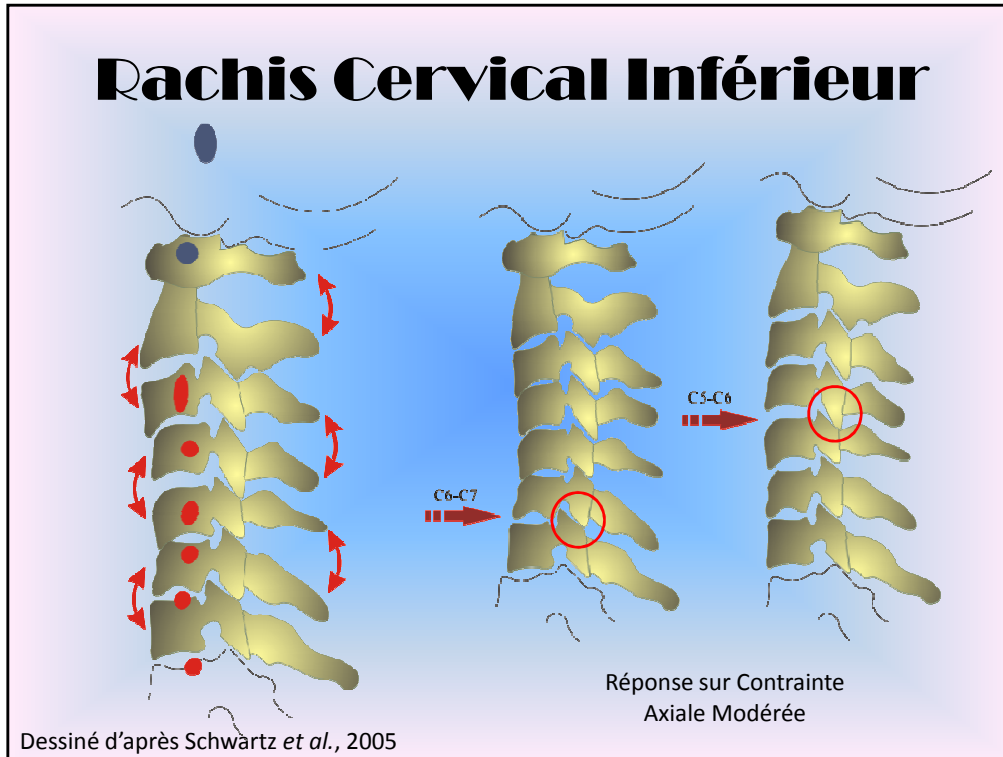
Variations inter-individuelles et entre les niveaux

Indice robustesse Max en C3-C4; Mini en C6 (Shin et al., 2000; Panjabi et al.,

2000)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Inférieure



Réaction à la compression rapide = 2 à 31ms

Installe un flambage physiologique suivi de contractions musculaires réflexes vers 60ms après compression

⇒ Tend à paralléliser les plateaux vertébraux (Schwartz, et al., 2005)

⇒ Alternance de phénomènes d'Extension et de Flexion entre les niveaux vertébraux

⇒ Rend compte des phénomènes observés lors du test diag. Ostéo dit des « Marches d'escaliers »

⇒ Illustration d'une dysfonction C6-C7 en Ext et C5-C6 en Flex suite compression axiale modérée

⇒ Une rectitude ou une inversion de courbure n'est pas synonyme de Whiplash Injury

Les capsules articulaires donnent insertions

- Grand Complexius : C2->C7 (Sappey, 1867)

- C3-> C7 (Testut, 1899)

- C4-> C7 (Poirier, 1901)

- Petit Complexius : C3-> C7 (Poirier, 1901)

- Longissimus de la Tête + Semi-épineux de la Tête+ Semi-épineux du Cou+ Multifide de C4->C7 (Cunningham, 1914)

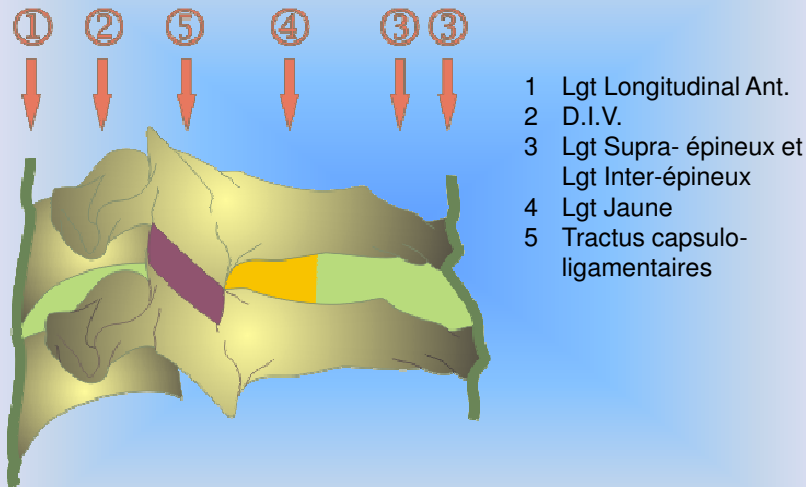
- Multifide Axis+ C4-C5+C5-C6+C6-C7 (Anderson, 2005)

⇒ Tenseurs de la capsule articulaire + Action décoaptatrice

⇒ Environ 23% de la capsule présente des insertion muscu, les Homme 1,8 x plus que les Femmes

⇒ Pas de différence entre les latéralités ni les niveaux segmentaires ou d'influence du poids corporel (Wilkenstein et al., 2001)

Whiplash Injury



Whiplash Injury = défini pour la première fois par Harold Crowe en 1928 lors Western Orthopedic Assoc. Proc. de San Francisco – Minutes non publiées. Repris et diffusé par Davis en 1945

Déstabilisation de la colonne selon les atteintes dans l'ordre des numéros autant en NZ qu'en EZ (Richter et al., 2000; Panjabi et al., 1998)

Flex-Ext dès atteinte du Ligt Longitudinal Ant.

Rotation avec atteinte Capsule Art.

L'Incl. Lat augmente avec les lésions mais n'est pas déstabilisée (Richter et al., 2000)

Capsule art.

- Toujours atteinte lors d'un Whiplash (Lee et al., 2004; Lu et al., 2006; Siegmond et al., 2001; Wilkenstein et al., 2000)
- Très sensible étirement ou compression (Chen et al., 2005; 2006) ainsi qu'à la douleur (Kallahuri et al., 2004; 2012)
 - Mise en tension capsule augmente fréquence de décharge corpuscules sensitifs et donc sensibilité (Wilkenstein & Shuter, 2008)
 - La persistance d'une tension permanente
 - => Syndrome douloureux chronique même en l'absence de lésion objective (Cavanaugh et al, 2006)
 - => **Se méfier des interprétations psychologiques excessives post-whiplash ou post-trauma modérés**
 - Pas de réponse du SCM à étirement capsulaire, réponse modérée

Trapèze, Long du Cou, réponse forte du Multifide (Azar et al., 2009;2011)
Muscle Long Ant. du Cou + Partie Ant. DIV souvent atteint lors phase d'hyperextension du Whiplash (Ivanic et al., 2004; Stemper et al., 2006)

Rupture

- LCVA à 3,5 G en C4-C5
- DIV à 5 G en C5-C6
- Ligts Inter- et Supra-épineux à 6,5 G en C6-C7
- Limite rupture ligts à 8 G en C3-C4 (Ivanic et al., 2004; Stemper et al., 2004; Pearson et al., 2004)

Présence os sésamoïdes dans ligt Nuchal niveau C5-C6 et C6-C7 (11, 3% Hommes et 3,5% Femmes) sans signification patho. (Scapinelli, 1967)

Fin de développement vers 30 ans

Hypothèse microtraumatique (Paraskivas et al., 2011)

Whiplash Injury

- Symptômes dès 10-15 Km/h de vitesse différentielle (Castro *et al.*, 1997)
- Différentiels de vitesse critiques
 - ❖ Choc Frontal : 47,7 Km/h (71% décès, 47% lésion médullaire)
 - ❖ Choc Latéral : 35,3 Km/h (67% décès, 52% lésion médullaire) (Smith *et al.*, 2005)
- Enfants touchés à 98% - Pas de différence de genre
Adultes touchés à 38% dont Femmes 72% (Nightingale *et al.*, 1998)
- Au niveau 1/3 moyen D.I.V.; Lgt Jaune et Lgts Inter- et Supra-épineux
 - ❖ Diminue de manière permanente la résistance ligamentaire à un choc ultérieur
 - ❖ Diminue l'absorption des contraintes
 - ❖ Diminue la charge de rupture (Tominage *et al.*, 2006)
- Contraintes en cisaillement plus importantes chez les Femmes, surtout en C4-C5

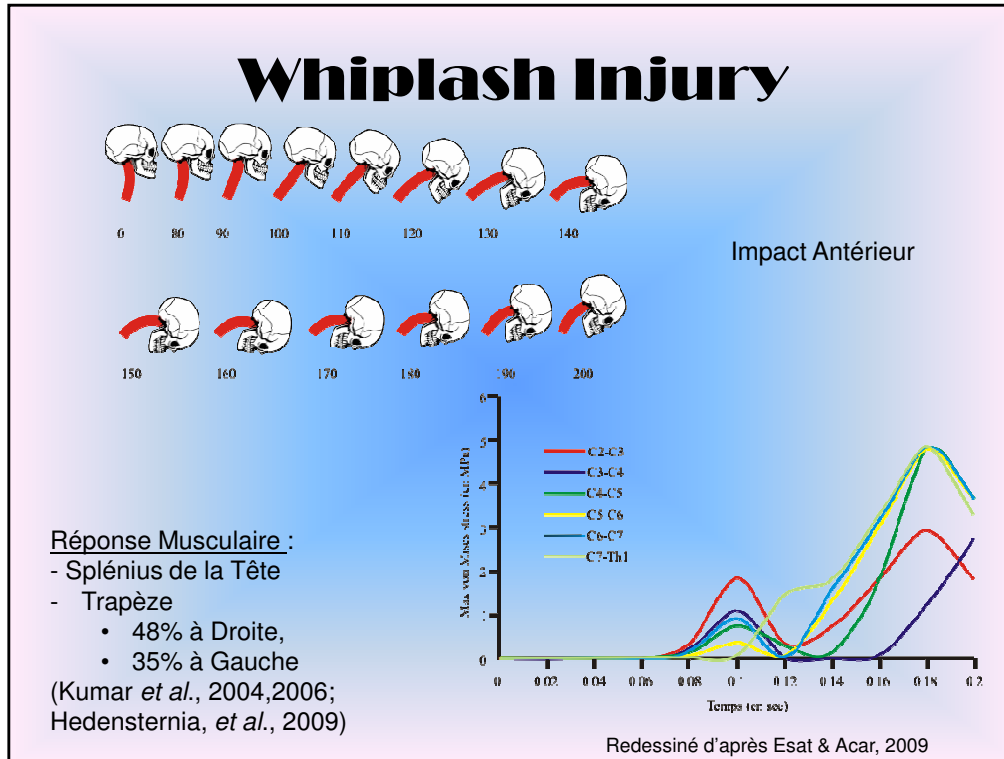
Survenu d'un Whiplash pour un différentiel de vitesse très faible

- ⇒ 10-15 Km/h = simple tamponnade arrière sur véhicule à l'arrêt sans lésions organiques objectivées
- ⇒ Parfois difficile à retrouver lors anamnèse car choc considéré comme sans importance
- ⇒ Sur-évaluation de la composante psychologique des rachialgies diffuses
 - ⇒ Modification durable fonctionnement du tissu neuronal médullaire
 - Modifications du système glutamatergique proportionnelles à l'impact (Dong & Winkelstein, 2010)
 - Une hyperexcitabilité de l'ensemble de la corne postérieure (Quinn, *et al.*, 2010)
 - Fonctionnement glutamatergique du ganglion de la racine dorsale du nerf spinal est, lui aussi, modifié et participe aux symptômes hyperalgiques (Dong, *et al.*, 2012; Dong, *et al.*, 2011)
 - Infiltration macrocytaire provoquant dégénérescence axonale, inflammation et douleurs chroniques après compression de 31,6Nm (Hubbard & Winkelstein, 2008).
 - ⇒ Relation entre les taux de CRP, de IL-1 β et la présence d'une hyperalgie 3 mois après un accident.
 - ⇒ Aucune corrélation n'a été mise en évidence avec un éventuel état de stress post-traumatique et ces marqueurs biologiques (Sterling, *et al.*, 2013).

Les muscles masticateurs sont également impliqués dans la réponse à un impact.

- Cette réponse est dépendante de la vitesse d'impact,
- Double en intensité entre 16 Km/h et 36 Km/h pour les muscles Masseter et Temporal.
- L'amplitude de la réponse est 2,5 fois plus importante chez les femmes que chez les hommes (Hernández, *et al.*, 2006).
- S'il n'existe pas de différence de vitesse de fermeture de la mandibule, sa vitesse angulaire de fermeture est par contre presque doublée.
- Corrélation avec les variations de vitesse angulaire de la tête.
- Différence entre les genres, en particulier lors des impacts postérieurs, au détriment des femmes (Hernández, *et al.*, 2006).





Touche préférentiellement R. Cervical Haut jusque C5-C6 (Ib et al., 2005)
 Chaque DIV possède une réponse propre à l'impact – Réponse différence selon impact Ant. ou impact Post.

Lésion facettaire Unilat. => Lésion Annulus+Nucléus avec Déchirure Ligt Jaune et distension Ligts Inter- et Supra-épineux (Nadeau et al., 2012)

Lésion facettaire bilat = Acc.grave à haute vitesse, Acc. Plongeon, Chutes hautes

Le plus souvent séparation facettaire postérieure à G (Panjabi et al., 2007)

Dans les 0,29ms suivant impact

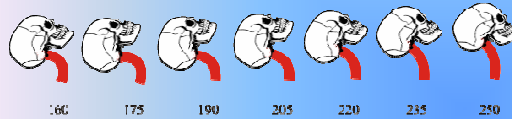
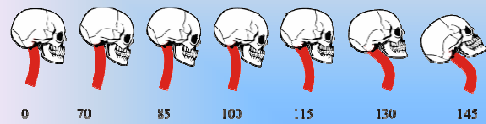
- À Gauche : Glissement Ant. (22mm) – Flexion (63°) – séparation axiale (7,9 mm post ou 2mm ant.) – Compression (9,9 mm) – Cisaillement Lat. (3,6 mm vers Drte ou 2mm vers G)
- À Droite : Flexion après glissement vers droite

Une contraction musculaire avant impact (=anticipation du choc) diminue les angulations de 63% et les phénomènes de distractions facettaires de 75% (Stemper et al., 2006)

La contraction musculaire retardée augmente les lésions ligtaires en C5-C6 et C6-C7 (Stemper et al., 2004)

Le déplacement céphalique est plus important pour le passager que pour le conducteur (un choc à 29 Km/h pour conducteur équivaut à choc à 48 Km/h pour passager) (Foreman et al., 2006)

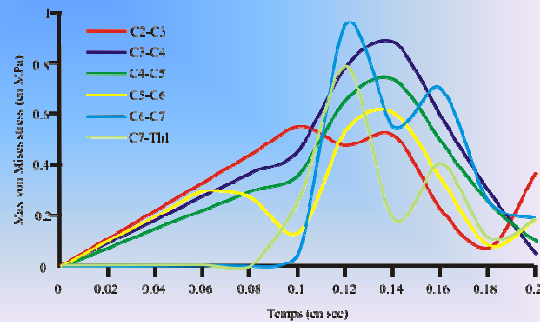
Whiplash Injury



Impact Postérieur

Réponse Musculaire :

- S.C.M
 - Petit Droit Postérieur Tête
 - Mm. Hyoïdiens
- (Kumar *et al.*, 2004,2006;
Hedensterna, *et al.*, 2009)



Redessiné d'après Esat & Acar, 2009

Symptômes dès différentiel de vitesse de 9 à 14 Km/h ou différentiel d'accélération de 2 à 3 G (Castro *et al.*, 1997) soit un Acc. Sans gravité apparente

De 0 à 74 ms post-impact

- Ext. Faible C5-C6
- Translation Post. C5/C6
- Augmentation pression foraminale modérée
- Accélération ant. Du tronc

De 75 à 144 ms

- Accélération post. Du Tronc
- Ext. Max C5-C6 (vers 120 ms)
- Translation C5/C6 max (vers 120 ms)
- Contact Appui-tête

De 145 à 237 ms

- Projection ant. de la tête
- Diminution translation post.
- Diminution extension segmentaire
- Augmentation translation antérieure
- Augmentation tensions musculaires du cou
- Pression foraminale max niveau C7-Th1
- Écrasement facettaire C4-C5-C6
- Translation post. C3-C4

Whiplash Injury

- Impact Antéro-latéral à 50 Km/h :
 - ❖ Contraction Trapèze controlatéral (83% contraction volontaire max.)
 - ❖ Contraction asymétrique Splénius (46% controlatéral – 30% ipsilatéral)
 - ❖ Contraction asymétrique S.C.M. (23% controlatéral – 13 % ipsilatéral)
 - ❖ Contraction Élévateur Scapula
- Impact Antéro-latéral à 20 Km/h :
 - ❖ Contractions SYMETRIQUES
- Impact Antéro-latéral à 30 Km/h :
 - ❖ Contraction Trapèze controlatéral (63%)
 - ❖ Début Contractions ASYMETRIQUES
- Pas de différence entre les genres sauf S.C.M. au détriment des Femmes

(Kumar *et al.*, 2003, 2004, 2006; Hernandez *et al.*, 2006 ; Hedensternia, *et al.*, 2009

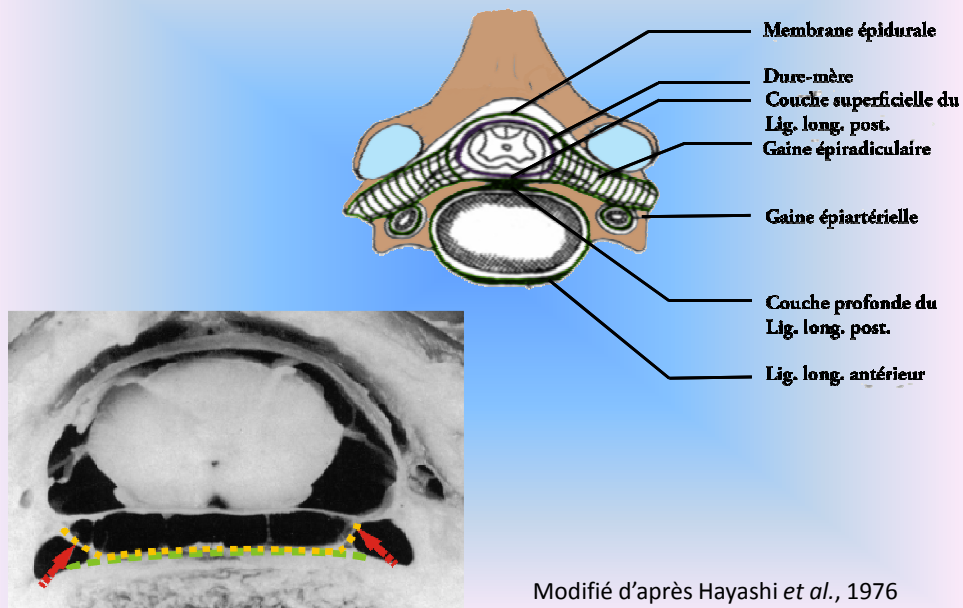
Notion de rétrécissement canalaire à l'impact

- À 71 ms en C7-Th1 = 5,1 mm
- À 97,0 ms en C5-C6 = 6,4mm et en **C3-C4 = 7,2 mm**

=> Risque de compression médullaire 35% si canal sain; 88% si sténose sous-jacente (Ivanic *et al.*, 2007)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Inférieur



Modifié d'après Hayashi *et al.*, 1976

Ligt Longitudinal Post. (hayashi et al., 1977)

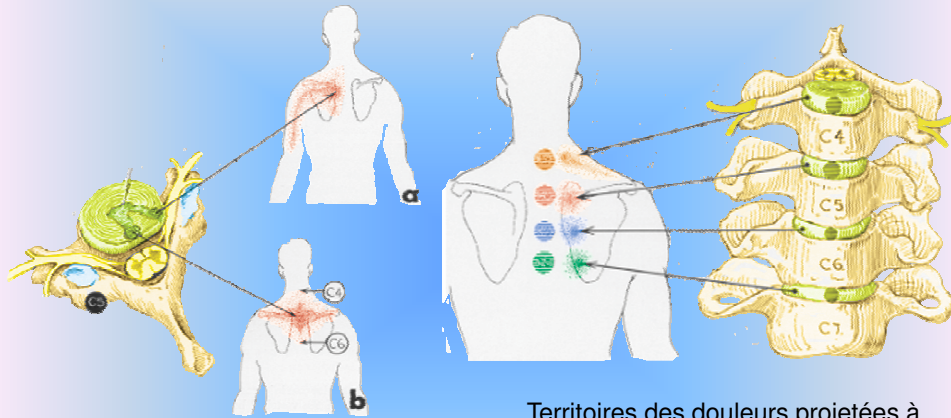
- Participe formation Annulus Post. Dans sa partie latérale
- Participe formation des gaines péri-artérielle et péri-radicales
- Se prolonge en avant
 - Participe formation des capsules art. des relations unco-vertébrales
 - Participe formation Ligt Longitudinal Ant.

N.B. : Accélération circulation LCR entre R. Cervical haut et R. Cervical bas d'environ 1cm/s; à la partie ant plutôt que post. (yiallomon et al., 2012; Hentschel et al., 2010); vitesse diminue ensuite pour devenir nulle au niveau lombaire (Enznam & Pelc, 1991)

Circu LCR liée interférence entre pulsation cardiaque, rythme respi, circulation sanguine intra-cérébrale. Production de 2 ondes d'amplitudes différentes de 0,4Hz (faible) et 1,2Hz (forte) (Kao et al., 2013)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Inférieur



Douleurs projetées a) à partir de la partie postéro-médiane du disque ;
b) à partir de la partie postéro-latérale du disque (ici disque C4-C5).
Modifié d'après Cloward, 1959

Territoires des douleurs projetées à partir de la surface antérieure des disques cervicaux inférieurs.
Modifié d'après Cloward, 1959)

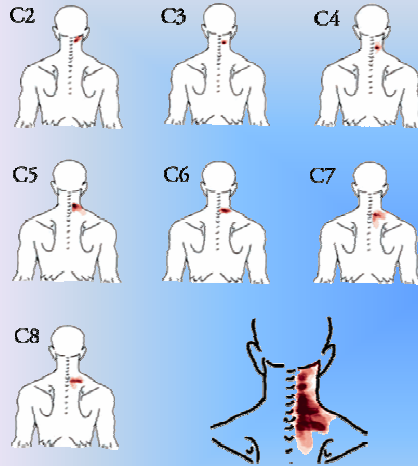
Rappels des différences sémiologiques des douleurs d'origine cervicales.

Attention : une scapulalgie peut être l'expression d'une lésion discale antérieure

COPIE NON AUTORISÉE

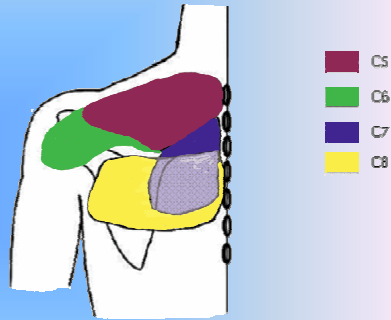
DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Inférieur



Territoires douloureux de la branche médiale d'un nerf spinal de C2 à C8. En bas à droite, récapitulatif des territoires douloureux.

Modifié d'après Windsor, *et al.*, 2003



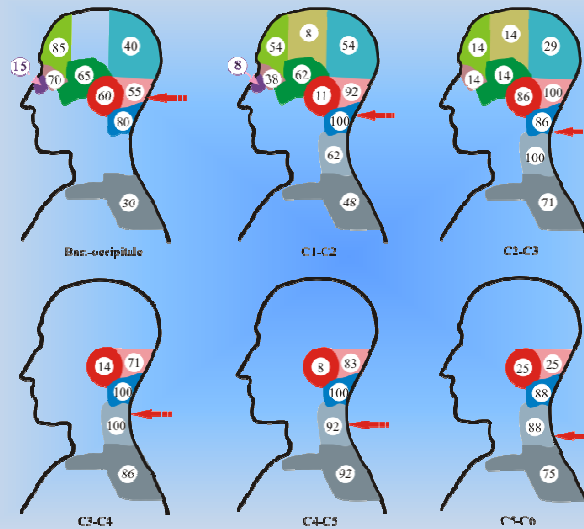
Territoires douloureux scapulaires à partir d'une irritation des racines nerveuses C5 à C8.

Modifié d'après Mizutamari, *et al.*, 2010

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervicale Inférieure

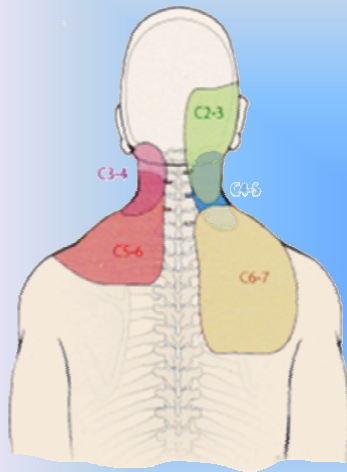


Schémas des douleurs référées après stimulation nociceptive du périoste basi-occipital et des structures inter-épineuses. Redessiné d'après Bogduk & Govind, 2009

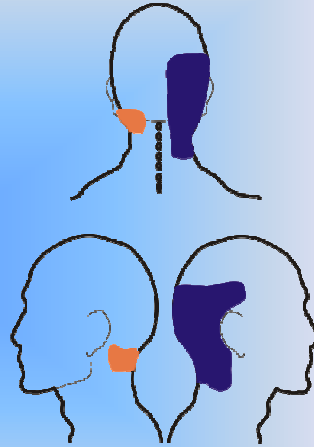
COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Inférieur



Territoires douloureux zygapophysaires cervicaux. Modifié d'après Dwyer, *et al.*, 1990



Projections douloureuses des articulations atlanto-occipitale (en rose) et atlanto-axoïdienne (en bleu). Redessiné d'après Dreyfuss *et al.*, 1994.

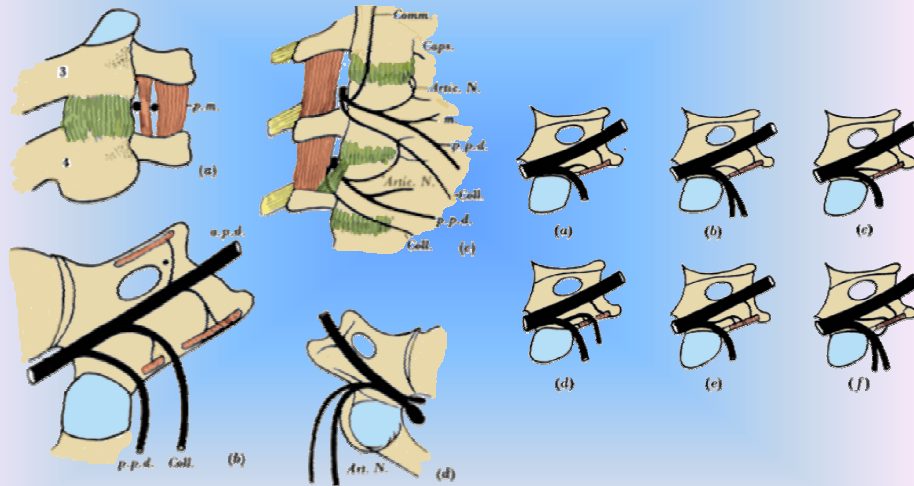
Attention : Une stimulation du nerf Trijumeau peut se traduire par des douleurs projetées dans territoire C1-C2-C3 (Vernon *et al.*, 2009; Bogduk & Govind, 2009; Bogduk *et al.*, 2001)

Le nerf Trijumeau comporte des récepteurs oestrogéniques au niveau du Ganglion de Gasser => Variation activité en fonction du taux oestrogènes.

Associée à douleur ATM + C1-C2-C3

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Rachis Cervical Inférieure



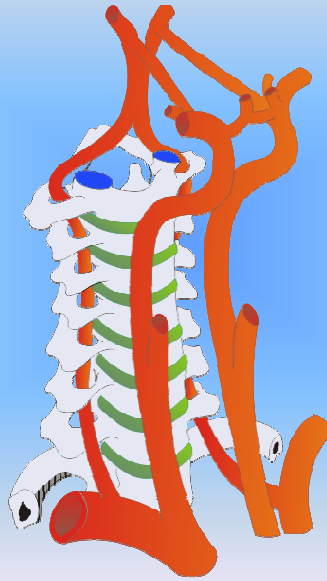
Modifié d'après Cave, 1937

Variations anatomiques des branches d'un nerf cervical – à rapprocher des différences de projections des territoires douloureux en fonction des branches irritées

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Vascularisation



Redessiné d'après Perlemuter & Waligora, 1985

Importance de l'Art. Vertébrale au niveau du R. Cervical

⇒ Dans des conditions normale, Art. peu sollicitée au niveau mécanique car située en regard des CIR

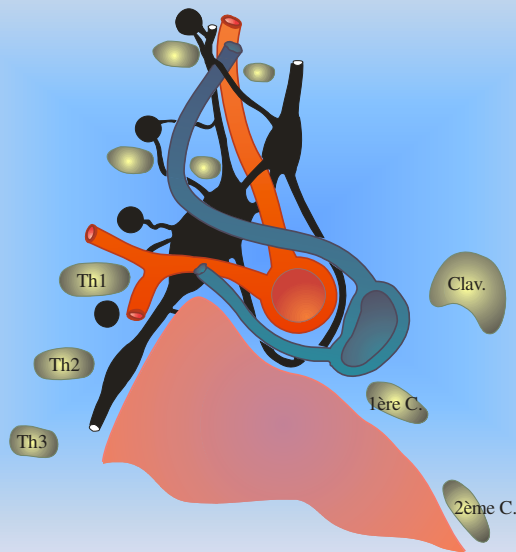
=> Importance des normalisations pour rétablir concordance fonctionnelle

Parfois différence de niveau de pénétration dans foramens transversaires entre Dcte (C6) et G (C7) : différence liée à l'embryologie de la Crosse Aortique et ses branches

COPIE NON AUTHORIZÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Vascularisation



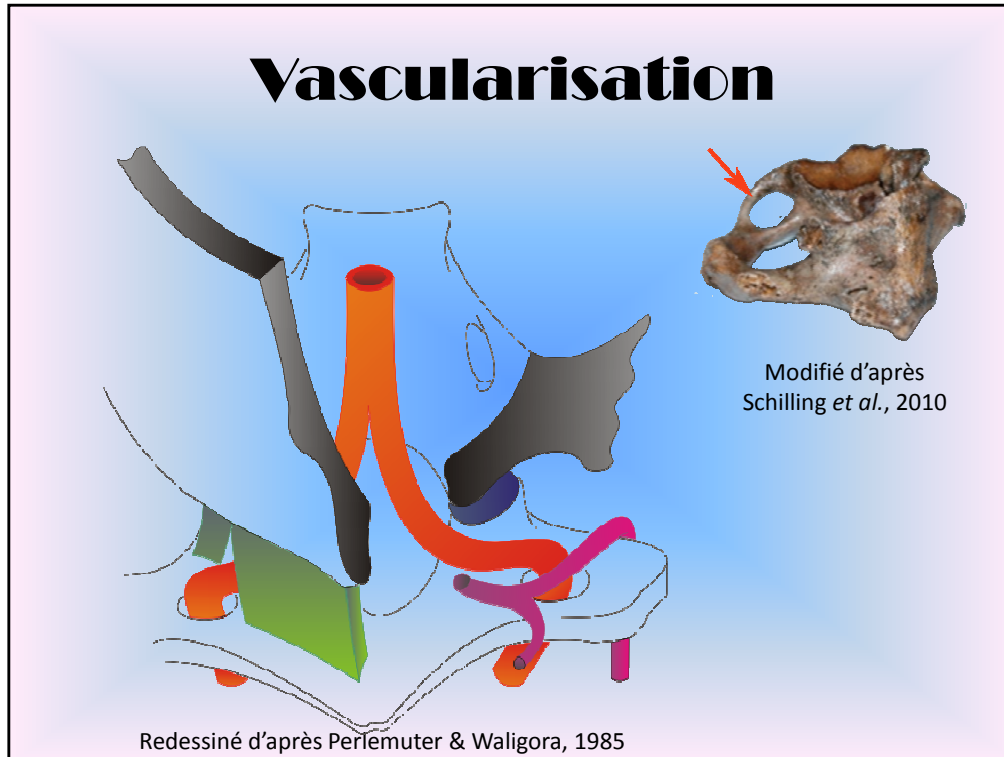
Redessiné d'après Monod & Duhamel, 1969

Schéma Apex Pulmonaire Droit

Relations Gangl. Stellaire / Artères et Gangl. Stellaire / C7-Th1
Relations Veines/Artères

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



Mise en tension Ligt Occipito-atlantoïdien Post. Lors de la Rot. + Ext => diminution du débit Art. Vertébrale selon les classiques, mais non chiffrée
 En référence aux classifications concernant les artérites du M. Inf, une baisse de débit pouvant atteindre 50% implique des signes d'ischémie transitoire ; à partir baisse de 70%, Apparition symptômes ischémie définitive

Attention : Art. Vert souvent asymétriques avec atrésie vertébrale (le +svt à G), dysplasie hypotrophique

Foramen transverse Atlas absent dans 10% des cas, plutôt de manière unilatérale, environ 55% de variations individuelles

Lié Hominisation et Bipédie (Billmann & Le Miner, 2009)

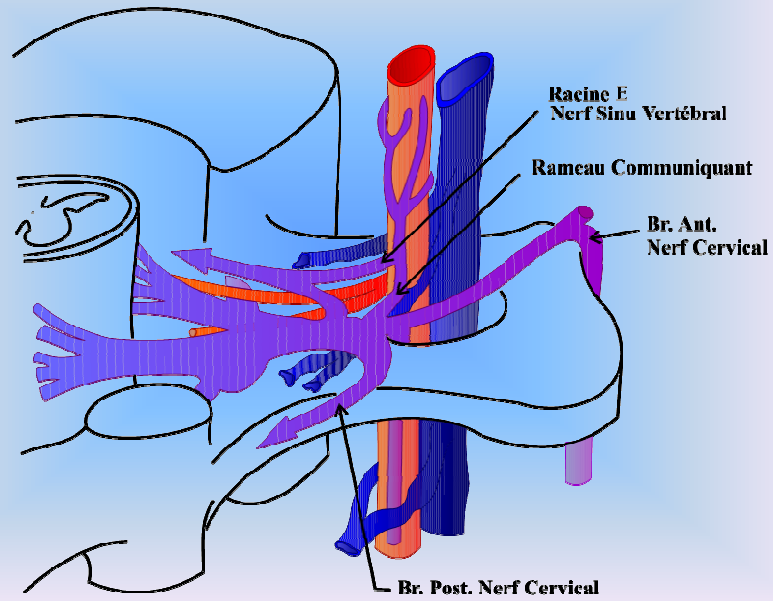
Gouttière creusée par Art. Vertébrale

- Possible tunnel osseux = Ponticulus posticus de découverte fortuite entre 11 et 20 ans (Schilling *et al.*, 2010; Cho, 2009)
- Disparition Ponticulus liée Bipédie (Schilling *et al.*, 2010)
- Tunnelisation liée traction continue par port de la Tête, port de charge, travaux manuels intenses (Le plus à G Double 1912; Krishnamurthy *et al.*, 2007; Schilling *et al.*, 2010)
- Selon les études, la prévalence varie entre 1,14% et 36,6%
- La forme complète est plus fréquente chez les Femmes, et plus à G (Dhall, 1993)

Danger Ponticuli = Risque dissection Art. Vertébrale chez enfant (Krishnamurthy et al., 2007; Cushing et al., 2001)

Migraine – Douleurs Membre Sup., Veriges – Syndrome Barré-Liéou –
Mort Subite Nourisson (Wysocki et al., 2003)

Vascularisation



Redessiné d'après Perlemuter & Waligora, 1985

Relations vasculaires et neuro-végétatives d'un foramen transversaire

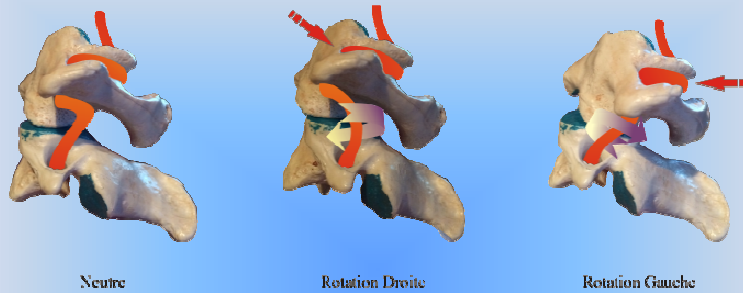
Risque de spasme artériel par irritation Sympathique

Attention: Cette conception d'une veine vertébrale accompagnant l'Artère est obsolète et fautive.

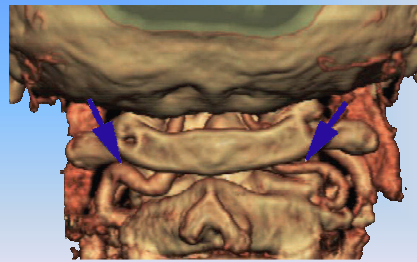
COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Vascularisation



(Cacciola, *et al.*, 2004)



(Hong, *et al.*, 2008)

Dissection Art. Vertébrale :

- Surtout segments Atlo-Axoïdien (V3) et Inter-Transversaire (V2)
- Dissection segment V1 (Segment pr-transversaire) rare – Bilatéral dans 1/3 des cas – Associée dissection Carotide dans 10% des cas
- Classiquement due à l'étirement des segments V2 et V3 lors de la rotation controlatérale

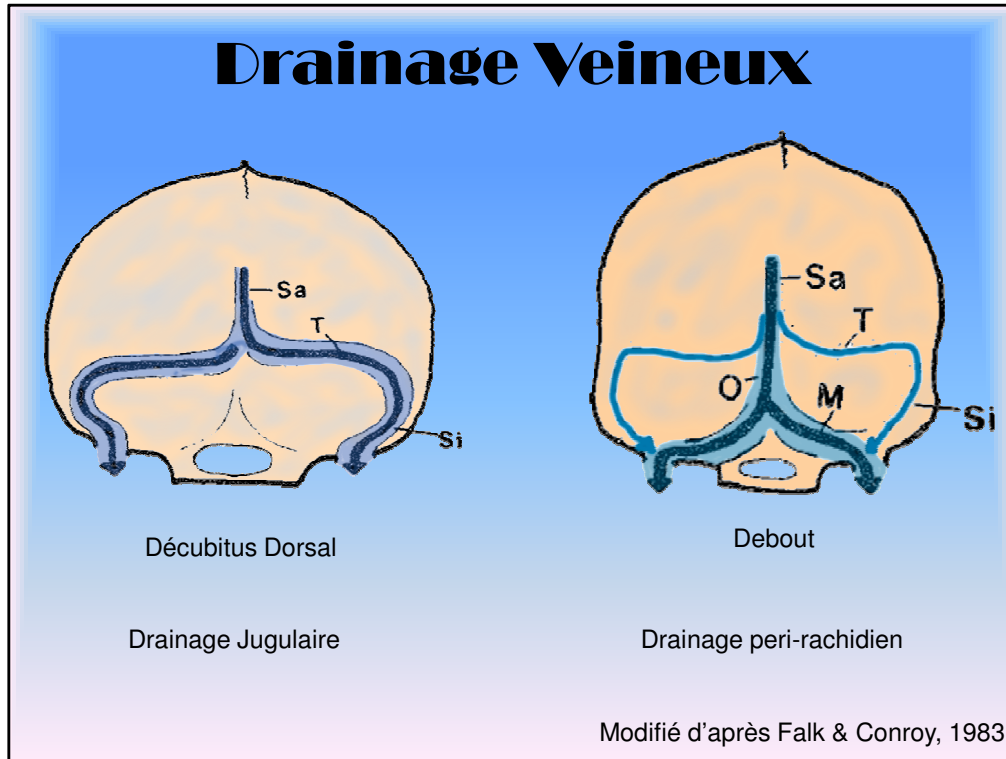
Au niveau de V3, présence d'une boucle sous-atlantoïdienne à concavité antérieure limitant les tensions

- Rotation Controlatérale
 - Étirement longitudinal que si amplitude maximum
 - Associée à une contrainte en rotation axiale des parois artérielles (Sowchani *et al.*, 2006)
 - Contraintes max partie post. Foramen transversaire
- Rotation homolatérale
 - Étirement longitudinal possible
 - Compression au niveau de la gouttière de l'Art. Vertébrale majorée par la présence éventuelle de ponticuli
 - Associée à une contrainte en rotation axiale des parois artérielles

Notion de variation de l'Art. Vertébrale dans 6% des cas avec présence d'un segment sous-Atlantoïdien long par persistance d'un segment transversaire de l'artère (Cacciola, 2004; Hong et al., 2008) => Pas de mise en tension possible du segment mais risque de contraintes majorées en torsion axiale

Comportement mécanique non-linéaire de l'Art. Vertébrale=> Prédispositions aux lésions ? (Kaminsky et al., 2012)

Drainage Veineux



Drainage veineux encéphalique = enjeu de l'encéphalisation car nécessité d'une thermo-régulation efficace => Apparition précoce dès A. Robustus de cette adaptation à la Bipédie et à l'Homínisation (Kunz & Iliadis, 2007)

En Décubitus Dorsal = Drainage par V. Jugulaire Int.

En Position Assise ou Debout

= Plexus Intra- et Extra-rachidiens

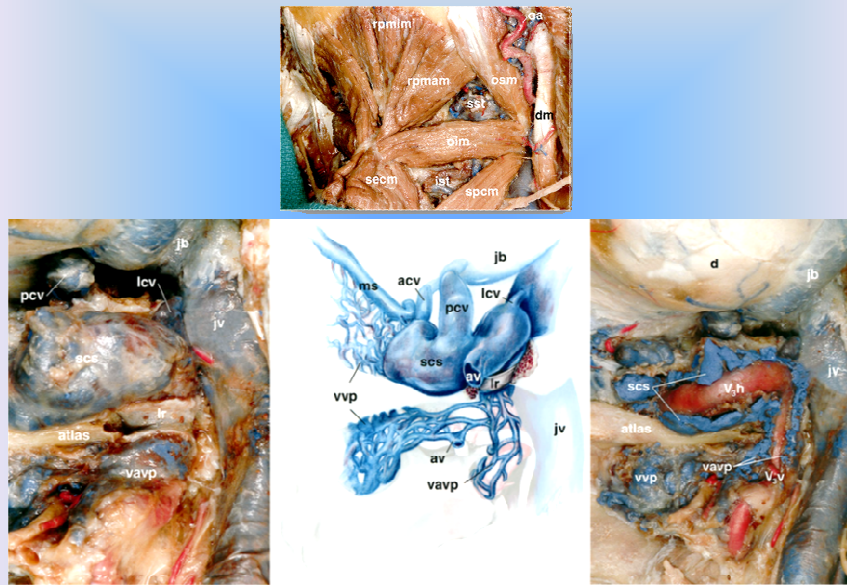
= V. Cervicales Profondes

= Plexus Veineux Ptérygoïdien

= Participation V. Jugulaire Ext. (Zouaoui & Hidden, 1987; Eckenhoff, 1970; Epstein, *et al.*, 1970; Valdueza, *et al.*, 2000; San Millan Ruiz, *et al.*, 2002; San Millan Ruiz, 2006; Niggemann, *et al.*, 2011; Gisolf, *et al.*, 2004)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Drainage Veineux



(Arnautović, et al., 1997)

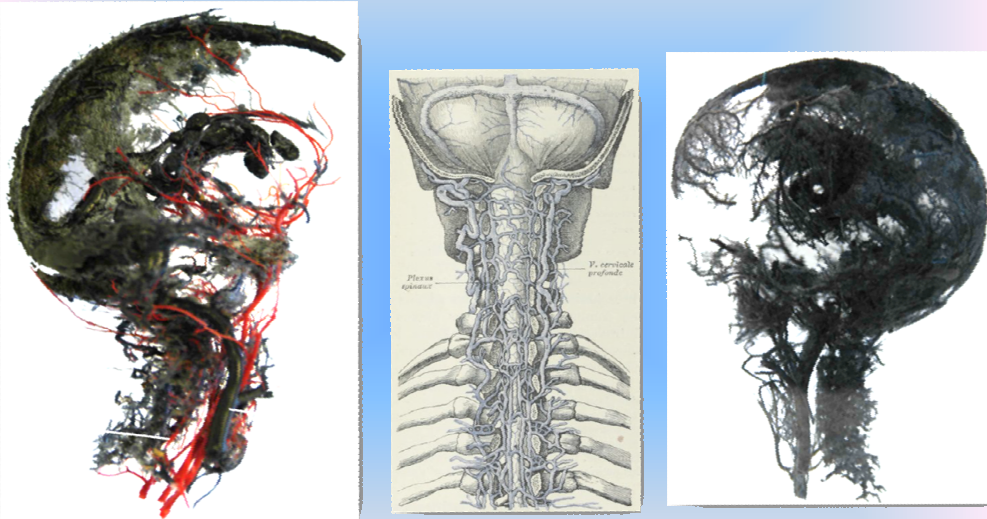
Outre la Thermo-régulation, les plexus veineux participent à la stabilisation Atlas/Axis par phénomène hydraulique (Reesink, et al., 2001)

Il y a suspension hydraulique du Crâne au dessus de R. Cervical (Reesink et al., 2001; Arnautovic et al., 1997)

- Réponse très rapide aux variations de pression des glomérules artério-veineux sous-occipitaux (Parke & Valsamis, 1967)
- Contraction des M. du Triangle de Tillaux, en particulier Oblique Inf. de la Tête provoque congestion (Arnautovic, et al., 1997)
- + notion de coordination proprioceptive entre art. zygapophysiales cervicales sup. d'un côté et relation Talo-naviculaire du côté opposé (Kavounoudias et al., 1999)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Drainage Veineux



Collection Musée d'Angers, spécimen n°8. In Magro, 2012

Breschet, 1819. In Gegenbaur, 1889

Photos de moulages résine in Magro, 2012 => Gainage hydraulique cervical

Notion connue depuis longtemps Breschet, 1819 et Walther 1885 (Recherche anatomique sur les veines du rachis) mais oubliée

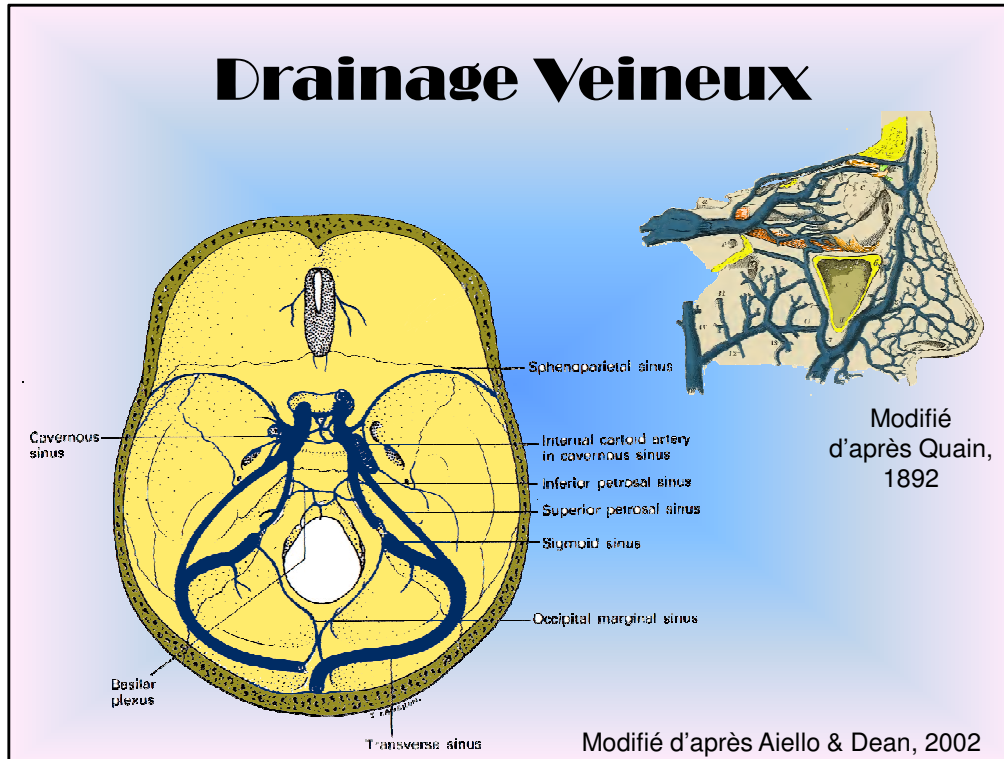
+ Noter la répartition postérieure du réseau artério-veineux contribuant à l'équilibre sagittal de la tête

+ Rôle très important du réseau veineux communiquant perforant le diploë Occiput et Temporal = thermo-régulation + coordination circulation LCR

Temps de réponse à une contrainte varie de 2,2 à 6 ms (fin de l'effet rebond) (Nelson & Cipton, 2010; Nightingale et al., 1996)

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Drainage Veineux



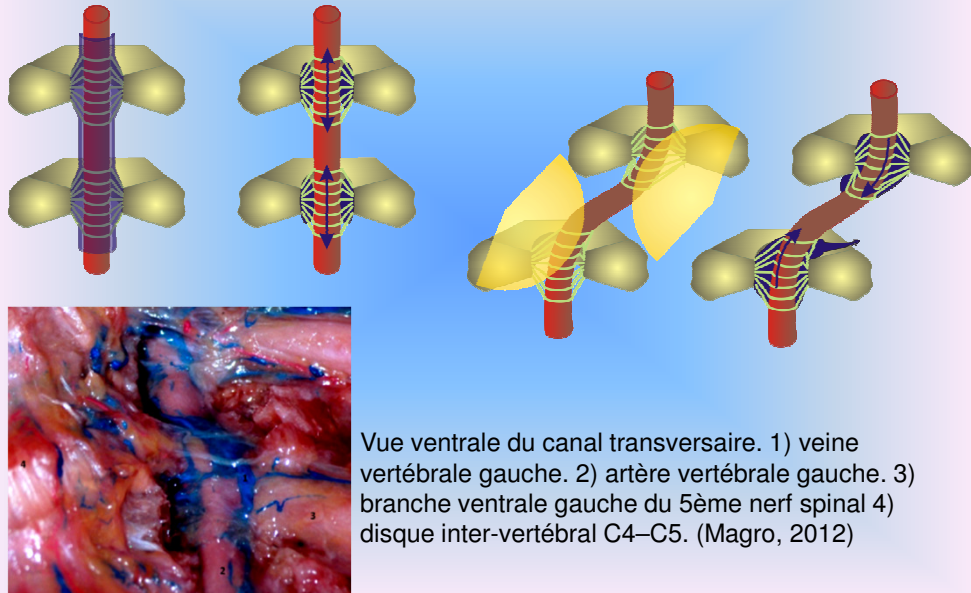
Drainage veineux devient Jugulaire Interne avec l'âge (Kopelman et al., 2013)

Rôle des veines intercostales dans la thermo-régulation du tissu nerveux encéphalique et intra-rachidien – Théorie du radiateur (Hoogland et al., 2012, 2013)

À noter : Congestion de la sphère ORL si défaut de drainage péri-rachidien => Voie d'accès ostéo +++

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Systeme Vertébral



Au niveau des foramens transversaires : pas de veines mais des sinus veineux

- Issus des M. Scalènes
- Plexus Intra- Rachidiens
- Plexus Extra-Rachidiens
- Troncs veineux inter-transversaires

Gaine périostée tapissant l'ensemble des foramens, en contact avec paroi artérielle par sa partie médiale – Nombreux tractus fibreux unissant parois artérielles et gaine périostée au niveau des foramens (Palombi et al., 2006; Magro, 2012)

Veines retrouvées à 24% bilat – 38% unilat – 29% Absentes au niveau inter-transversaire (Lu et al., 2000)

- Si absente = continuité de la gaine périostée entre 2 foramens transversaires

Lors de la rotation monosegmentaire, au niveau inférieur l'art. Vertébrale subi des contraintes antérieures au niveau du foramen et vient s'appuyer sur les plexus veineux (en particulier postérieurs) => expression veineuse qui forme un coussin amortisseur de contrainte pour la racine nerveuse dans les conditions normales mais qui peut devenir source de compression par congestion veineuse si maintenue dans le temps.

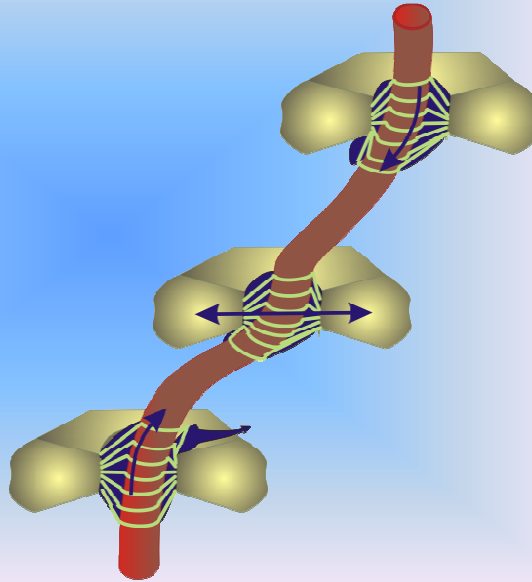
Au niveau supérieur, même phénomène mais l'art. vertébrale subie des contraintes postérieures

La conjonction des 2 contraintes => contrainte spiroïde en étirement compatible avec le trajet le plus fréquent des disques à ce niveau.

Systeme Vertébral



Van der Kuip *et al.*, 1999



Art. Vertébrale = parois riches et denses en fibres collagéniques et élastiques à proximité
Art. Sous-clavière et Réseau méningé (Johnson *et al.*, 2001)

Ruptures du réseau élastique (Trajet extra-crânien +++)

- Non-significatives dès 9 mois
- Constantes dès 4 ans
- Significatives dès 20 ans
- Communes, étendues et importantes après 40 ans

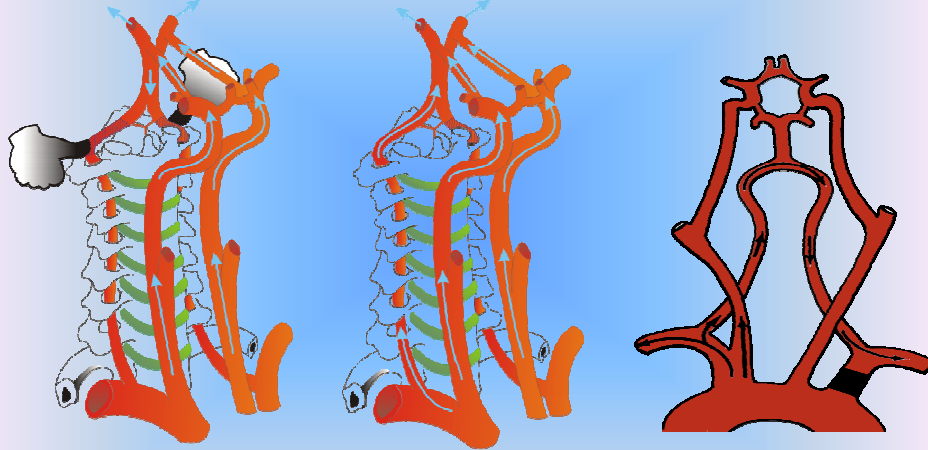
Atteinte réseau collagénique

- Dès 17 ans
- Augmentation en taille et en nombre avec l'âge
- Dissection artérielle possible dès 35 ans
- Risque dissection +++ après 60 ans (Johnson *et al.*, 2001)

Rappel : Sténoses plus fréquentes segment V1; dissections plus fréquentes segment V3

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Systeme Vertébral



Il est classique de vouloir pratiquer des tests cliniques d'évaluation du débit sanguin au niveau des art. vertébrales avant toute normalisation cervicale. Ces tests font même partie des « bonnes pratiques de l'art ».

Toutefois, qu'il s'agisse d'un test de compression bilatérale au pouces (Test de Tillaux) ou unilatéral (par mise en Ext+ Rot max du rachis sous-occipital), ces tests n'ont qu'un intérêt clinique limité et renseignent peu sur l'état réel du réseau artériel Vertébral en raison du grand nombre de compensations possible jusqu'à un stade avancé.

Le test de Tillaux renseigne davantage sur la fonctionnalité du Polygone de Willis que sur l'artère vertébrale elle-même.

Le test de compression unilatéral renseigne sur l'état fonctionnel et compensatoire de l'artère vertébrale côté opposé à la compression mais reste sujet à caution puisque la compensation peut s'effectuer également au niveau du Polygone de Willis

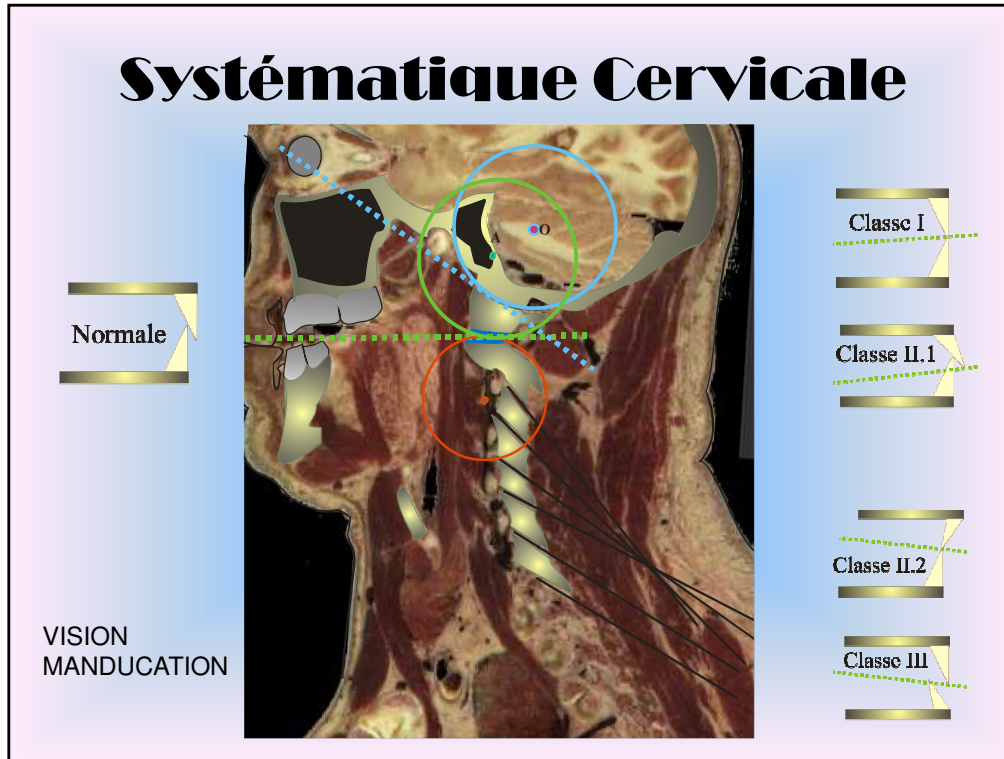
Un test négatif ne signifie pas absence de lésion mais compensation efficace
Un test positif nécessite impérativement des investigations complémentaires

Association de signes cliniques précédant un AVC d'une quinzaine de jours :

- Torticoli aigü
- Vertige ou sensation vertigineuse
- Étourdissement
- Nausées
- Diplopie
- Paresthésies du M. Sup.

- Paresthésie Faciale Unilatérale
- Les ischémies du Tronc Basilaire = 20-25% des AVC

Systematique Cervicale



Coupe sagittale oblique passant par atlanto-occipitale G en arriere et Œil Drt en avant

La convexité des condyles occipitaux est incluse dans un cercle de centre O situe en regard du 4^{ème} Ventricule.

La convexité des surfaces articulaires inférieures de l'Atlas est incluse dans un cercle de centre A situé en regard de la S.S.B.

La droite tangente au cercle O passant par l'interligne atlanto-occipital se projette en avant au niveau de l'œil Drt, plus particulièrement au niveau de la Fovea

La droite tangente au cercle A passant par l'interligne Atlanto-Axoïdien se projette en avant au niveau du sommet de l'espace inter-incisif.

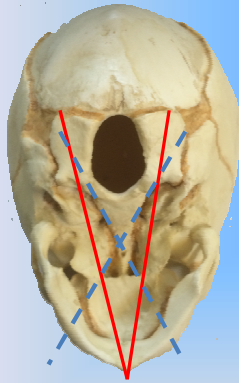
Ces droites impliquent une notion de coordination mécanique et fonctionnelle entres les différents éléments.

Concernant la droite passant par interligne Atlanto-Axoïdien : les dents suivent la direction de l'axe.

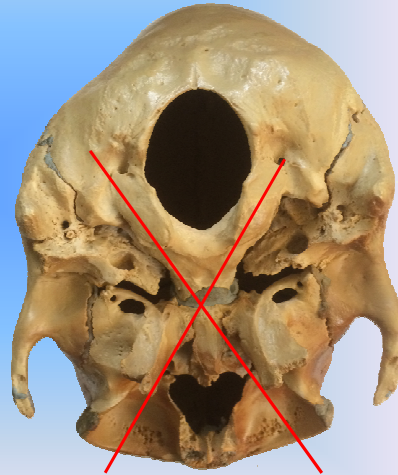
- Si axe monte : Dents en avant, Classe I; Classe II.1
- Si axe descend : Dents en arriere, Classe II.2, Classe III
- Classe II.1 associée posture antérieure Tronc+ Cervicales
- Classe III associée posture rétropulsion Tronc+ Cervicales

Systematique Cervicale

OLFACTION
SUCCION
VISION



OLFACTION
VISION



Evolution ontologique du crâne

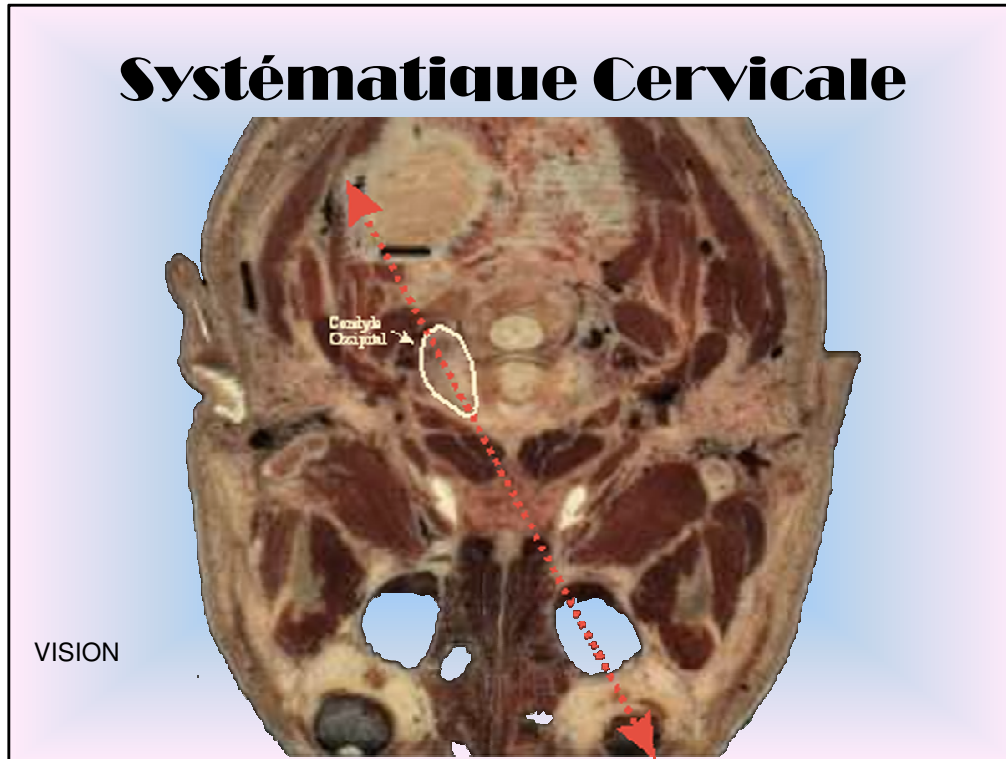
À la naissance, condyles occipitaux orientés en direction de la symphyse mandibulaire => meilleure absorption des contraintes lors de la succion + valorisation de l'olfaction au détriment de la vision – difficulté accommodation car les orbites ne sont pas situés sur le même axe.

À l'âge adulte, valorisation de la vision stéréoscopique, les condyles étant orientés sur le même axe que les orbites, le nerf optique et les vaisseaux oculaires => possibilités de perturbations fonctionnelles d'accommodation, de convergence et de nutrition (équilibre artério-veino-lymphatique de l'œil) en cas de désorganisation du couplage condyles occipitaux-orbite

À noter :

- Le croisement en regard de la S.S.B.
- Indépendance entre forme (ici crânioplagie occipitale G) et fonction : la forme des plaques osseuses intermédiaires des sutures et des axes fonctionnels n'a aucune importance (hormis esthétique) tant que les différents axes sont coordonnés entre eux.
- La valorisation de l'olfaction dès la naissance témoigne d'une perception archaïque dont l'organisation est antérieure à l'évolution des Homininés
- Le Trou Déchiré Antérieur (Foramen Lacerum) est une zone à faible contrainte mécanique (car très proche zone croisement des axes fonctionnels du Crâne)

Systematique Cervicale



Coupe Transversale oblique passant par l'interligne Atlanto-Occipital Droit

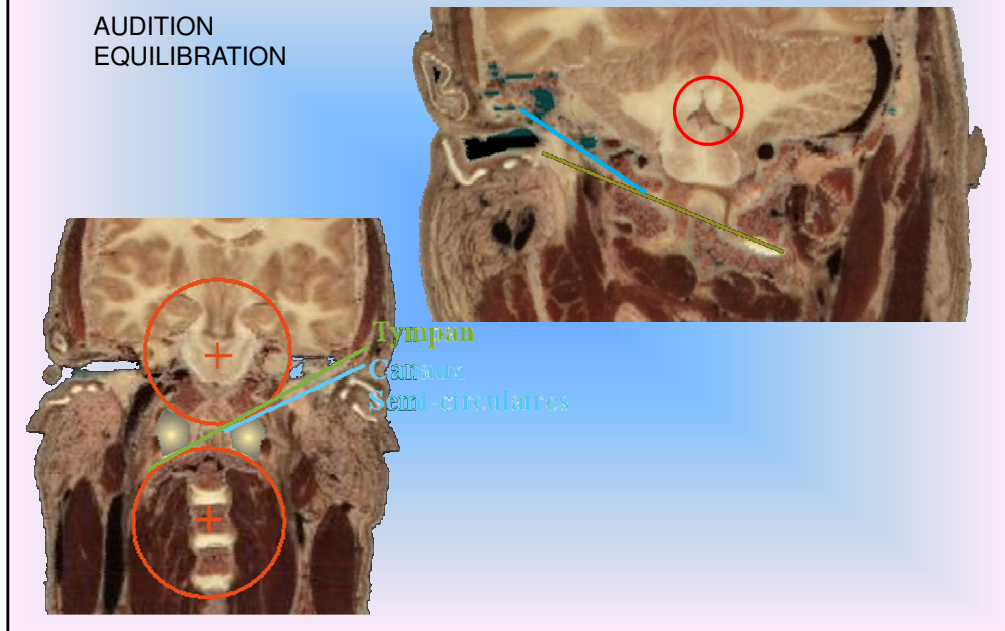
Le grand axe du condyle occipital se projette en avant au niveau de la Fovea (point de pénétration de l'Art. Ophtalmique et du Nerf Ophtalmique du côté opposé)

Dysfonction = pb accommodation, strabisme, glaucome, décollement et/ou oedème rétinien, DMLA précoce, etc...

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Systematique Cervicale

AUDITION
EQUILIBRATION



Coupe frontale passant par le milieu de la relation Atlanto-Occipitale

Les surfaces Occipito-atlantoïdiennes s'inscrivent à la surface d'un cercle centré sur le 4^{ème} Ventricule (+/- Trou de Magendie)

L'axe de l'interligne de la relation Atlanto-Occipitale se projette au centre des Canaux Semi-circulaires du même côté + trajet circulation endolymph

⇒ Coordination avec équilibration

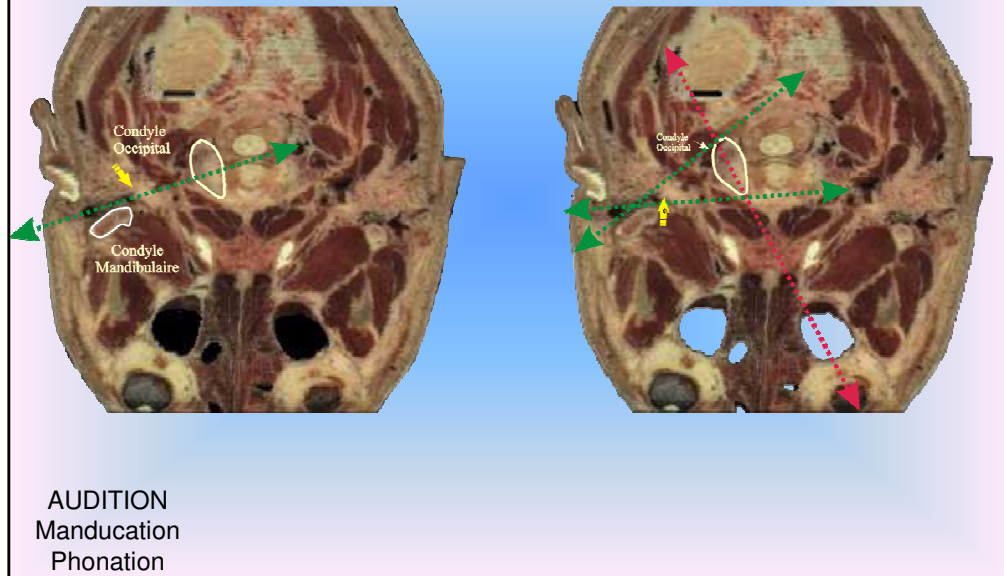
L'axe de l'interligne de la relation Atlanto-Axoïdienne se projette au niveau de la Membrane Tympanique du côté opposé

⇒ Coordination avec audition

Participe au Réflexe Oculo-Céphalogyre

Participe reflexe de Survie par mise en stimulation subliminaire du X

Systematique Cervicale



Coupe Transversale oblique passant par l'interligne Atlanto-Occipital Droit

L'axe du C.A.E. est perpendiculaire à l'axe du Condyle Occipital, et coupe la surface condylienne en deux au niveau de la séparation parfois retrouvé

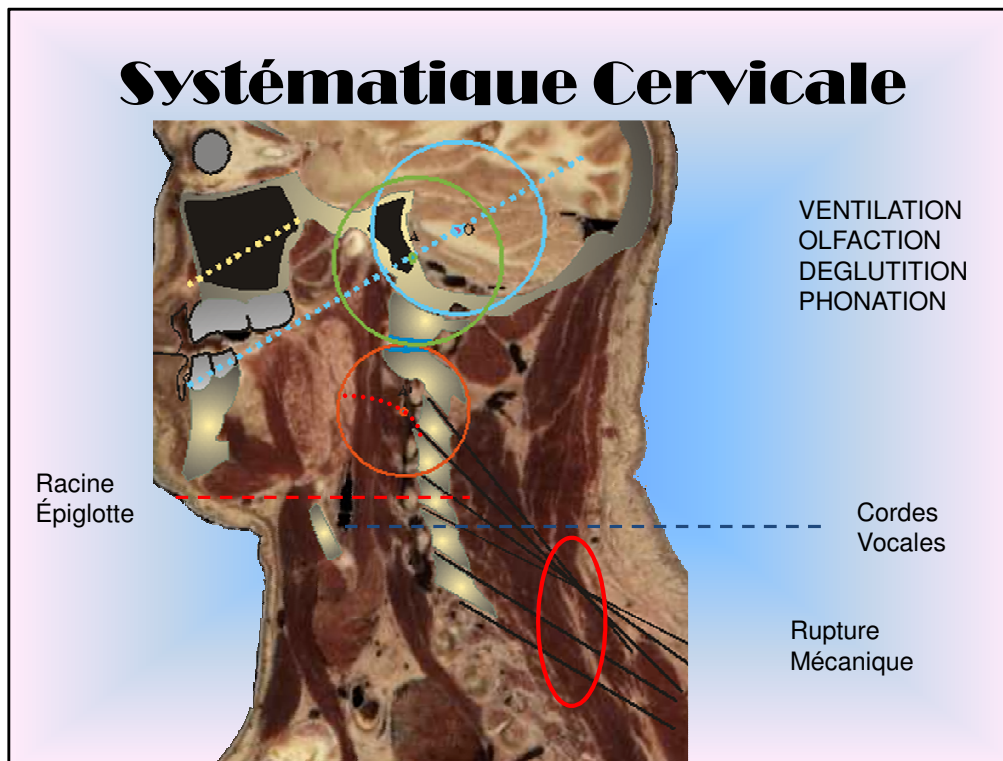
La Membrane tympanique est presque parallèle au Condyle

La surface condylienne et la membrane tympanique s'inscrivent dans l'angle formé par les droites décrivant les bords antérieur et postérieur du C.A.E., le croisement de ces droites se situant au niveau de l'inflexion du conduit

Noter la disposition du condyle mandibulaire qui permet de réduire l'influence de la manducation sur l'audition

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Systematique Cervicale



Pour la définition des cercles O et A, cf. diapo précédente

Droite AO se projette espace sus-lingual => Phonation

Axes Cornets parallèles droite AO => Ventilation – Olfaction

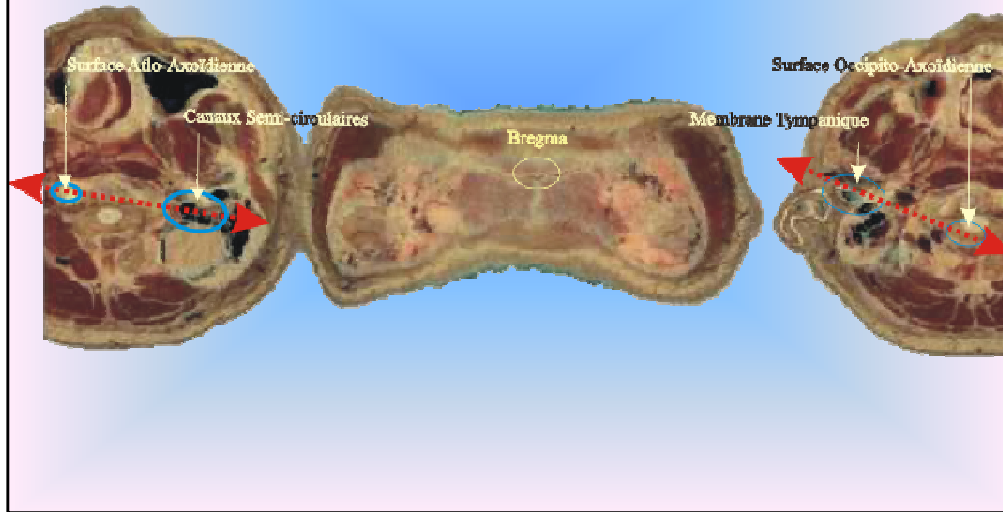
Si perturbation axe, impossibilité d'expulser les sécrétions = sécrétions dégluties – difficulté pour se moucher des enfants car système encore immature qui va évoluer avec la croissance

Racine Épiglotte se projette bord ant C5; l'Épiglotte suit une course selon un arc de cercle qui passe par le centre du cercle définissant les surfaces articulaires sup. de l'Axis

La rupture mécanique objectivée par les modifications d'orientation les interlignes articulaires cervicaux correspond à une adaptation sensorielle du rachis cervical jusqu'en C5, et d'une adaptation posturale à partir de C6.

Influence de la phonation et de la déglutition +++ dans le phénomène d'adaptation

Systematique Cervicale



Extraction de surface sur Visible Human Server passant par Occipito_Atlantoïdienne d'une côté, Atlanto-Axoïdienne de l'autre

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Systematique Cervicale

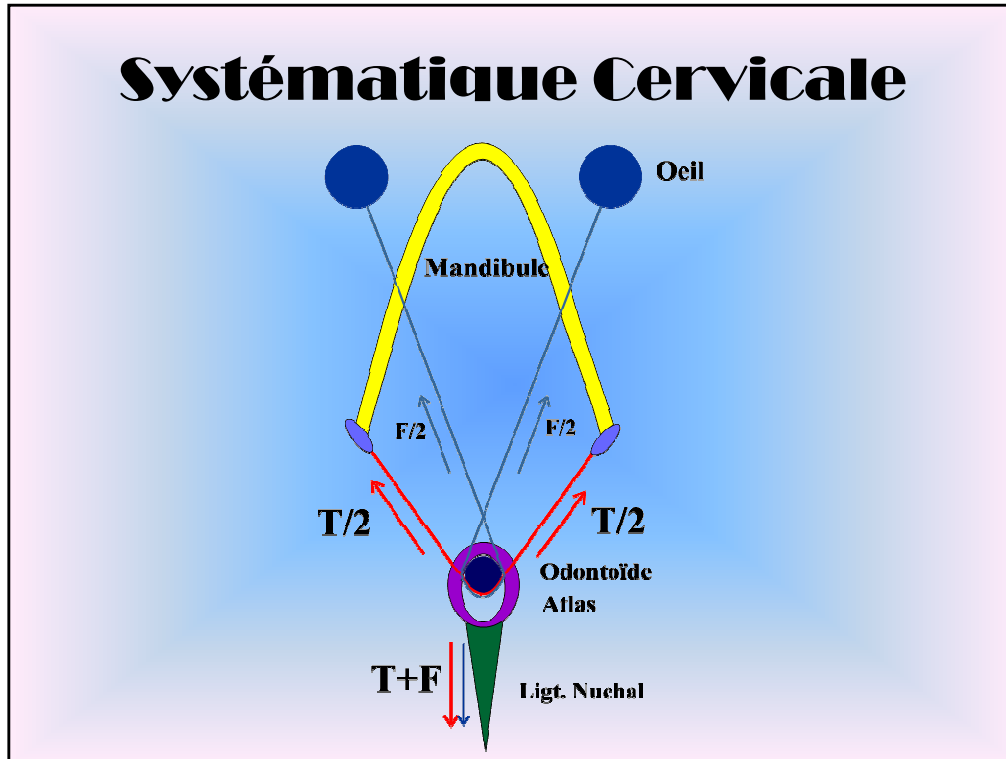
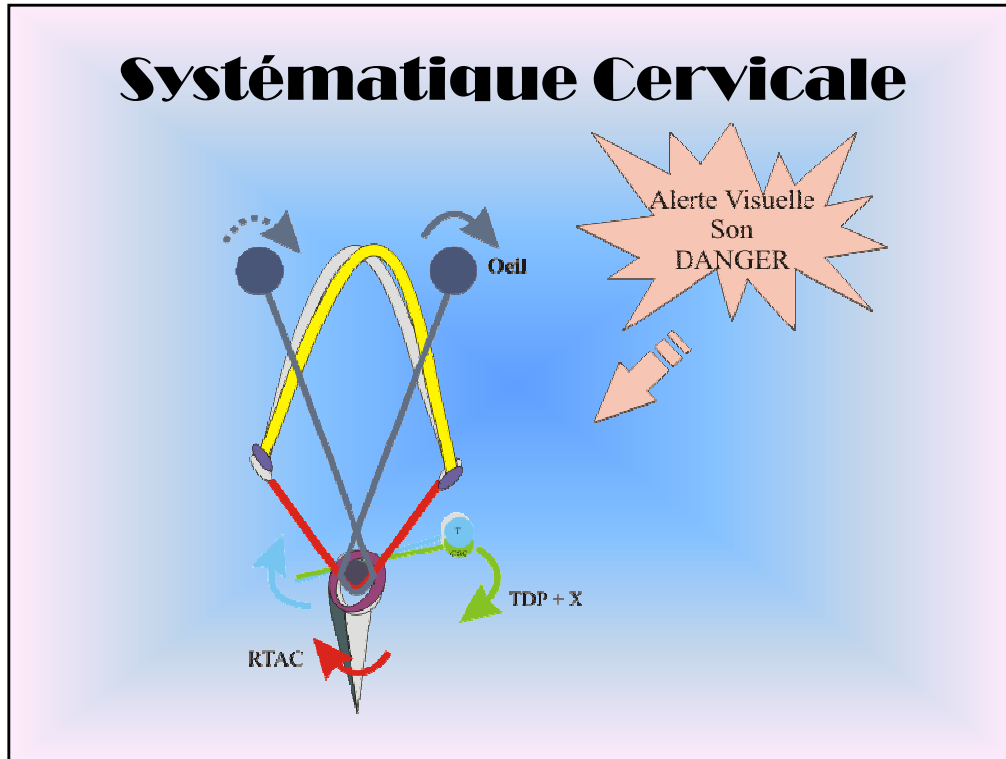


Schéma synthétisant les contraintes s'exerçant au niveau O.A.A.
L'orientation des condyles mandibulaires est telle que les contraintes issues de l'appareil mandicature viennent se projeter en arrière de l'Odontoïde qui joue le rôle de pivot et de poulie de renvoi.
Ce pivot est contrôlé par l'anneau formé par l'Atlas, lui-même sous contrôle du Lig. Nuchal

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Systematique Cervicale

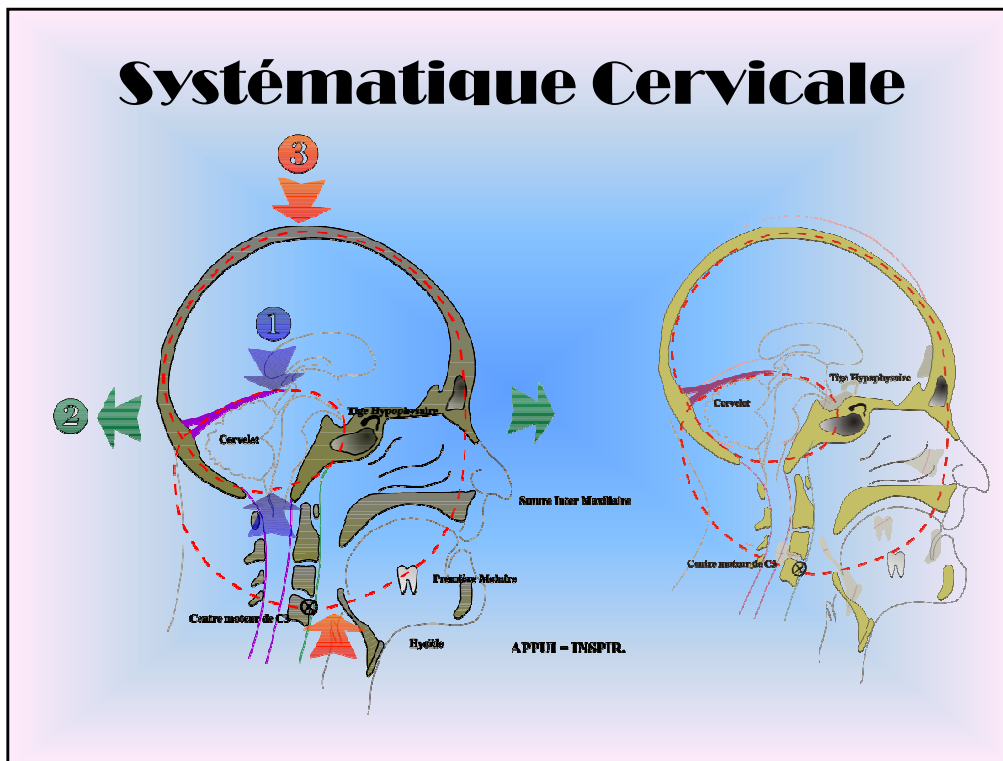


Construction schéma oculo-céphalogyrie à partir d'un réflexe de survie => Mise en jeu de la totalité des axes fonctionnels décrits précédemment + Stimulation du X automatique => réponse globale sur l'ensemble du corps avec répercussions viscérales.

La perception d'un son ou d'une alerte visuelle induit la rotation des yeux et de la tête vers le signal. Dans le même temps, la mise en jeu mécanique de l'ensemble O.A.A. provoque une stimulation du X (avec augmentation ventilation, vascularisation musculaire, vidange viscérale) et une décharge des R.T.A.C. (mise en appui du corps côté opposé à la stimulation) facilitant la fuite si celle-ci est nécessaire) = réaction de survie +++

DOCUMENT EN LECTURE SEULE

Systematique Cervicale



Dès 1966, Delattre et Fenart définissent la voûte crânienne en fonction d'une spiroïde (in « Tentative de définition du genre Homo [Le crâne humain] », Bulletin et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris, XI-9(4): 377-92, 1966).

Cette spiroïde peut être complétée par l'utilisation d'une conchoïde qui passe alors par les points remarquables suivants:

- Suture inter-maxillaire – définition de l'os pré-maxillaire
- 1^{ère} prémolaire = 1^{ère} dent définitive apparaissant vers l'âge de 6 ans
- Jonction entre Petite et Grande Corne de l'os Hyoïde – notion Arc Branchial différent
- Centre Moteur de C3
- Fulcrum de Sutherland – Insertion Tente du Cervelet
- Ligne séparation entre Anté- et Post-Hypophyse – Notion de fonctionnement différencié entre les deux zones.

Disposition se comportant comme un système amortisseur de contraintes avec lors de l'Appui :

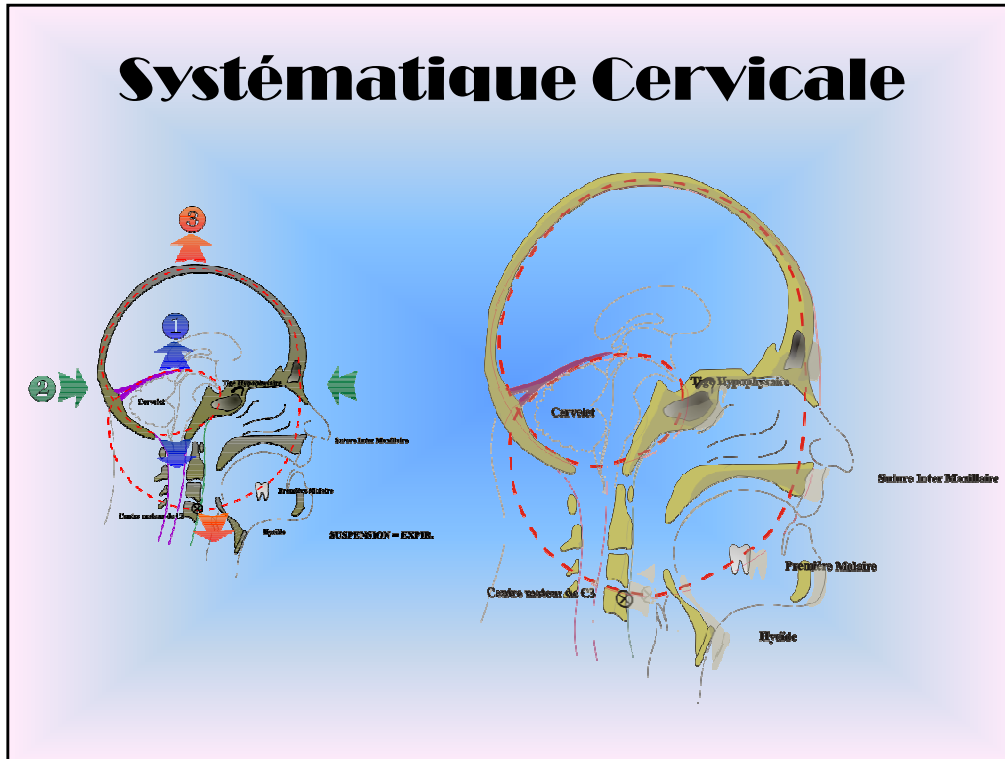
- Compression étage sous-tentorial = stimulation sous-liminaire cérébelleuse facilitant la gestion de la posture côté appui
- Compression étage sus-tentorial = stimulation sous-liminaire corticale facilitant la coordination musculaire et la dynamique du côté corporel en mouvement
- Élargissement antéro-postérieur de la sphère céphalique
- Diminution céphalo-caudale de la sphère céphalique

Lors de la marche, le crâne étant en appui sur un rachis cervical relativement stable, les phénomènes décrits ci-dessus viennent s'exprimer surtout à la partie antérieure. La face « glisse » vers l'avant et le bas = absorption des contraintes.

À noter :

- ❖ la jonction anté- et post-hypophyse reste en regard de la ligne de gravité du corps qui sépare les 2 lobes de l'hypophyse
 - ⇒ Une perte de coordination à ce niveau entraîne des répercussions hormonales +++ allant de l'obésité morbide au défaut de croissance
- ❖ Rôle proprioceptif de la 1^{ère} prémolaire lors de la gestion de la prise de masse liée à la croissance (meilleure définition posturale +++)
 - ⇒ Si sur-utilisation = pbs dentaires postérieurs à répétition au niveau des molaires, nombreuses couronnes ou implants, nombreux pb de couronnes cassées ou déchaussées
 - ⇒ Pb de Bruxisme, de SADAM, ...
- ❖ Les décussations neurologiques répondent à un système hautement élaboré de gestion dynamique et posturale du corps lors d'un mode de locomotion impliquant moins de trois appuis simultanés au sol (= devoir gérer un déséquilibre lors d'au moins un temps de la marche)

Systematique Cervicale



Lors de la phase suspensive de la Marche, la conchoïde participe à la restitution de l'énergie absorbée.

On assiste donc aux phénomènes inverse de ceux décrits précédemment.

COPIE NON AUTORISÉE

DOCUMENT EN LECTURE SEULE



FIN

COPIE NON AUTORISÉE

ST
DOCUMENT EN LECTURE SEULE