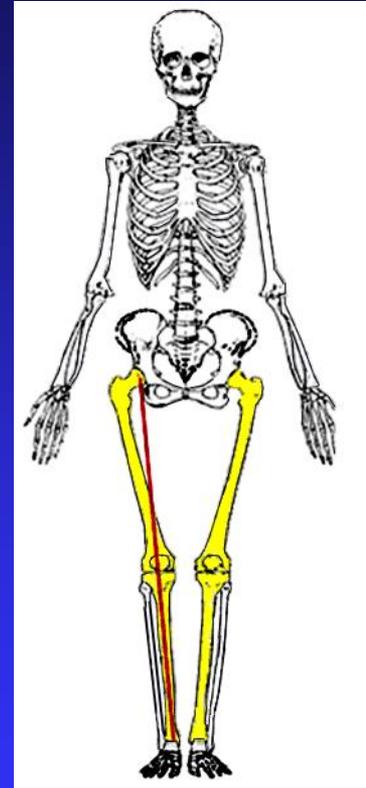
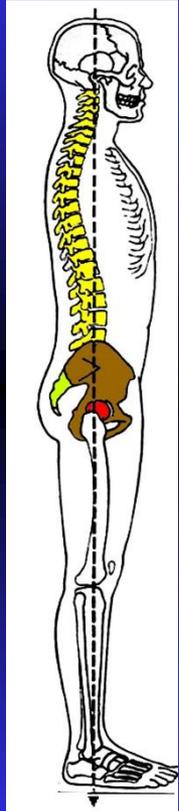




L' ADAPTATION A

LA BIPEDIE

QUELLES CONSEQUENCES SUR L'ANATOMIE ?



Christine TARDIEU

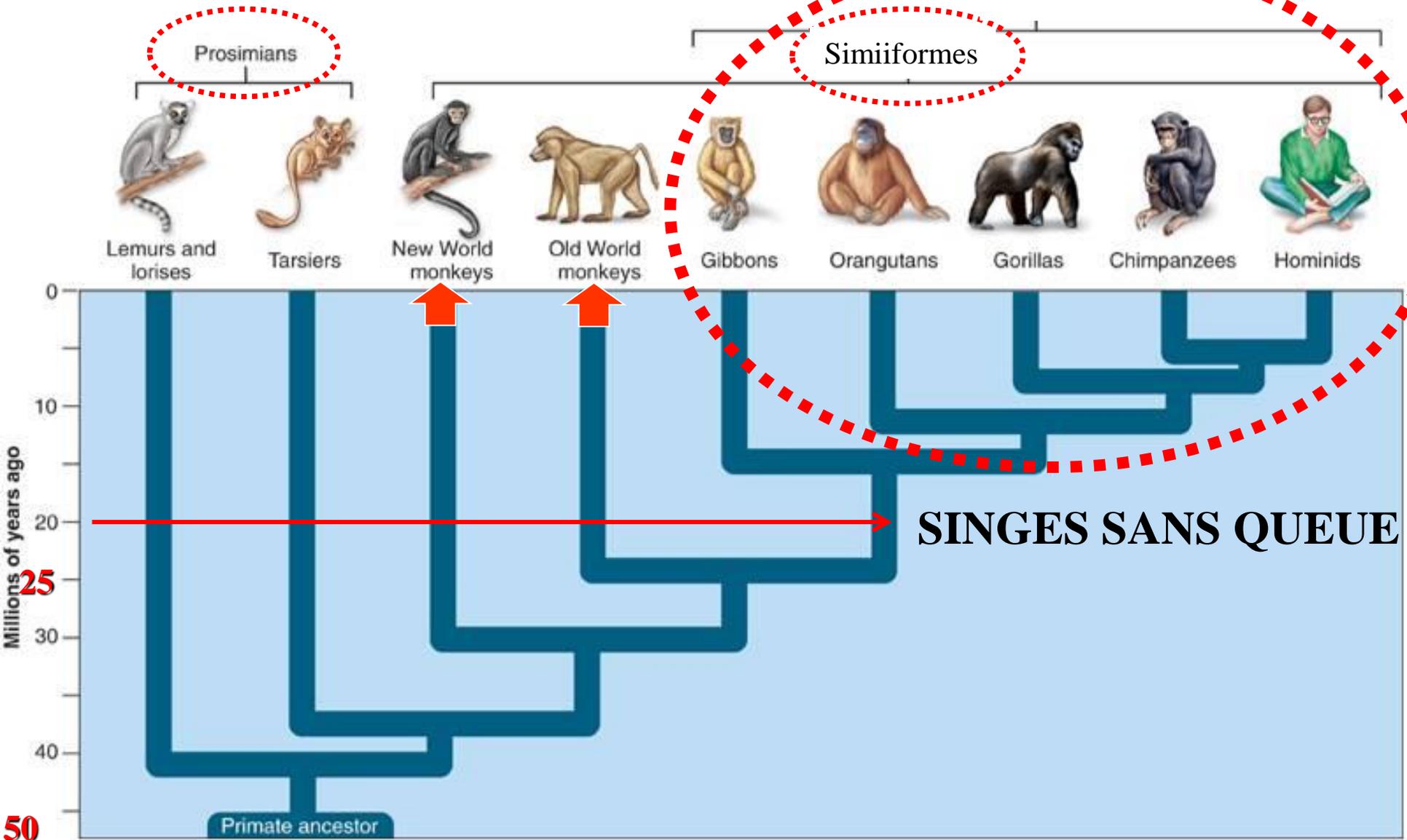
Directeur de recherche CNRS , émérite

UMR 7179

« MÉCANISMES ADAPTATIFS ET EVOLUTION »

Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris

L'ORDRE DES PRIMATES



Millions d'années



GRANDS SINGES

Gibbon

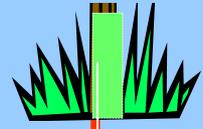
Orang-outan

Gorille

Chimpanzé

Bonobo

Homme



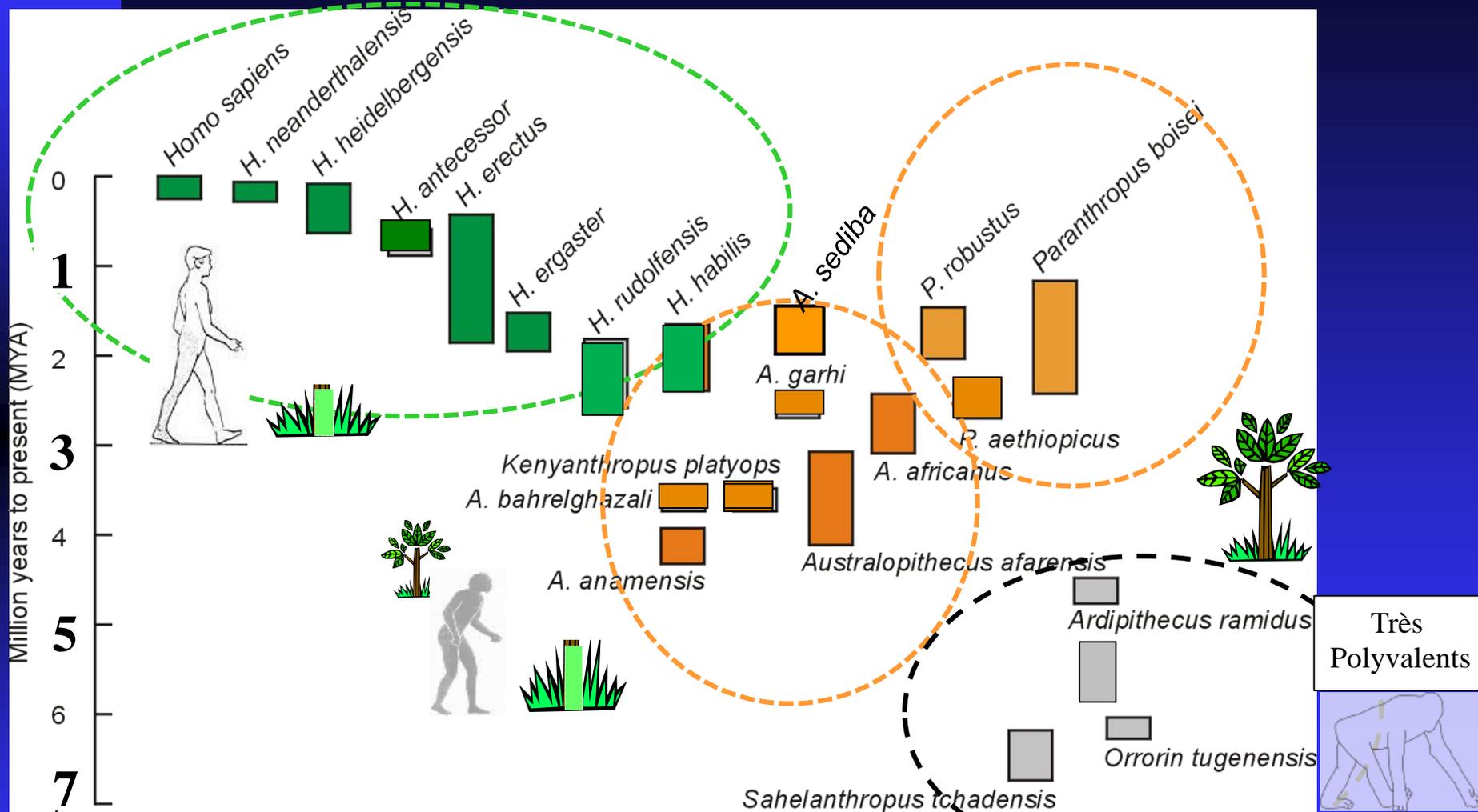
- Primates non humains :
 Répertoire locomoteur varié,
Polyvalence
 - Homme
 Bipédie exclusive : **Spécialisation**

7-6 MYA

=> **Polyvalence** chez nos premiers ancêtres
Hominoïdes



Quelle locomotion ? Quel % de marche bipède au sol ?



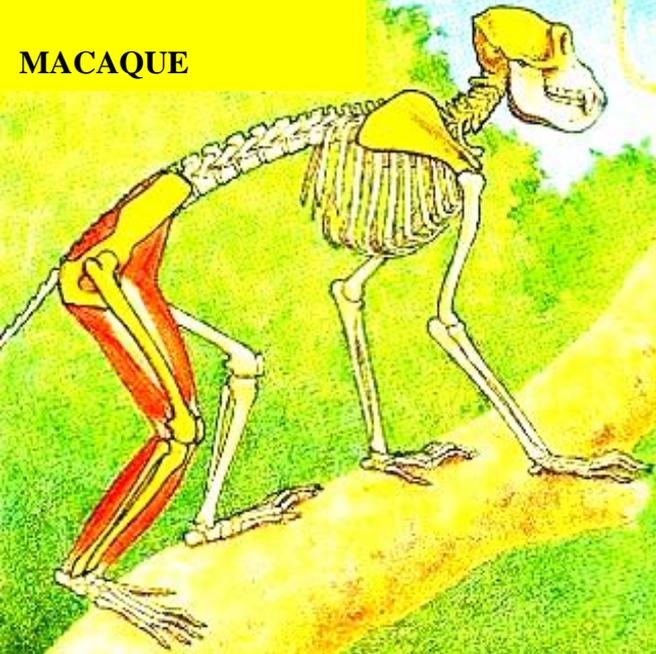
→ la bipédie, 1^{er} changement qui a permis de reconnaître les australopithèques comme nos ancêtres !

(C. d'Arôt,
P. Aerts)

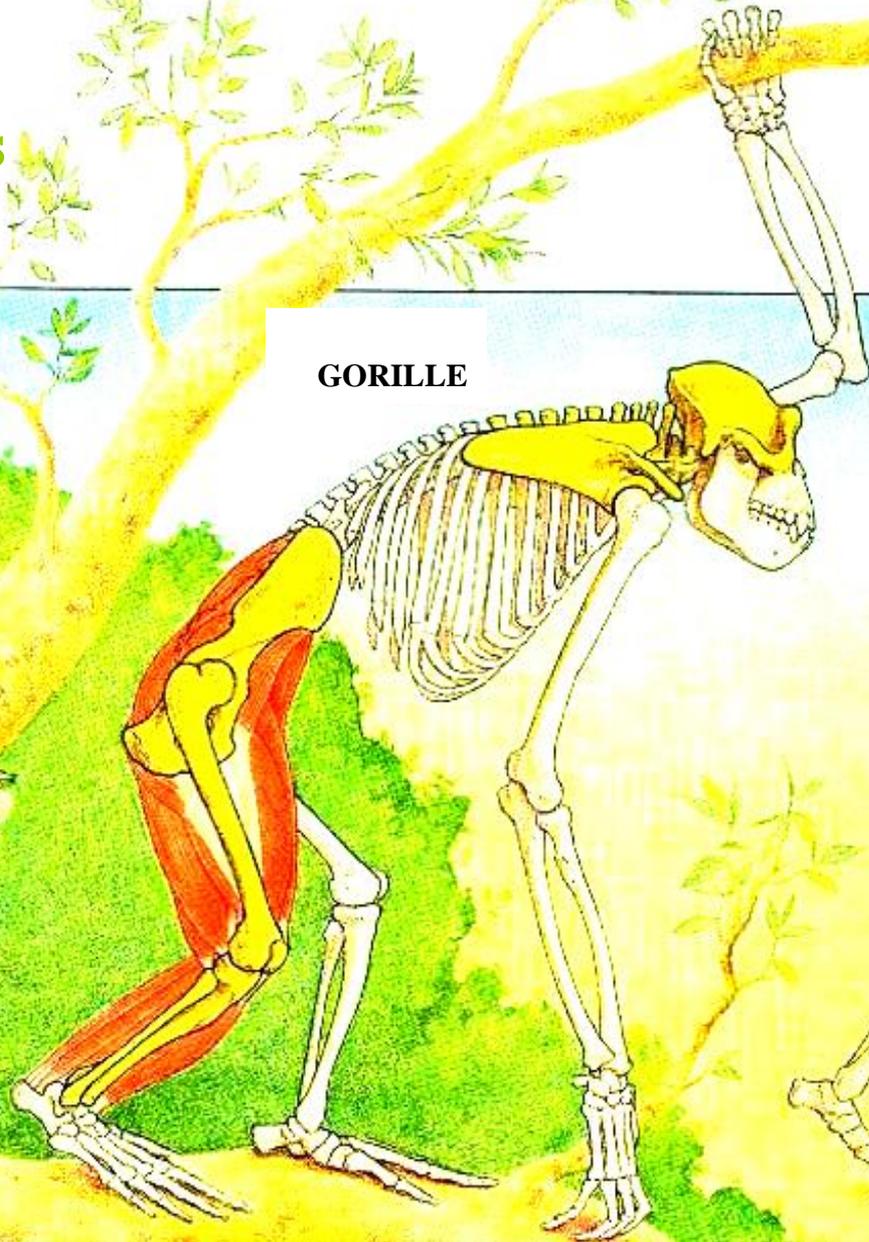
PRIMATES

Sont des arboricoles

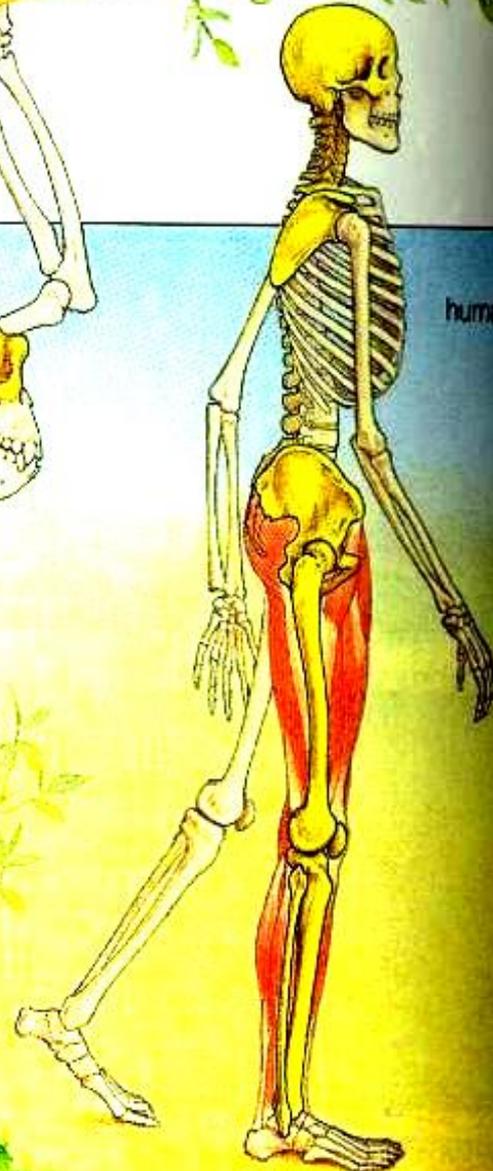
MACAQUE



GORILLE



human



L'ADAPTATION A LA BIPEDIE

1

L'ŒUVRE
D'HIER



LA PART DE L'HERITAGE

2

L'ŒUVRE
D'AUJOURD'HUI



LE ROLE DE L'APPRENTISSAGE

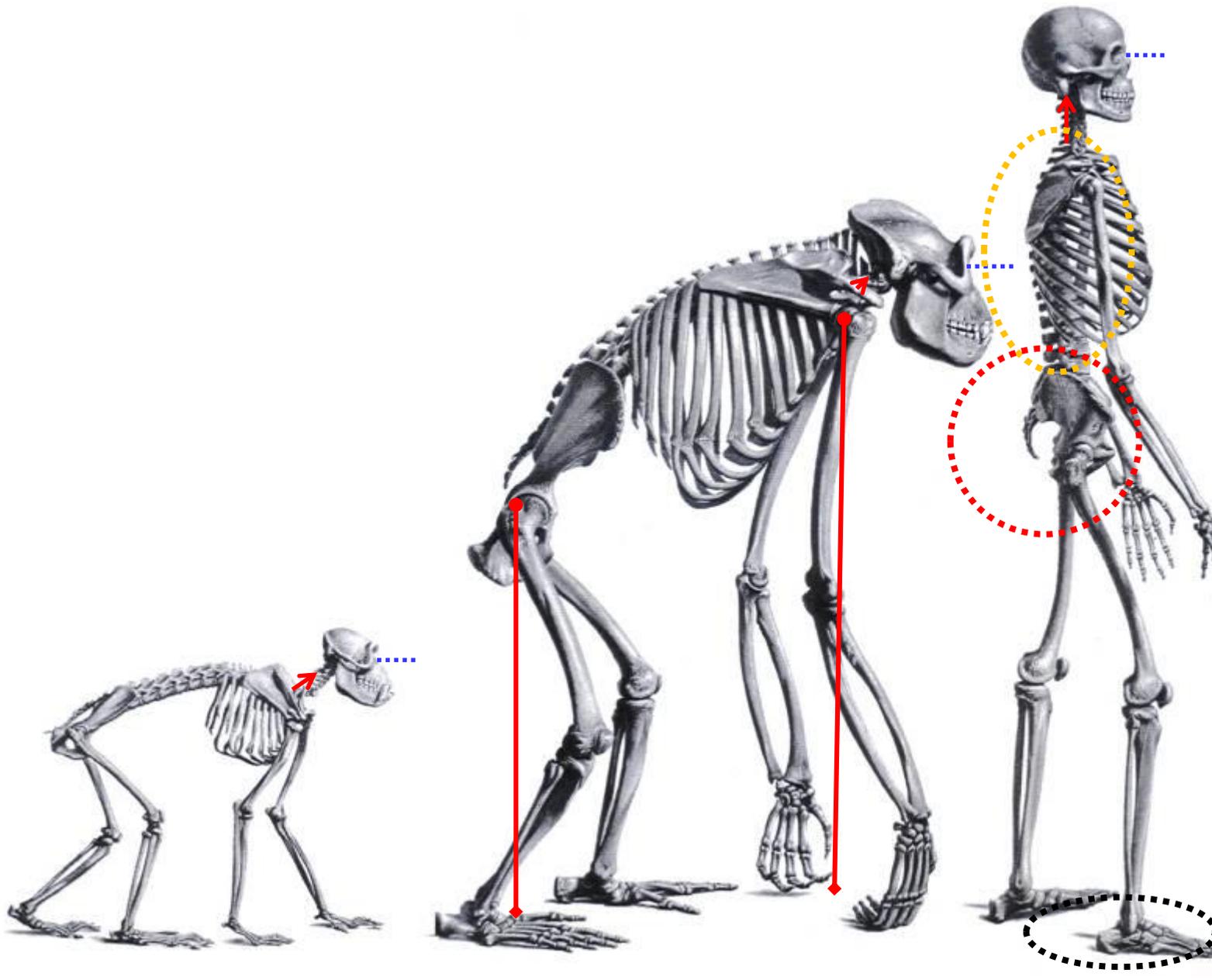
L'ADAPTATION A LA BIPEDIE

1

L'HERITAGE DE LA SELECTION NATURELLE ?



4 MODIFICATIONS ESSENTIELLES



I Port de la tête

II Bassin et colonne

IV % corporelles

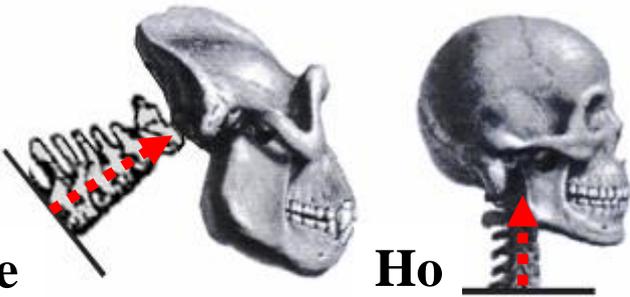
III Pied

MACAQUE

GORILLE

HOMME

I



gorille

Ho

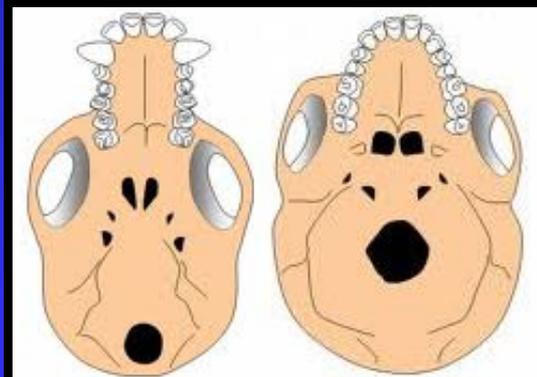
Attache du crâne
sur
la colonne vertébrale

Port de la tête

Articulation cranio-vertébrale
en position antérieure
sous le crâne

=> Crâne en équilibre
sur
la colonne cervicale

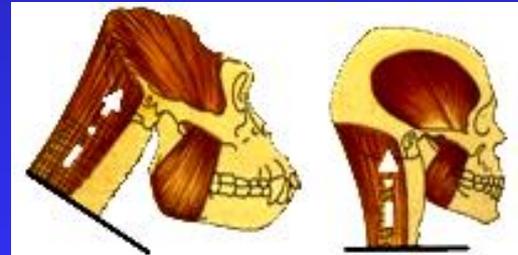
Postérieur Antérieur



Go

Ho

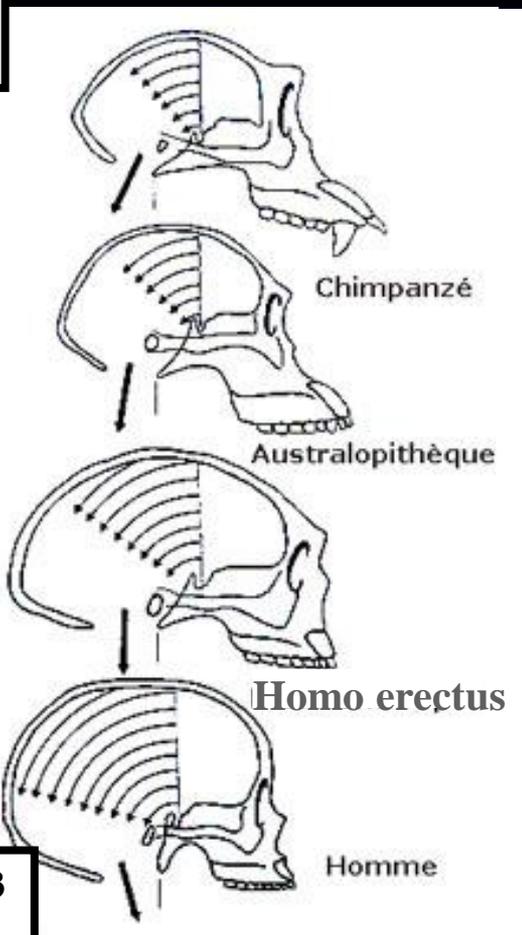
Trou occipital



gorille

homme

400 cm³



1400 cm³



Australop. H. erectus

	Chimpanzé	Homme
stade foetal		
stade adulte		



Migration postérieure du trou occipital

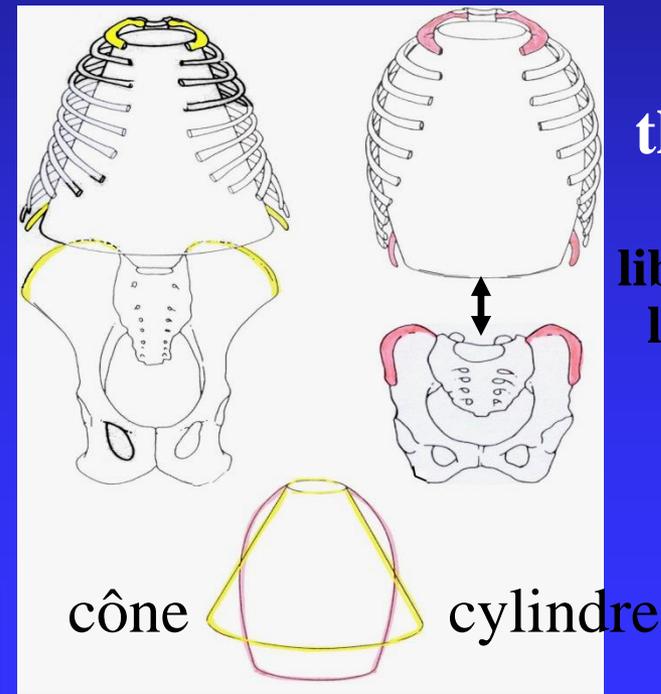
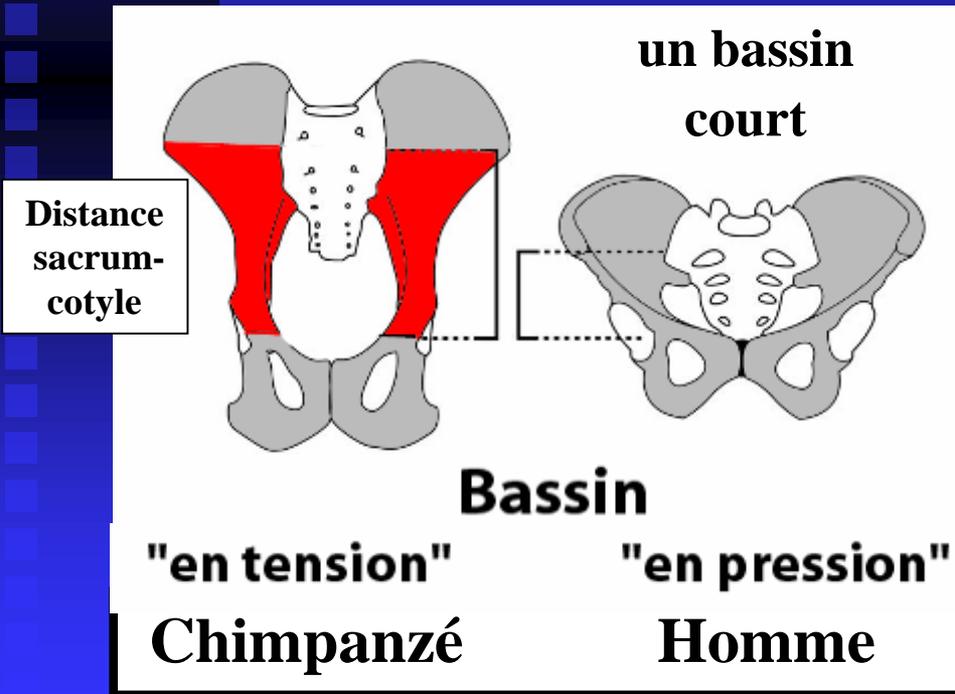
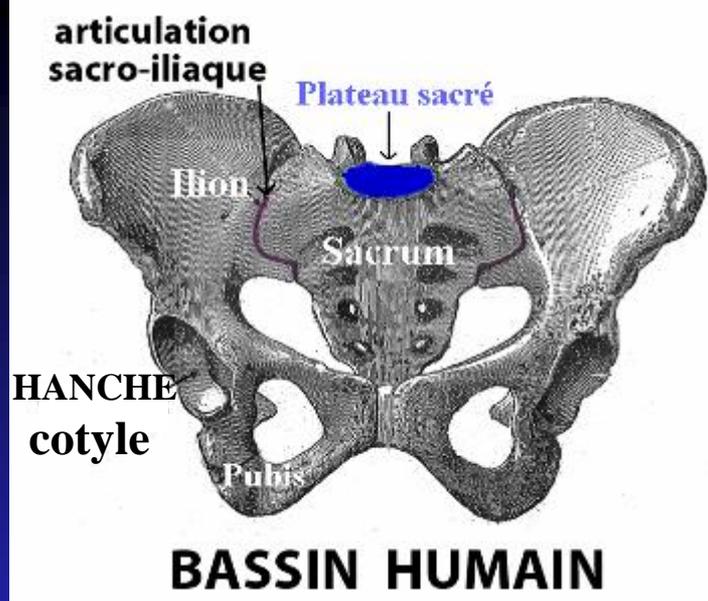


Conservation du caractère foetal

II

BASSIN ET COLONNE

VUE FRONTALE



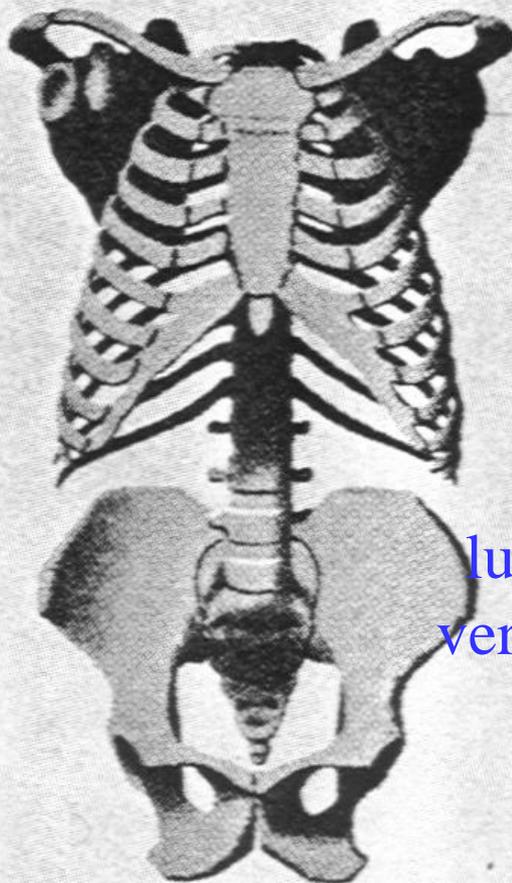
COLONNE LOMBAIRE



7

lumbar
vertebrae

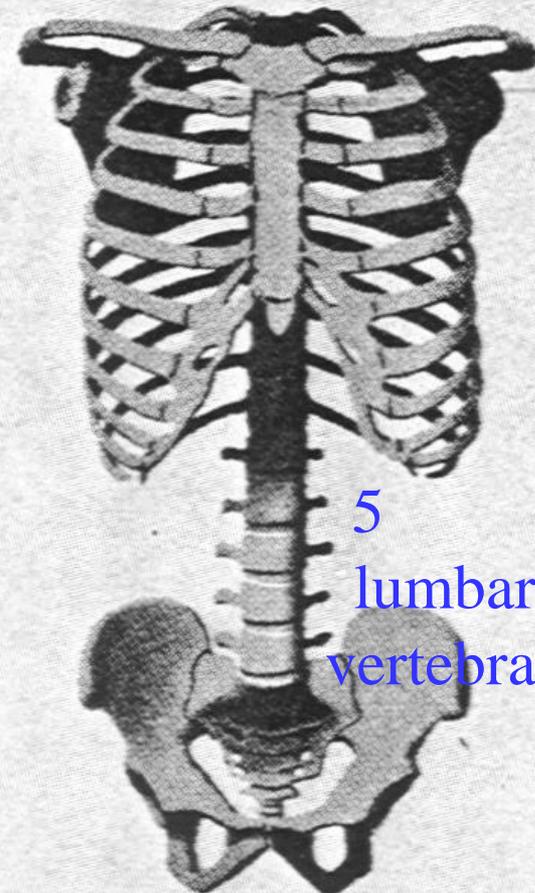
MACAQUE



3-4

lumbar
vertebrae

GORILLE



5

lumbar
vertebrae

HOMME

très grande mobilité

Grds mvts flexion
extension dans grimper,
quadrupédie, course

→ Mobilité minimale

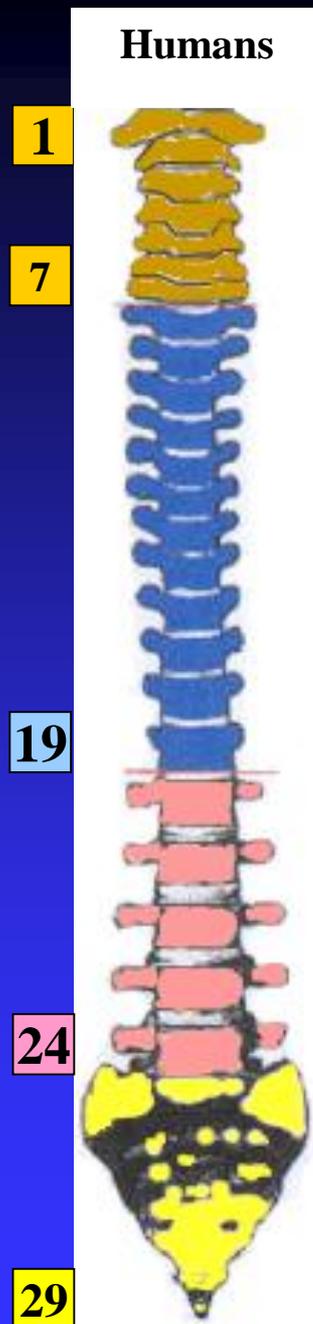
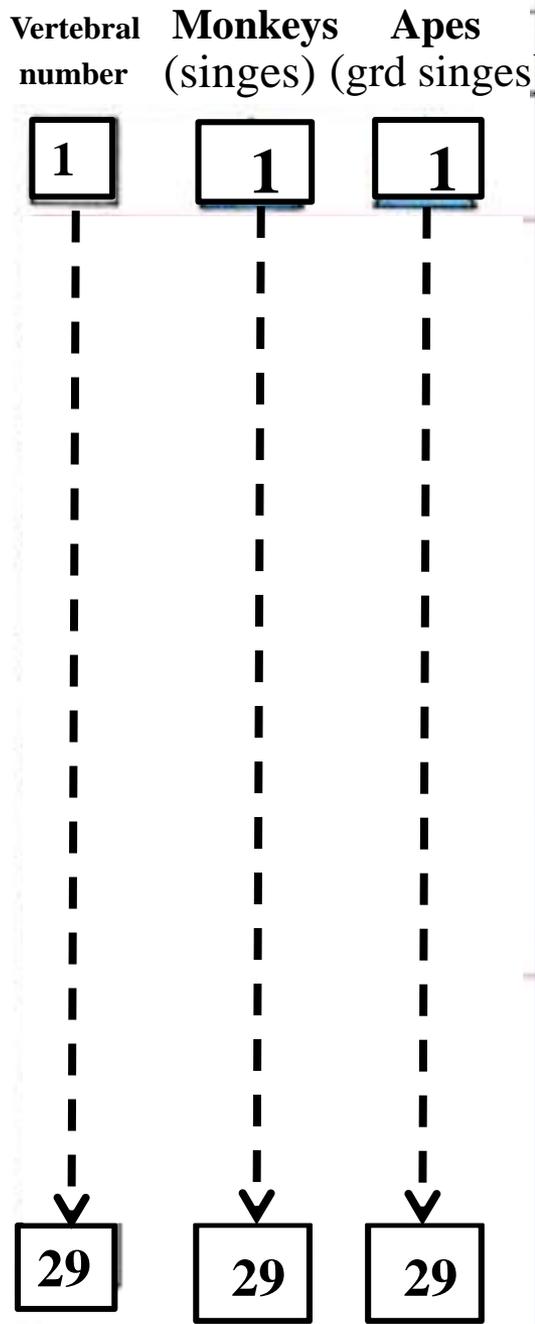
Tronc rigide adapté à
locomotion suspendue

→ grande mobilité

Capacité de lordose pr
bipédie

Une certaine
stabilité du
nombre des
vertèbres
précaudales
in primates

29

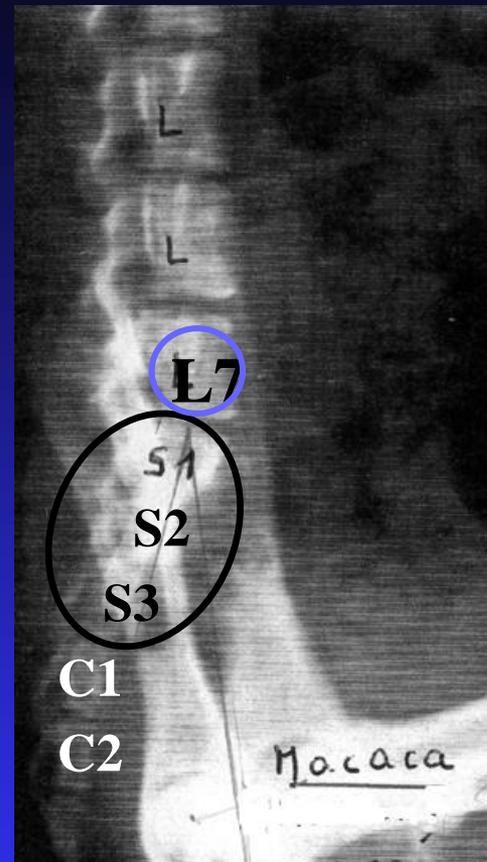
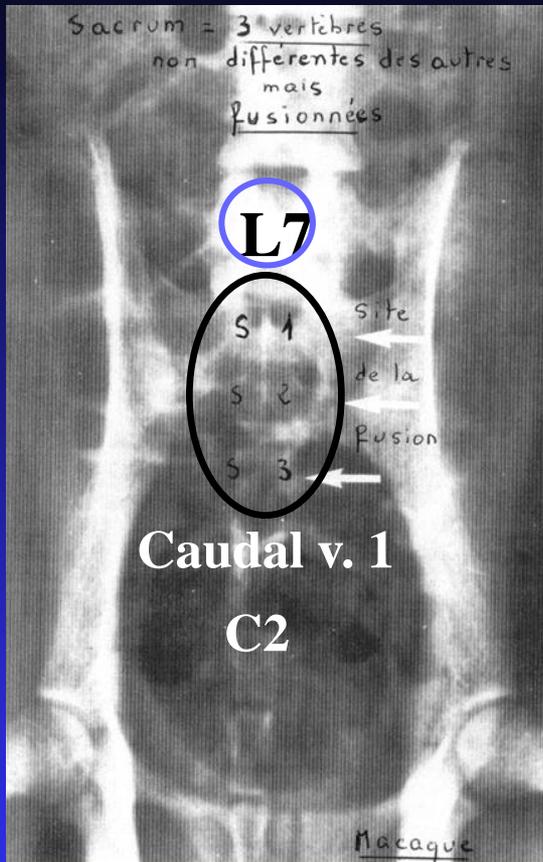


7 Cervical
vertebrae

12 Thoracic
vertebrae
with 12 ribs

5 lumbar
vertebrae

5 sacral
vertebrae



MACAQUE

**Sacrum = 3 vertèbres non différentes des autres
mais fusionnées**

*Abitbol, 1987
Am J Phys Anthrop*

VARIATIONS

DES VERTEBRES

THORACIQUES,
LOMBAIRES, SACREES

CHEZ LES PRIMATES

(Abitbol 1987)

→ Chez grds singes
racourcissement
caudal et crânial
de
la région lombaire

→ Chez grds singes et ho
migration crâniale des
vertèbres sacrées

Vertebral number Monkeys Apes Humans

19	Th	12	12
20	1		1
21	2		2
22	3		3
23	4		4
24	5		5
25	6		1
26	7 Lo		2
27	1	1	3
28	2	2	4
29	3 Sa	3	5

Thoracic vertebrae

Lumbar vertebrae

Variation
chez grds singes



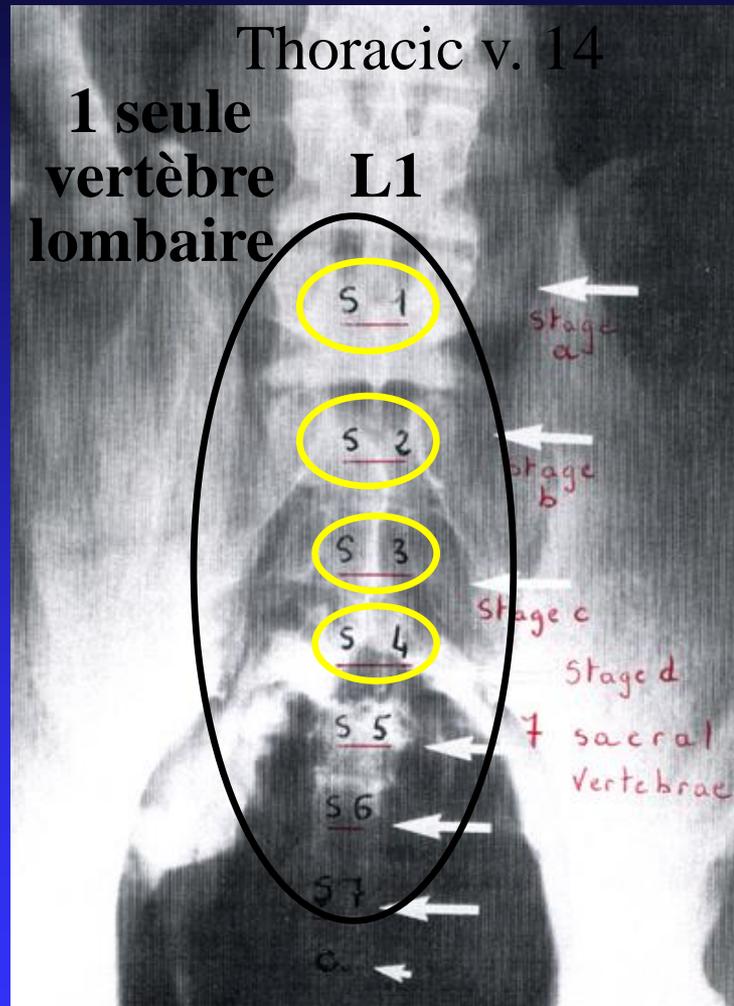
Sacral vertebrae

SACRALIZATION OF 4 LUMBAR VERTEBRAE

**Extension
crâniale
maximale du
sacrum**

7

**VERTEBRES
SACREES**



**AT
SUCCESSIVE
STAGES
OF FUSION**

CHIMPANZEE

*Abitbol, 1987
Am J Phys Anthropol*

Tous les premiers hominidés
ont préservé

5 vertèbres lombaires

Une région lombaire longue
était fondamentale pour
l'adoption de bipédie



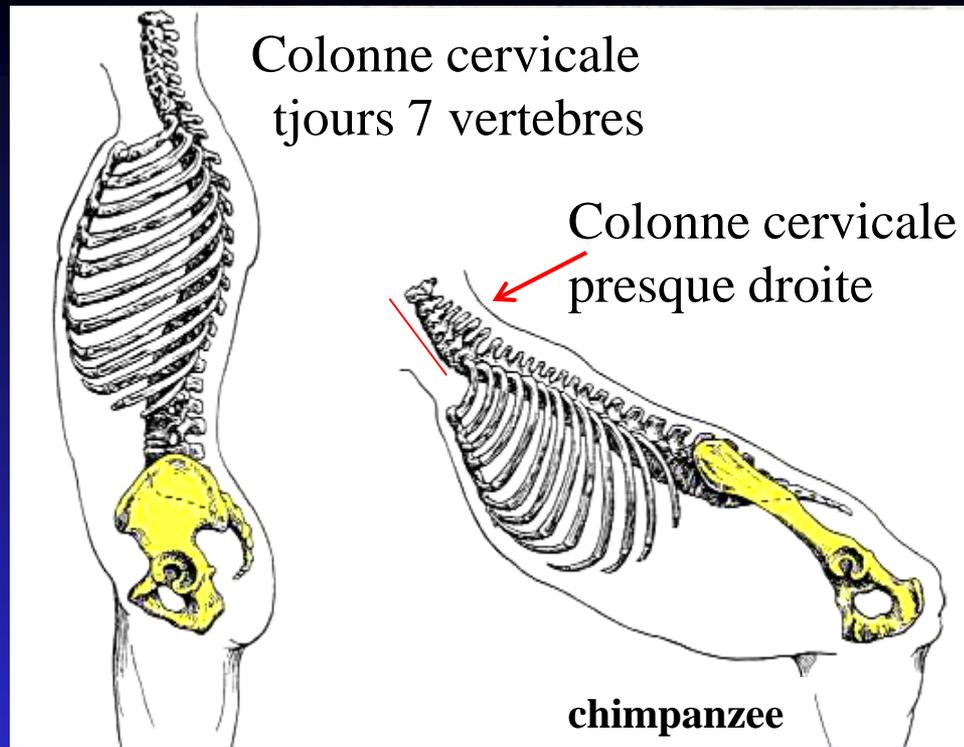
Australopithecus. africanus
(Sterfontein, Afrique du sud)
2,5 m. a

*Hausler et al. 2002,
2011, 2012*

II bis

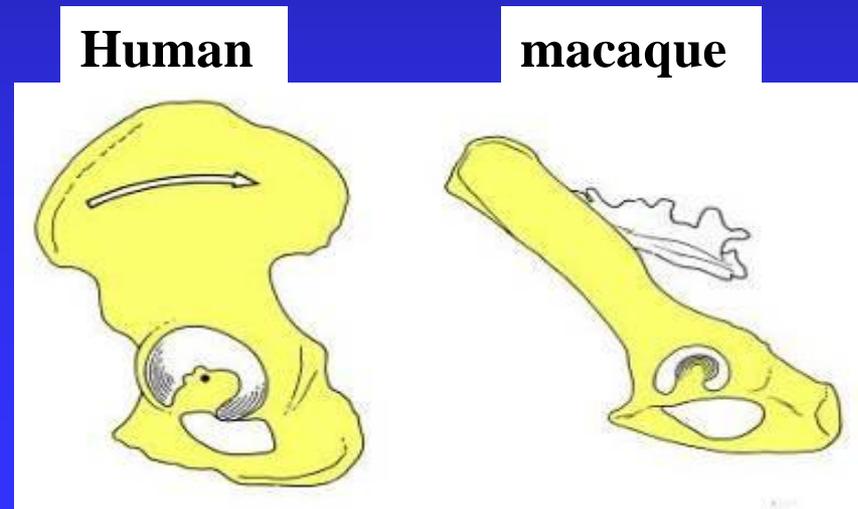
BASSIN ET COLONNE

VUE SAGITTALE

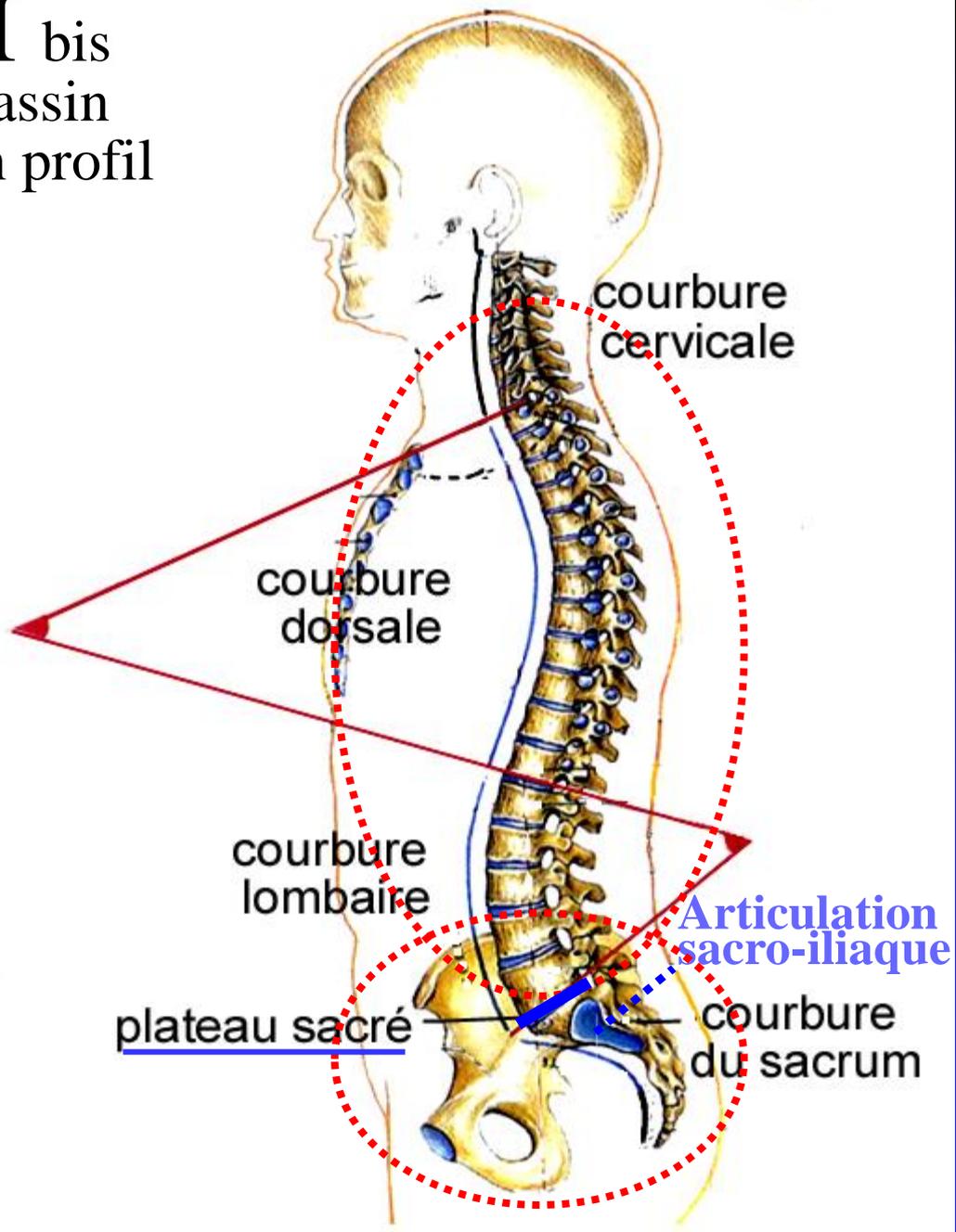


Extension ant. et post.
des ailes iliaques

⇒ **insertion et action
des muscles fessiers
différentes**



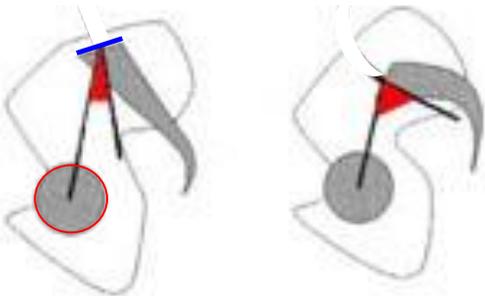
II bis Bassin en profil



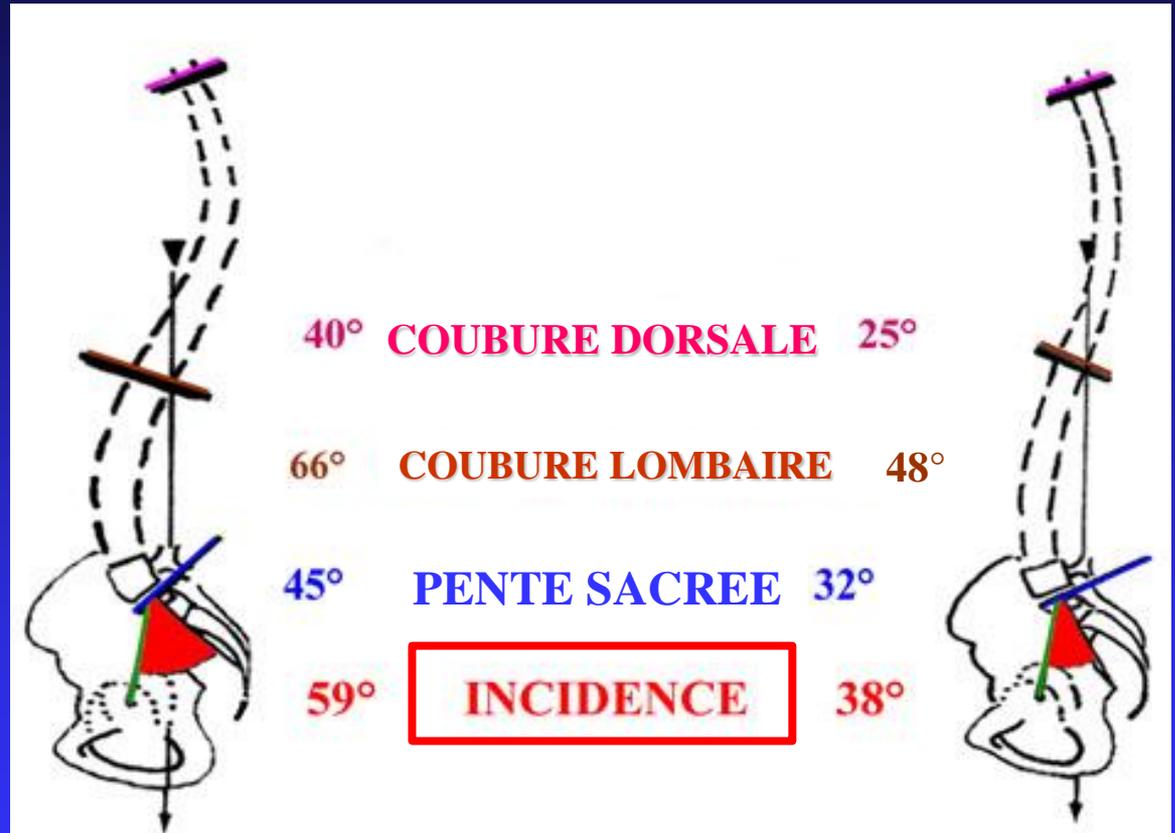
Courbure unique
dorso-lombaire

ROLE DU BASSIN DANS LES COURBURES VERTEBRALES

Angle
d'incidence sacrée



Angle découvert
par radiologie

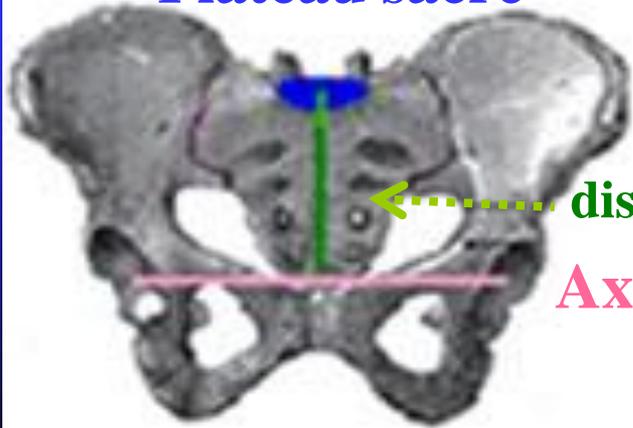


L'INCIDENCE CONTROLE LE DEGRE
DES COURBURES VERTEBRALES

G. Duval-Beaupère 1993

ANGLE D'INCIDENCE SACREE

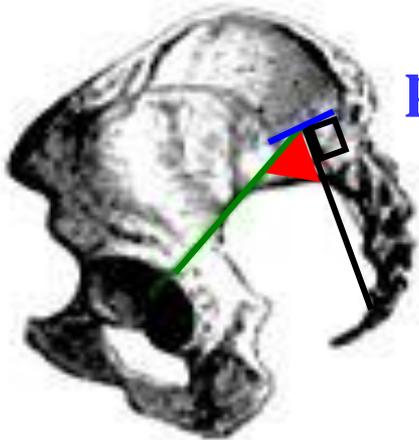
Plateau sacré



dist. sacro-cotyloïde

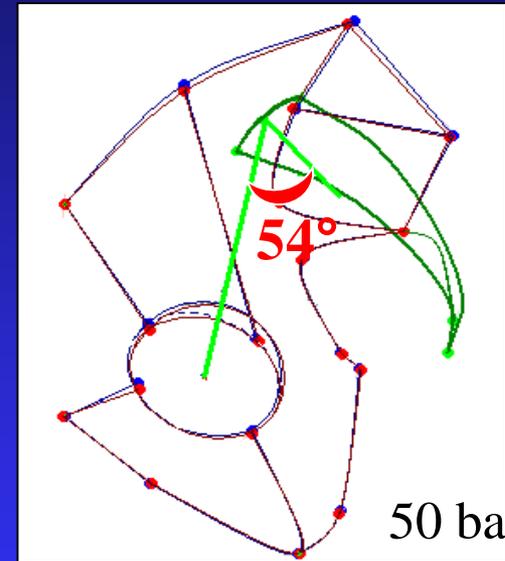
Axe bicotyloïdien

plateau sacrée



**PARAMÈTRE ANATOMIQUE PROPRE A
CHAQUE SUJET**

LOGICIEL « DE VISU »

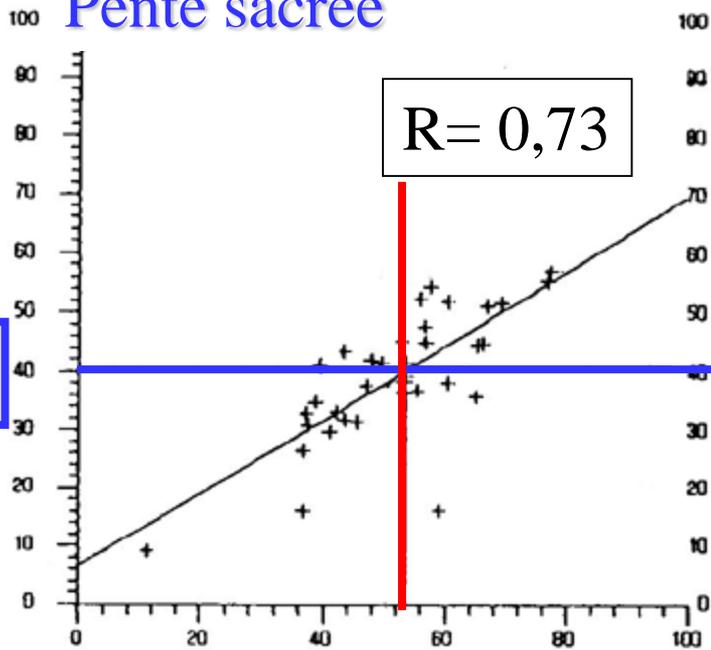


50 bassins

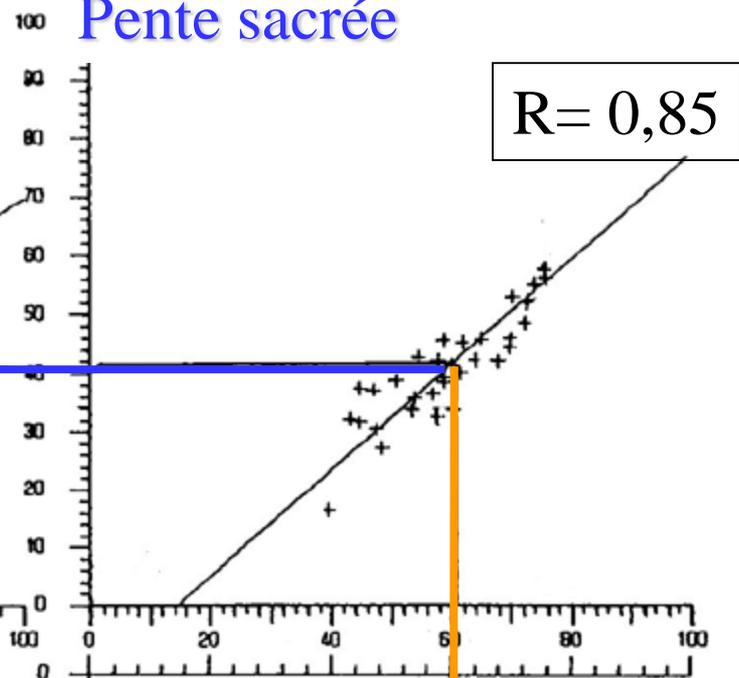
**MOYENNE DE L'ANGLE
D'INCIDENCE
(Extrêmes 35°-75°)**

*C. Tardieu et al.
C. R. Acad. Sc.. 2006*

Pente sacrée



Pente sacrée



Incidence 54°

60° Lordosis

UNE CHAÎNE

DE CORRELATIONS

ENTRE COLONNE / BASSIN

45°

R=0,61

40 Subjects

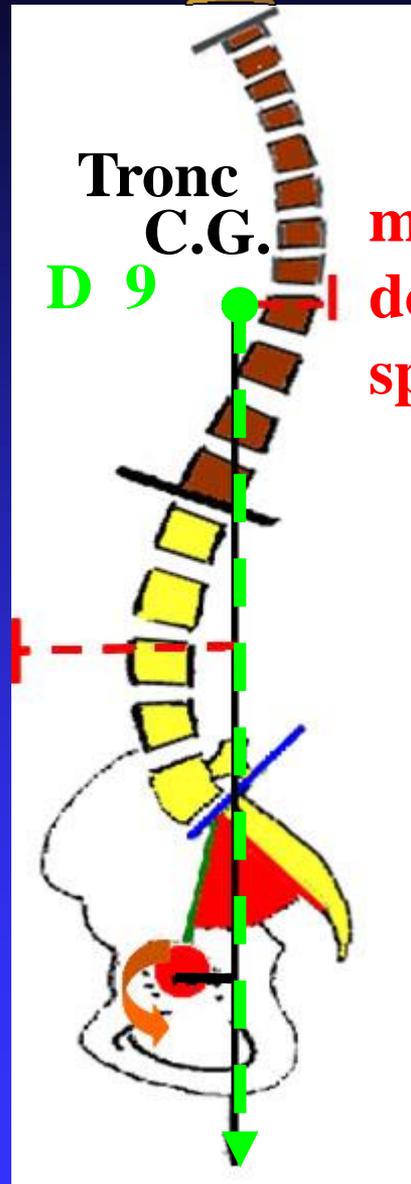
Kyphosis

G. Duval-Beaupère & al. 1993, 1998

EQUILIBRE ECONOMIQUE



LIGNE DE GRAVITE DU TRONC



Tronc
C.G.
D 9

muscles
dorsaux
spinaux

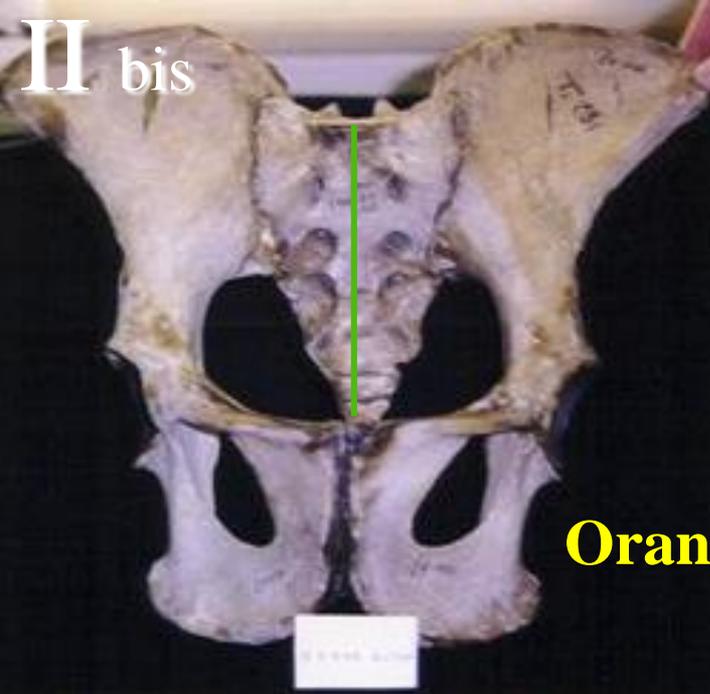
muscles
abdominaux

ligament
ilio-femoral

ANTERIEURE A LA
COURBURE DORSALE

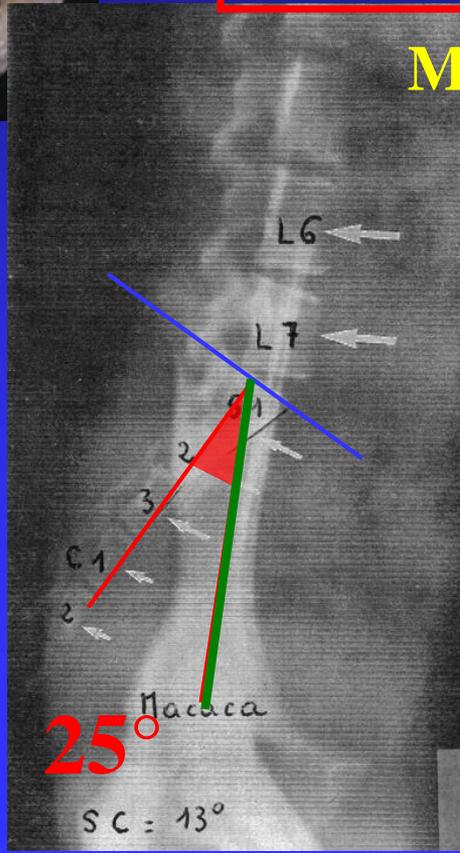
POSTERIEURE A LA
COURBURE
LOMBAIRE

POSTERIEURE
AUX
HANCHES

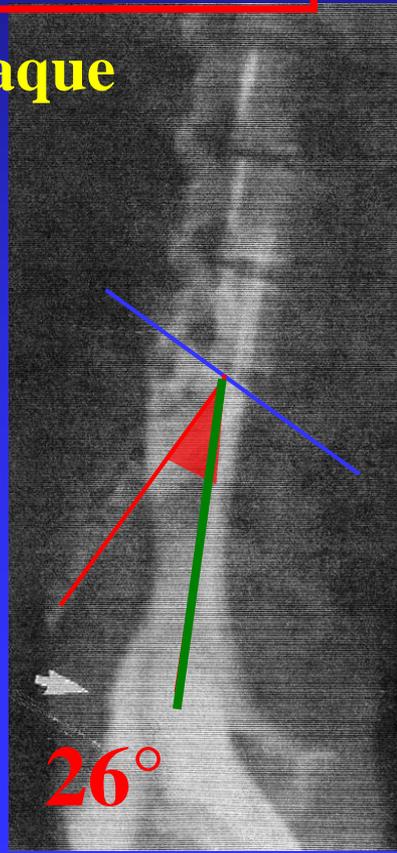


**CHEZ
LES PRIMATES
NON HUMAINS
INCIDENCE
< 40°**

Chimpanzé



Macaque

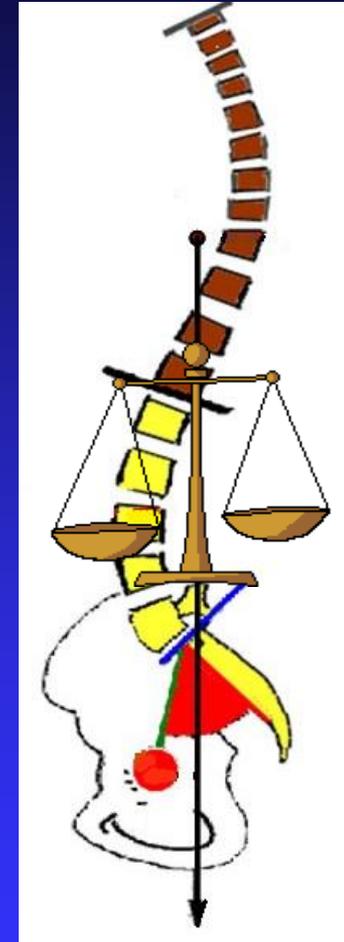
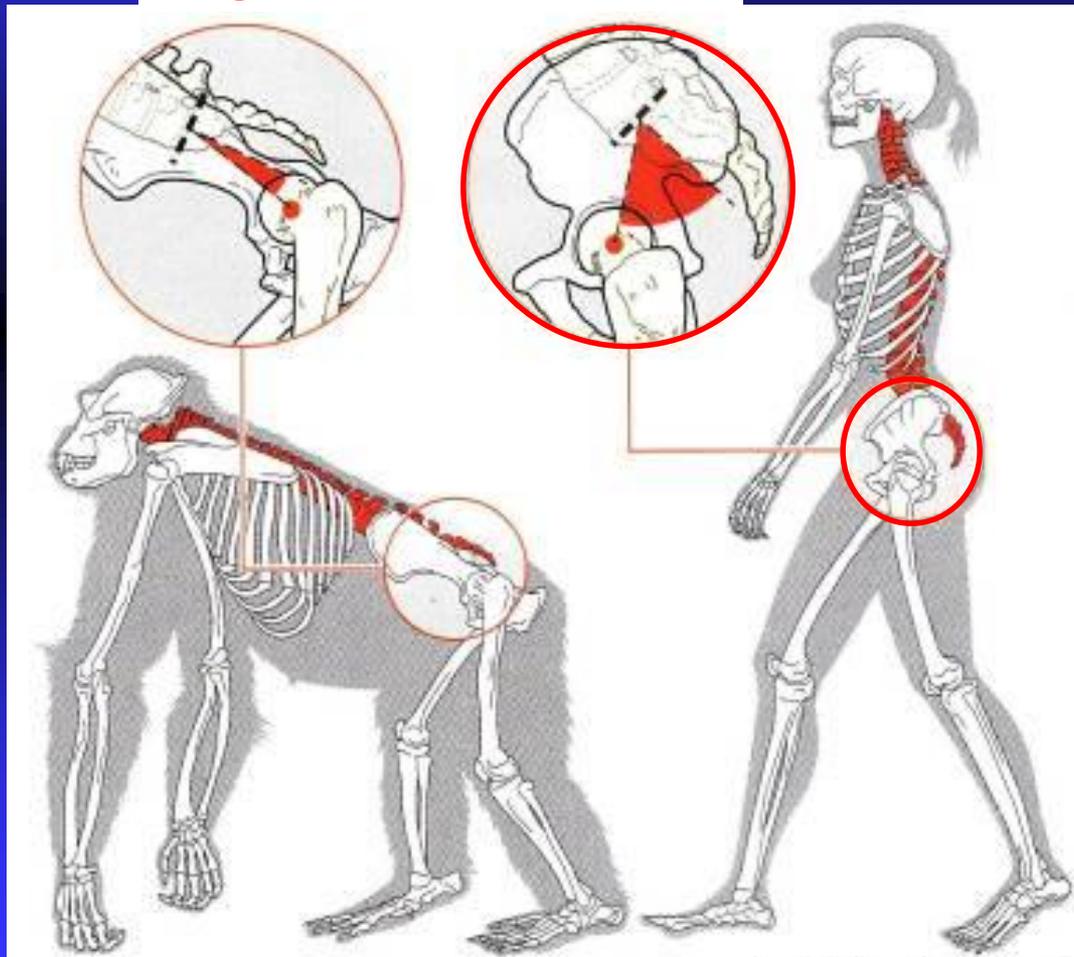


*C. Tardieu et al.
2006*

Abitbol 1987

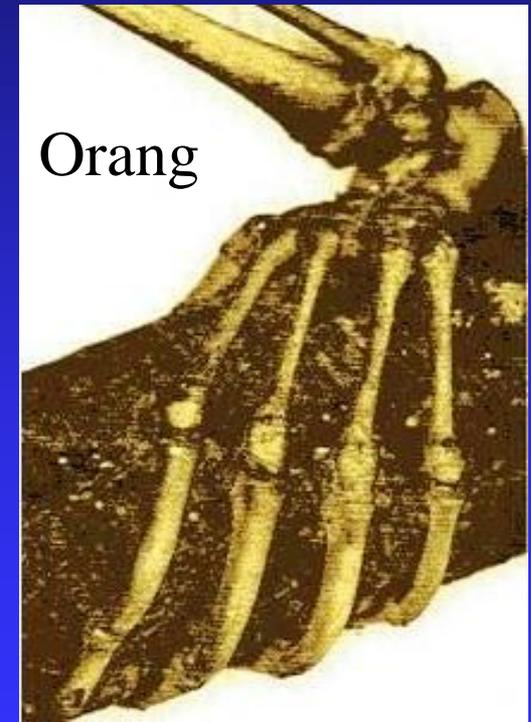
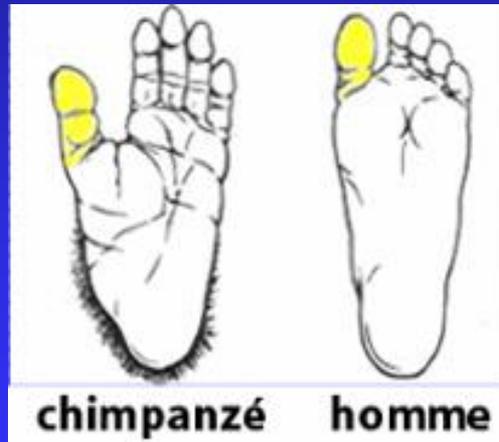
Un bassin donnant une bonne assise aux courbures de notre colonne vertébrale

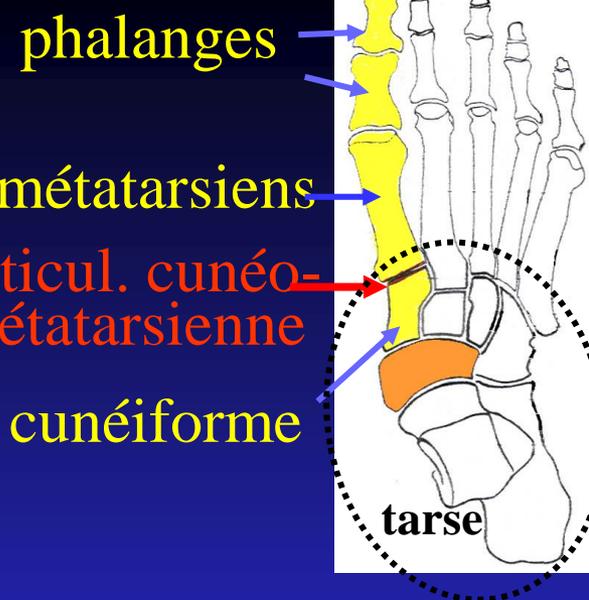
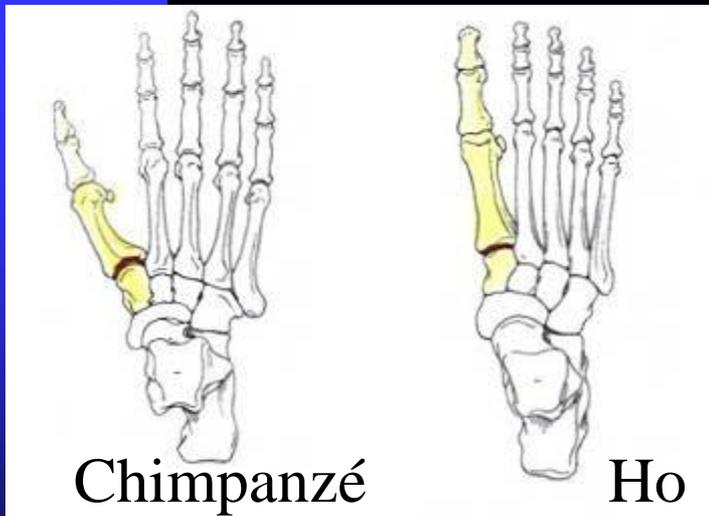
Angle d'incidence sacrée



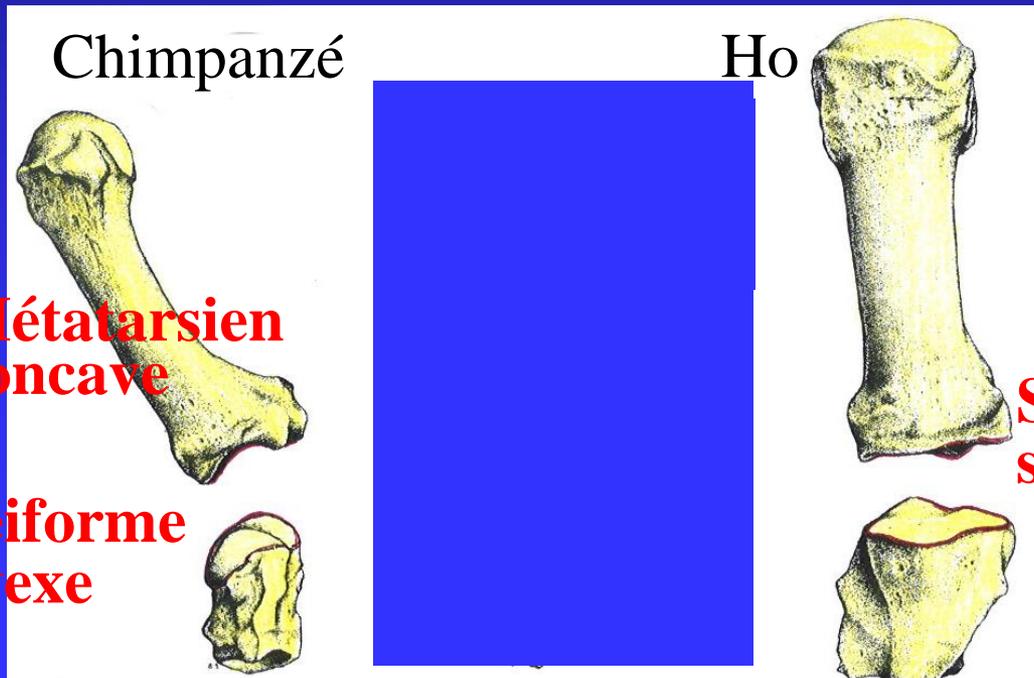
→ Formation d'un lien fonctionnel entre rachis et bassin

III Un pied d'appui et de propulsion qui a perdu sa préhensilité





permettant la mobilité de la pince



Métatarsien concave
cunéiforme convexe

Surfaces subplanes

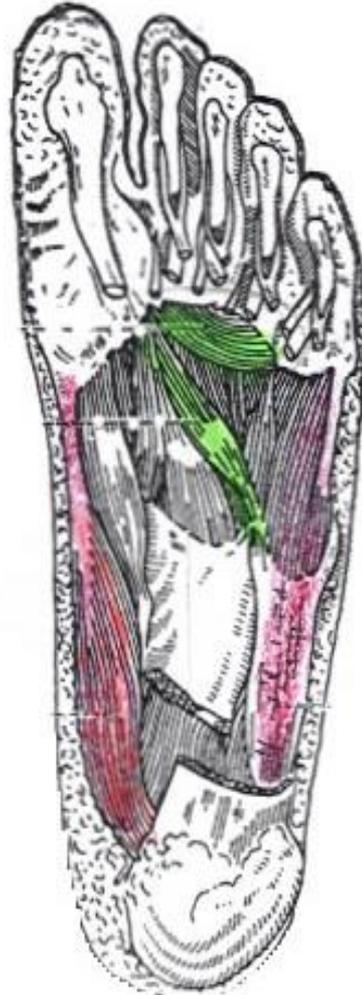
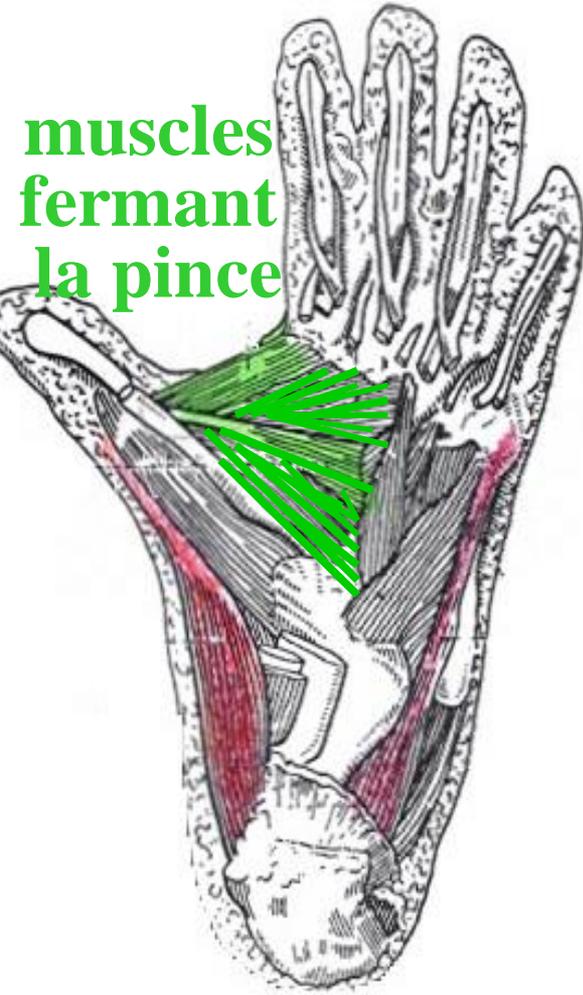
ARTICULATION CUNEO - METATARSIIENNE



Homo habilis
OH8
1,8 millions d'années
Olduvai (Tanzanie)

ADDUCTEURS TRANSVERSE ET OBLIQUE

Aspect rélictuel du transverse



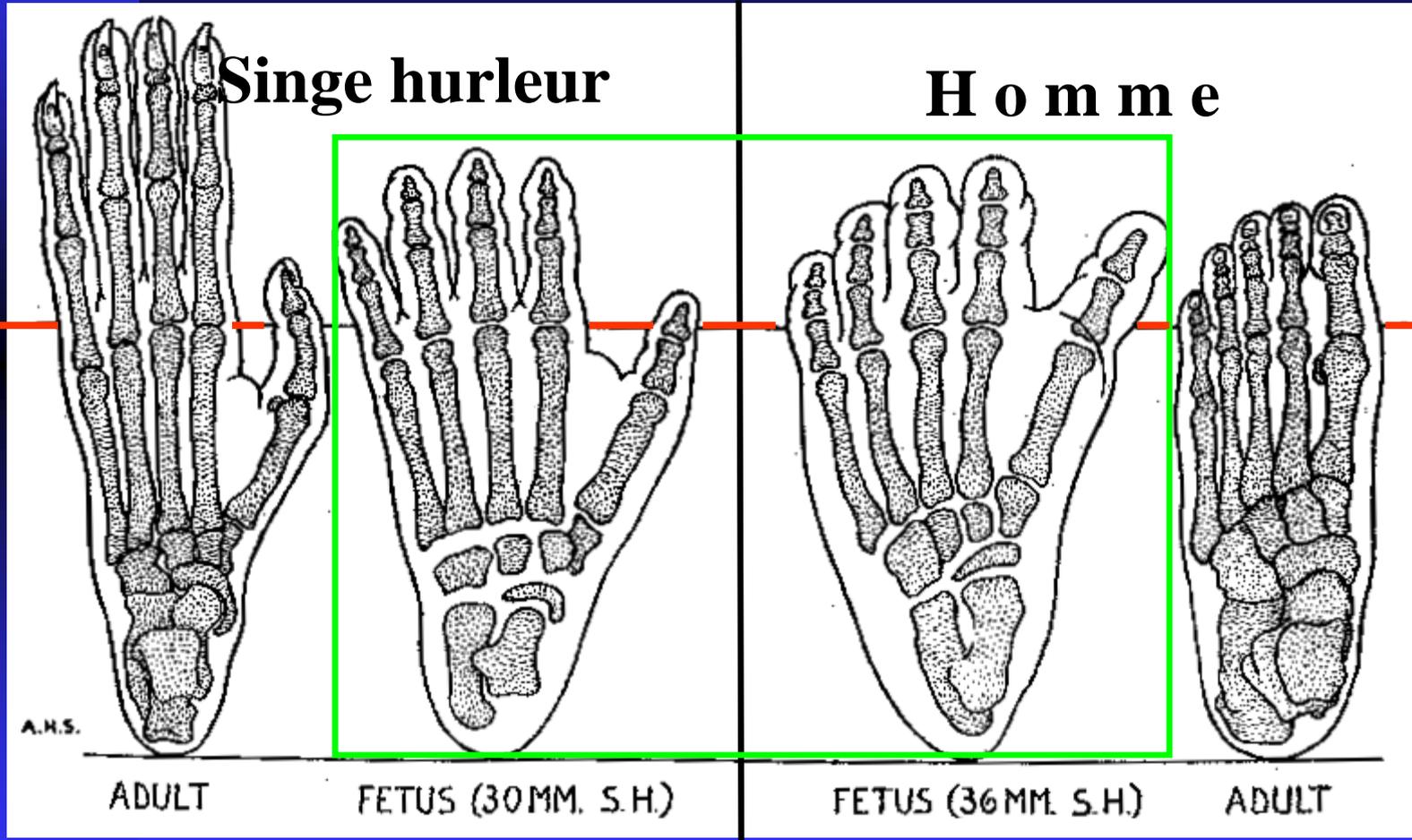
CHIMPANZE

HOMME

Une comparaison instructive au cours de la croissance !

Allongement des phalanges
des doigts latéraux

Réduction des phalanges
des doigts latéraux

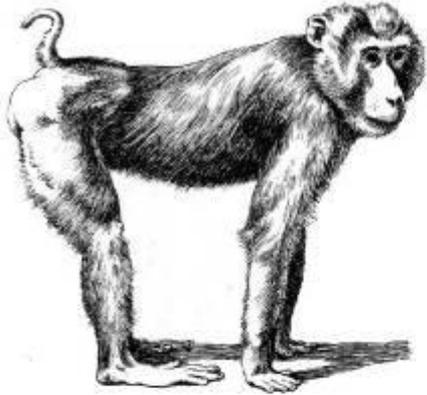


Pour
comprendre
certaines
modalités
de
l'évolution
!

Même longueur entre talon et **2^{ème} art. métatarso-phalang.**

IV

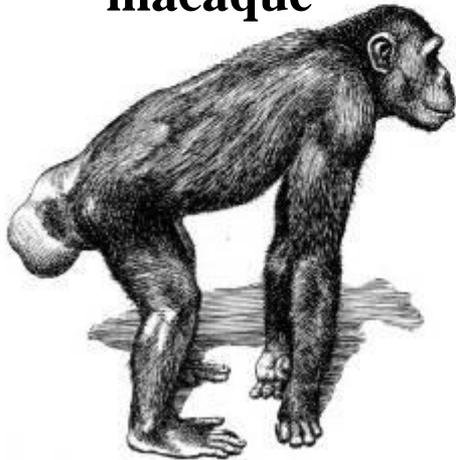
Des proportions corporelles adaptées à la bipédie



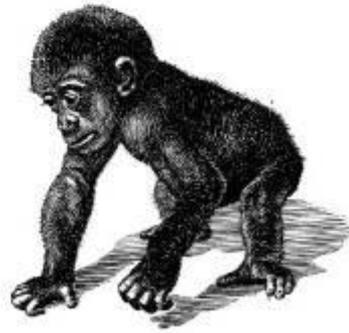
macaque



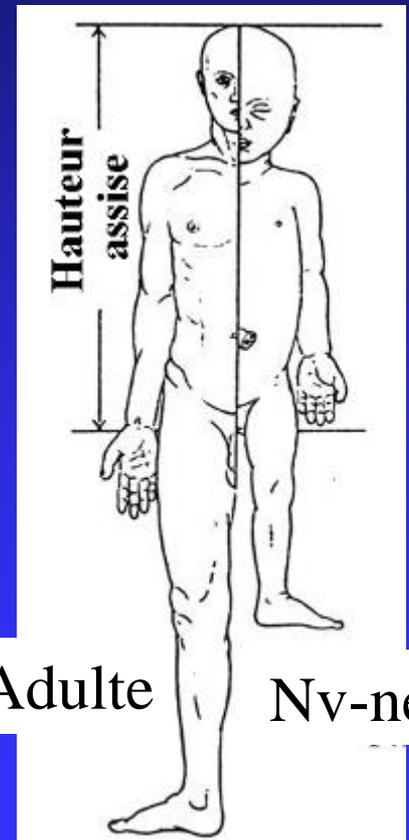
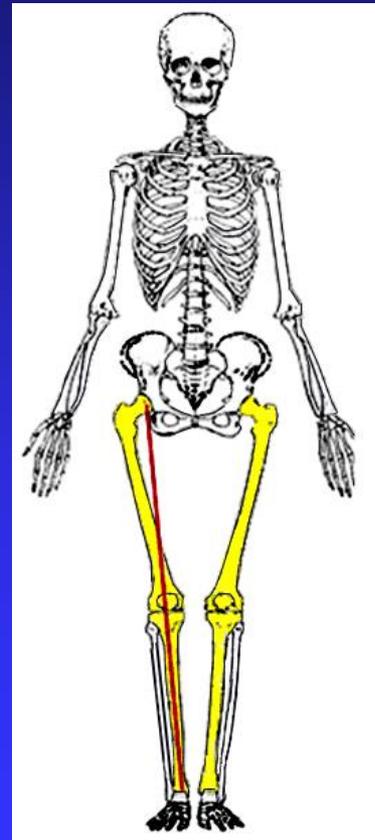
gibbon



chimpanzé



gorille 7 mois



Adulte

Nv-né

2

L' APPRENTISSAGE DE LA MARCHE

QUE FAIT LA GRAVITE ?

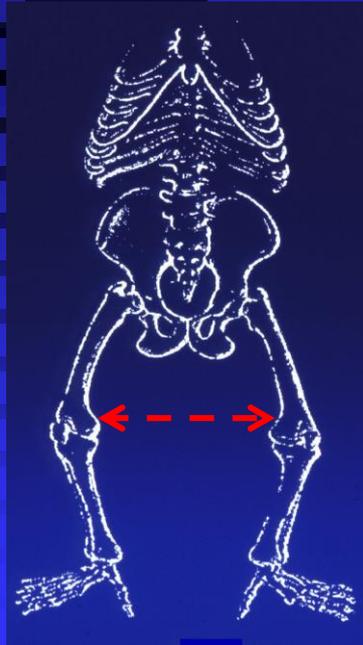
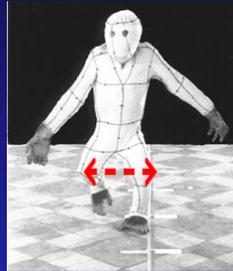
AUJOURD'HUI



1. ADDUCTION DES MEMBRES INFERIEURS

Un fémur devenu oblique

Genou
abducté



CETTE
OBLIQUE

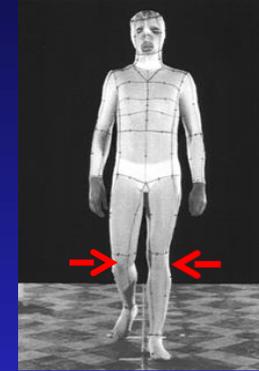
PERMET

UNE GRANDE

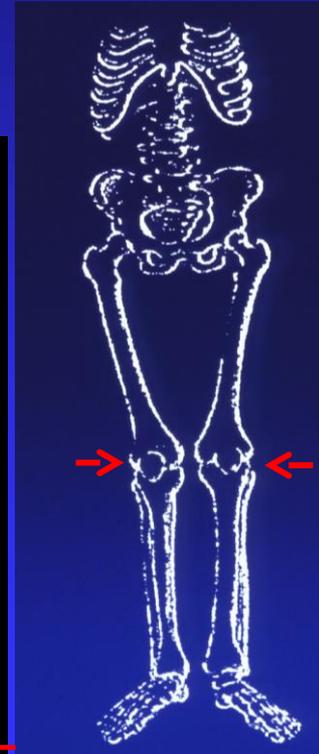
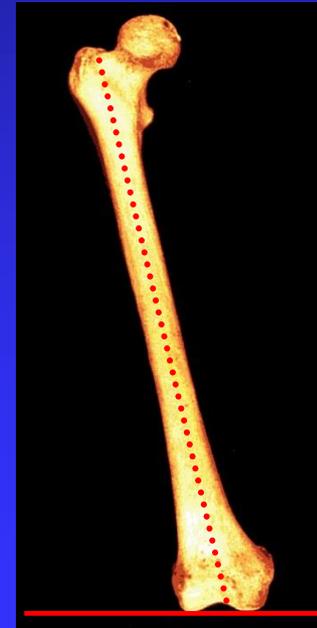
ECONOMIE

DE LA

MARCHE



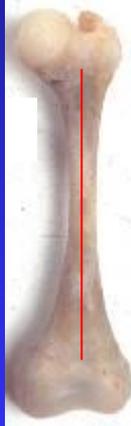
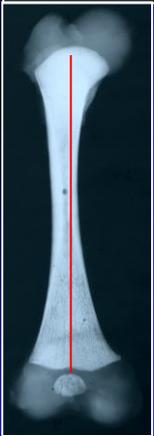
Genou
adducté



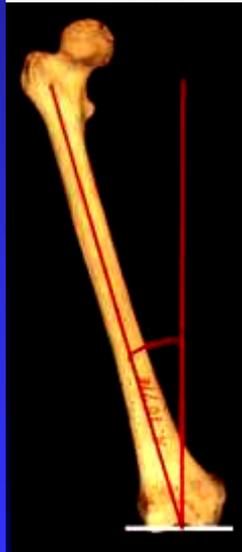
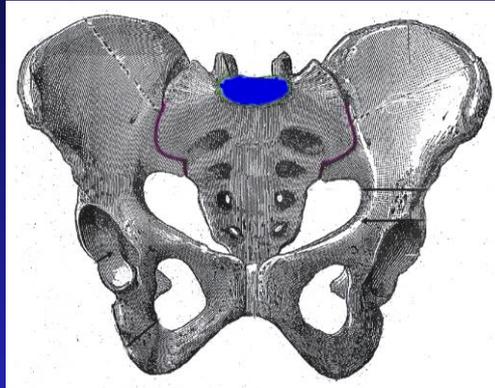
CHIMPANZE **Fémur rectiligne**

Fémur oblique

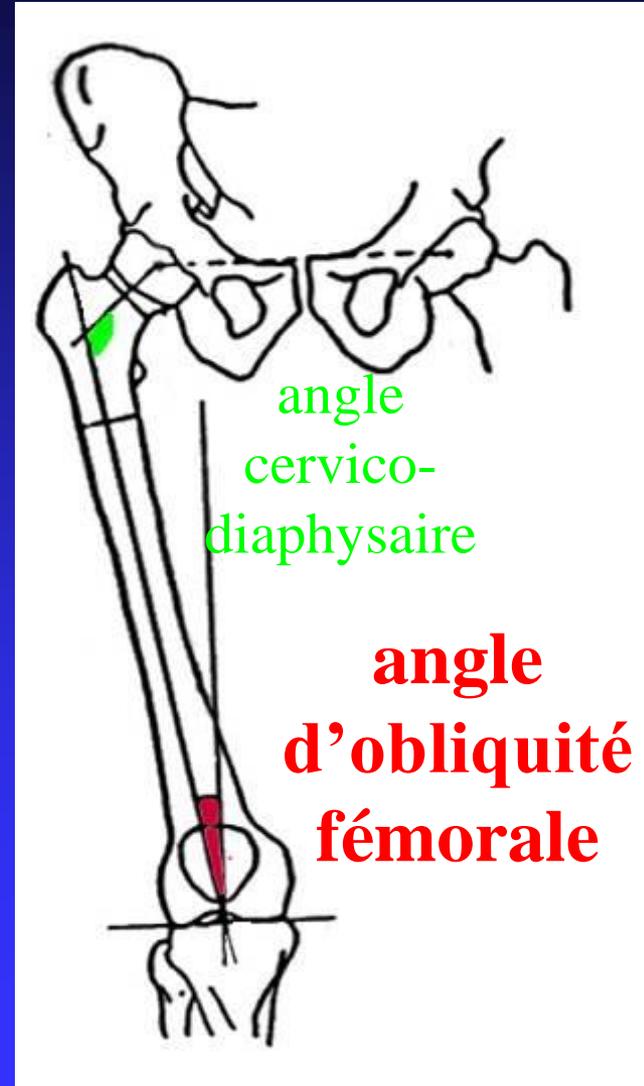
HO



NOUVEAU-NE

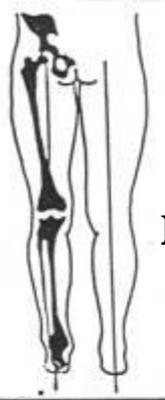


ADULTE

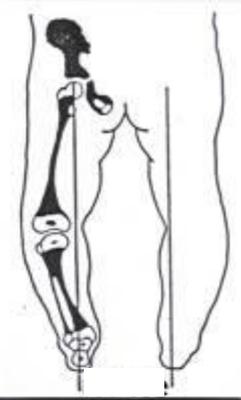


ADULTE

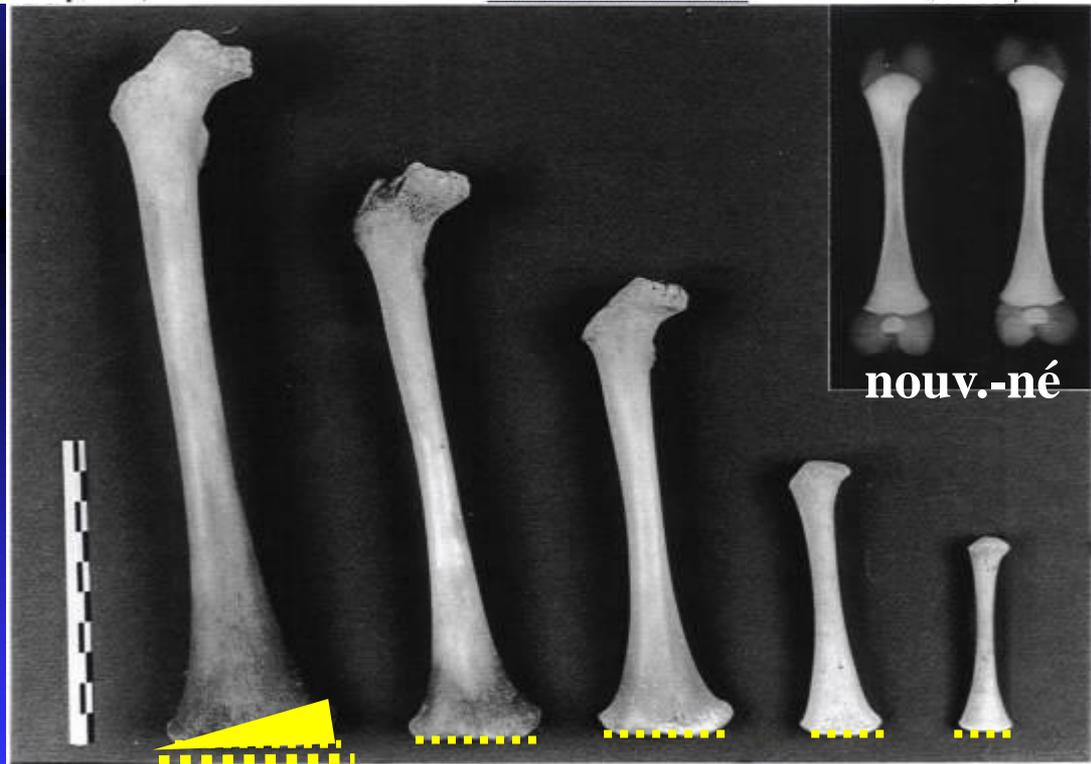
NOUVEAU-NE



Genoux rapprochés



Genoux écartés



nouv.-né

7 ans 5a. 3a. 6m. 0m.

9° 9° 5° 1° 0°



**ENFANT
NON
MARCHANT**

8 ANS

**Obliquité
fémorale**

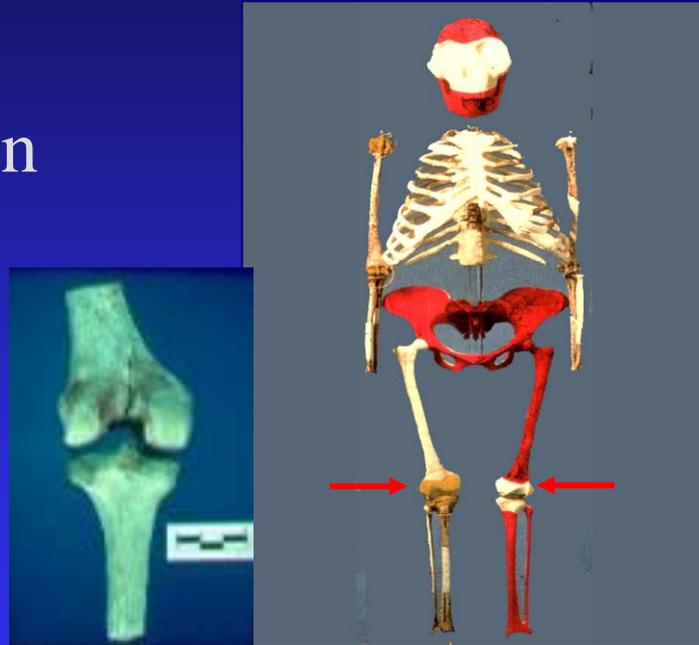
*C. Tardieu
S. R. A. 1997*

FOSSILES HOMINIDES

L'enfant
apprenant à marcher
forgeait déjà
son obliquité
par sa propre action



Homo habilis
1,8 M.a.



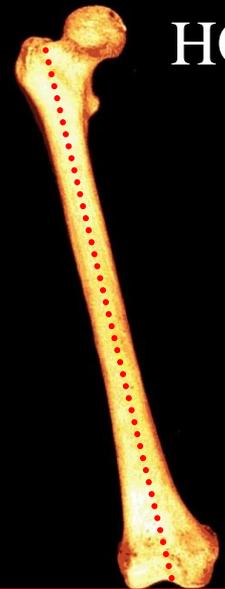
LUCY

Austr. Afarensis
3 M.a.

CH.



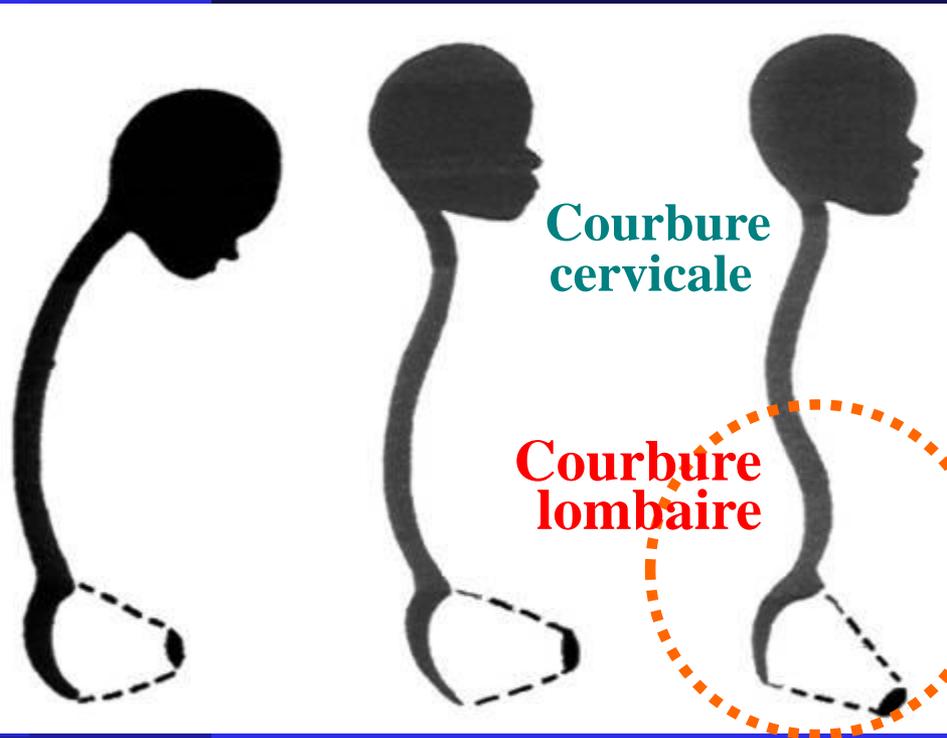
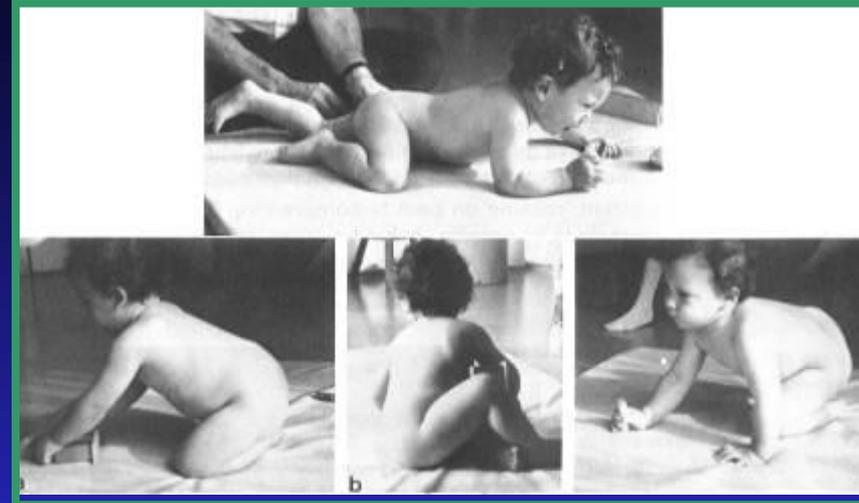
HO



Fémur rectiligne

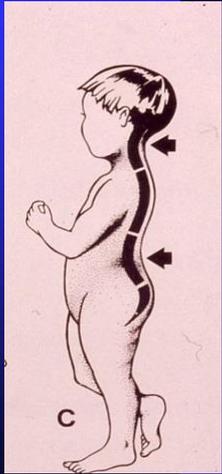
Fémur oblique

2. FORMATION DES COURBURES VERTEBRALES

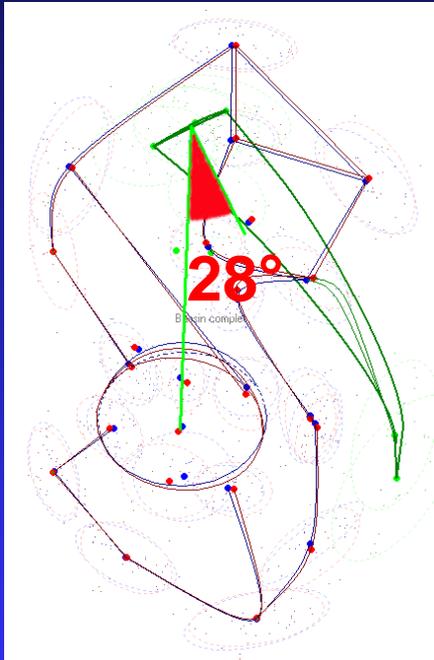


étroitement associée
à la morphologie
sagittale
du bassin du sujet

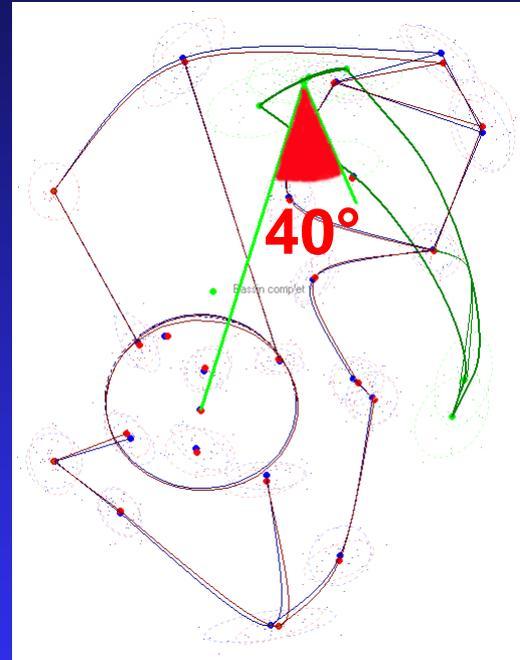
MOYENNE ANGLE D'INCIDENCE



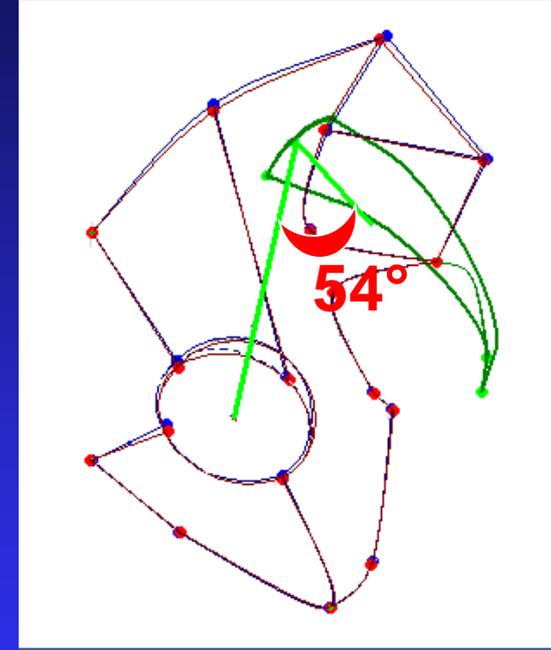
20 NOUV. -NES



17 ENFANTS



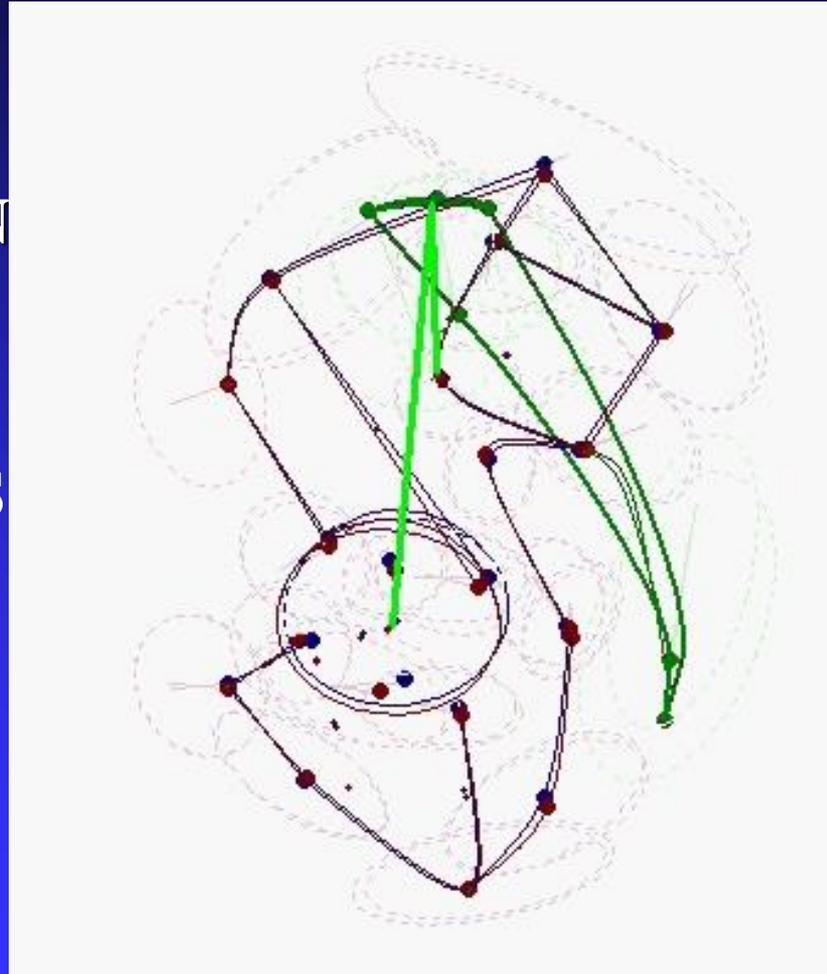
50 ADULTES



**AUGMENTATION DE L' ANGLE D' INCIDENCE SACREE
EN MEME TEMPS QUE LA LORDOSE LOMBAIRE SE FORME**

VARIATION TOTALE DE L'ANGLE D'INCIDENCE

VISUALISATION
des
NOUVEAUX-NES
aux ENFANTS
et aux
ADULTES



AUGMENTATION
DE LA
PENTE SACREE

INCURVATION
DU
SACRUM

DEPLACEMENT
POST. DU
SACRUM

→ Toutes ces modifications précitées,

= Des avantages qui amélioreraient
la performance de la marche

de nos ancêtres dans le milieu où ils évoluaient

...

Milieu est-africain qui à partir de 3 millions
d'années connaissait un fort assèchement
faisant place à une savane herbeuse
de plus en plus ouverte

Enjeu : Marcher, courir, se déplacer efficacement
pour se nourrir, attraper des proies, échapper aux prédateurs...

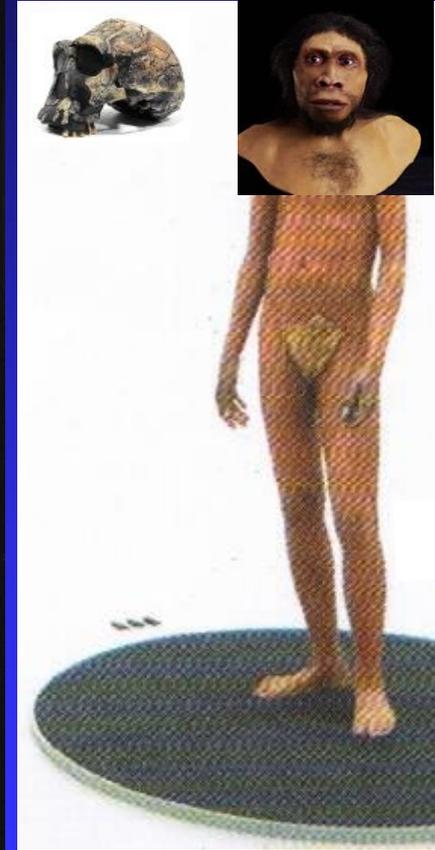
A cette époque la vie n'est qu'une question de survie !

Deux squelettes fossiles très contrastés

Bipède
... encore arboricole



Bipède permanent, coureur
et chasseur



LUCY 3.2 M. années (Ethiopie)
Australop. afarensis

TURKANA BOY 1.6 M.a.
Homo erectus (Kenya)

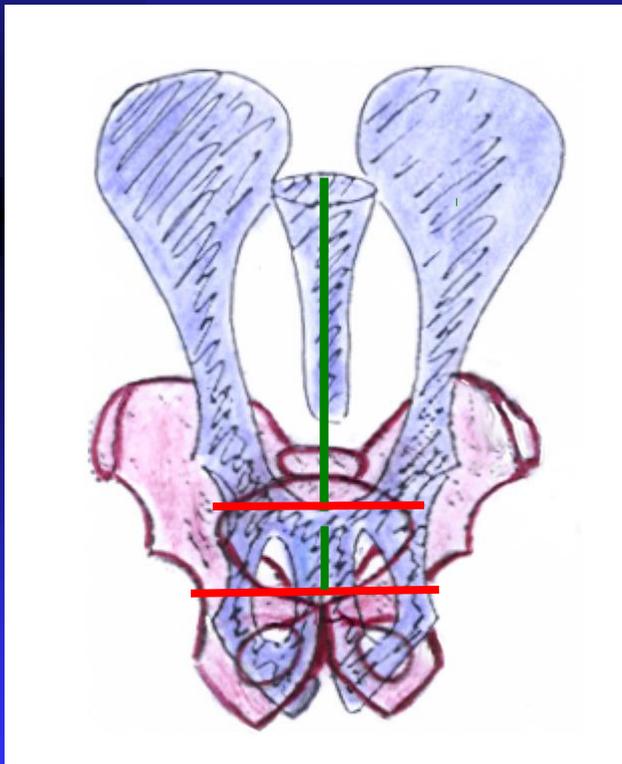
**EVOLUTION DE L'INCIDENCE
ET DE LA LORDOSE
CHEZ LES FOSSILES ?**

**QUAND APPARAÎT
LE LIEN FONCTIONNEL
ENTRE
BASSIN ET COURBURES VERT. ?**

- Incidence faible

$< 40^\circ$

- Epaisseur longue



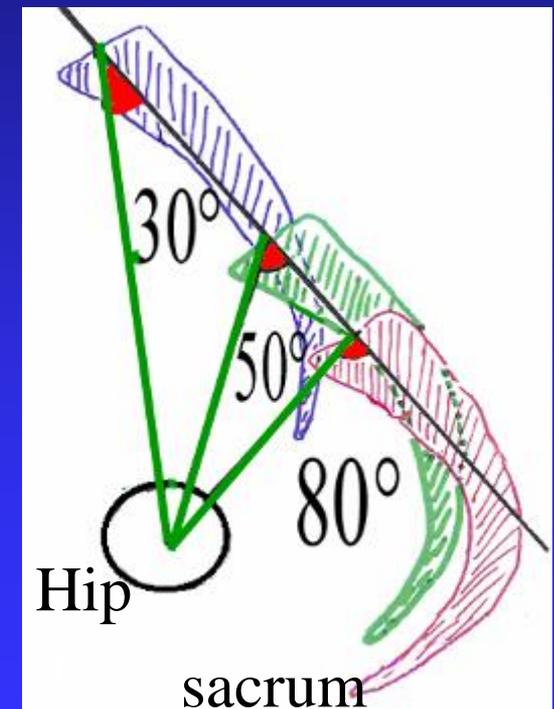
Modèle de l'évolution du bassin des hominidés

- Incidence augmente
- Epaisseur diminue
- Déplacement post. du sacrum

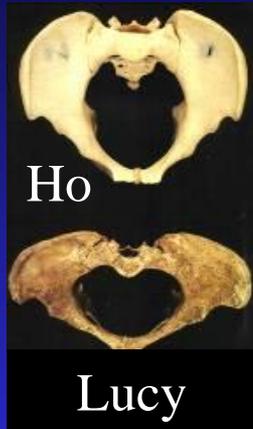
- Incidence forte

$> 40^\circ$

- Epaisseur courte



FOSSILES HOMINIDES



INCIDENCE
(52° - 58°)

Australopithecus afarensis

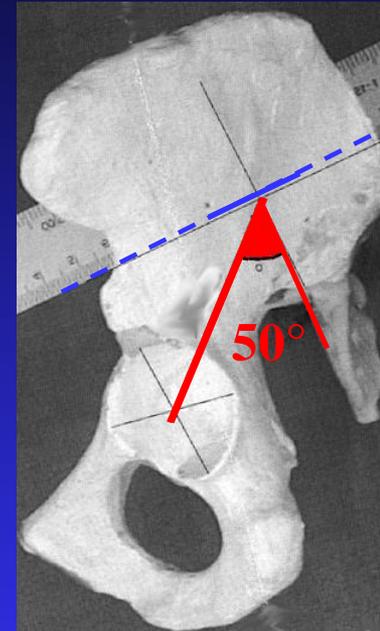
3,2 m. y.
(Ethiopie)



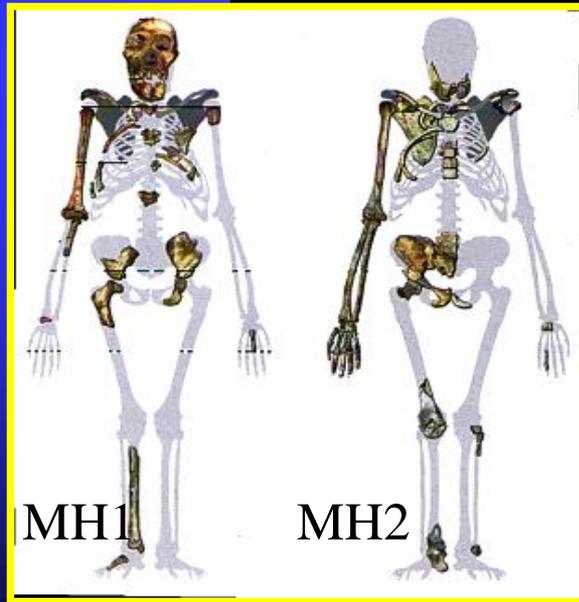
Lumbar
curvature

Australopithecus. africanus

2,8 to 2,6 m. y
(South Africa)



(47° - 54°)

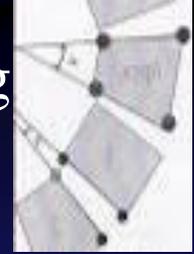


MH2



Incidence 50° env.
(Reconstruction M. Haüslar)

wedging
angle
L5



Habitual lordotic
curvature

Australopithecus sediba

(Malapa) South Africa

1.9 à 1.7 m. années

Chez les australopithèques

→ La marche bipède était différente de la nôtre

→ Le lien fonctionnel entre rachis et bassin
était probablement émergent



Marked lumbar
curvature

Incidence
47° - 49°



Incidence 49°

Early Homo erectus
Gona (Ethiopia)

1,2 m. y.

Homo erectus

Marcheur sur de longues
distances, coureur
et chasseur

« Turkana Boy »

Early Homo erectus
(Kenya)
1,6 m y.

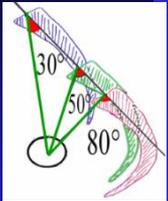
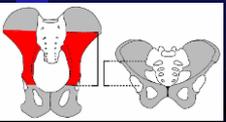
→ Le lien fonctionnel entre rachis et bassin
était probablement établi chez *homo erectus*

CONCLUSION

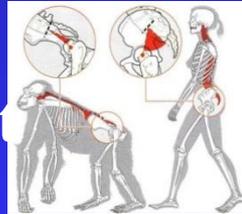


□ L' équilibre sagittal du tronc sur les membres inférieurs est essentiel pour l'efficacité de la locomotion bipède. Il fut crucial dans la transition entre bipédie occasionnelle et bipédie permanente.

□ La sélection naturelle opéra en premier sur la forme du bassin en réduisant la distance entre articulations sacro-iliaque et coxofémorale, ce qui entraîna une augmentation de l'angle d'incidence pelvien. Cet angle augmente encore avec l'apprentissage de la marche



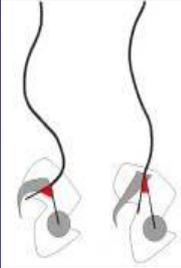
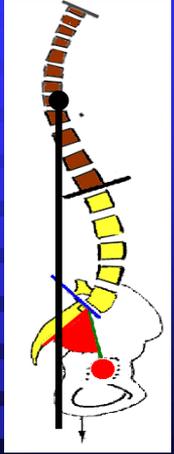
→ Le bassin devint une base stable pour le déploiement des courbures vertébrales.



□ La préservation d'une longue colonne lombaire de 5 vertèbres chez les 1ers hominidés facilita la formation d'une lordose lombaire et initia la forme en double S de notre colonne



- Un lien fonctionnel entre angle d'incidence et lordose lombaire s'établit au cours de l'évolution des hominidés, améliorant considérablement l'efficacité de l'équilibre sagittal.



- L'équilibre de la tête qui impliqua d'importants changements dans la morphologie du crâne et de la face, se développa plus tard au cours de l'évolution des hominidés et joua un rôle important dans ce processus d'association.



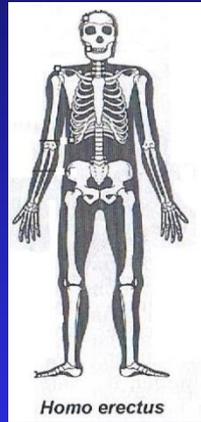
MODIFICATION DE LA DUREE DE NOTRE CROISSANCE



Australop.

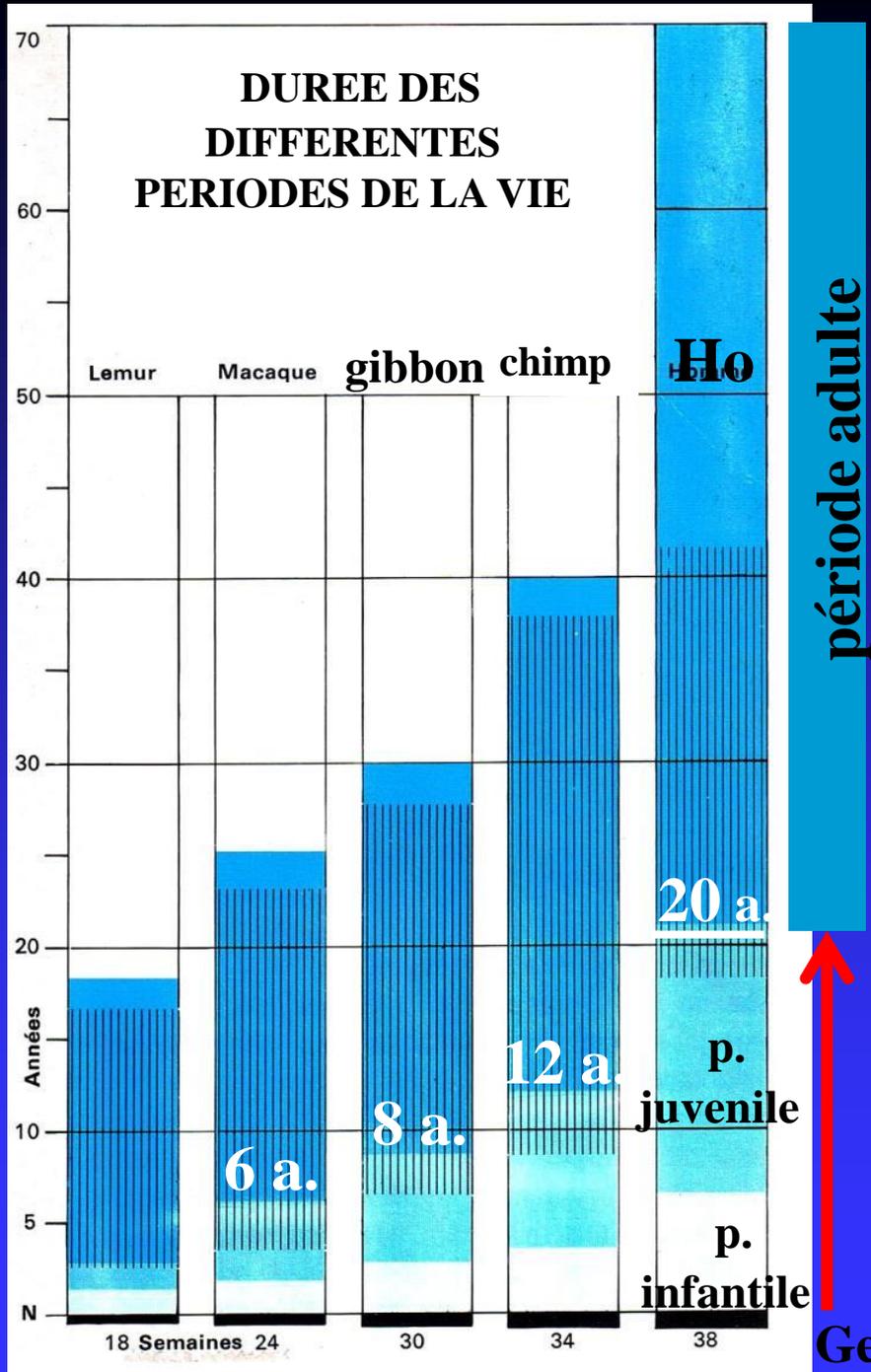
Croissance Courte

Maturité à vers 12 ans



Homo erectus

Croissance plus longue



*La croissance s'allongea
progressivement en lien avec
l'augmentation de la taille
et du cerveau,*

*lorsque la suffisance alimentaire
fut mieux assurée grâce à une
coopération technique et sociale
plus forte.*



A

HOMO ERECTUS

WT 15 000

1,5 m. y.

AUSTRALOPITHECUS

AFARENSIS

3,2 m. y.

AUSTRALOPITHECUS

SEDIBA

2 m. y.



ETHIOPIE



AFRIQUE DU SUD

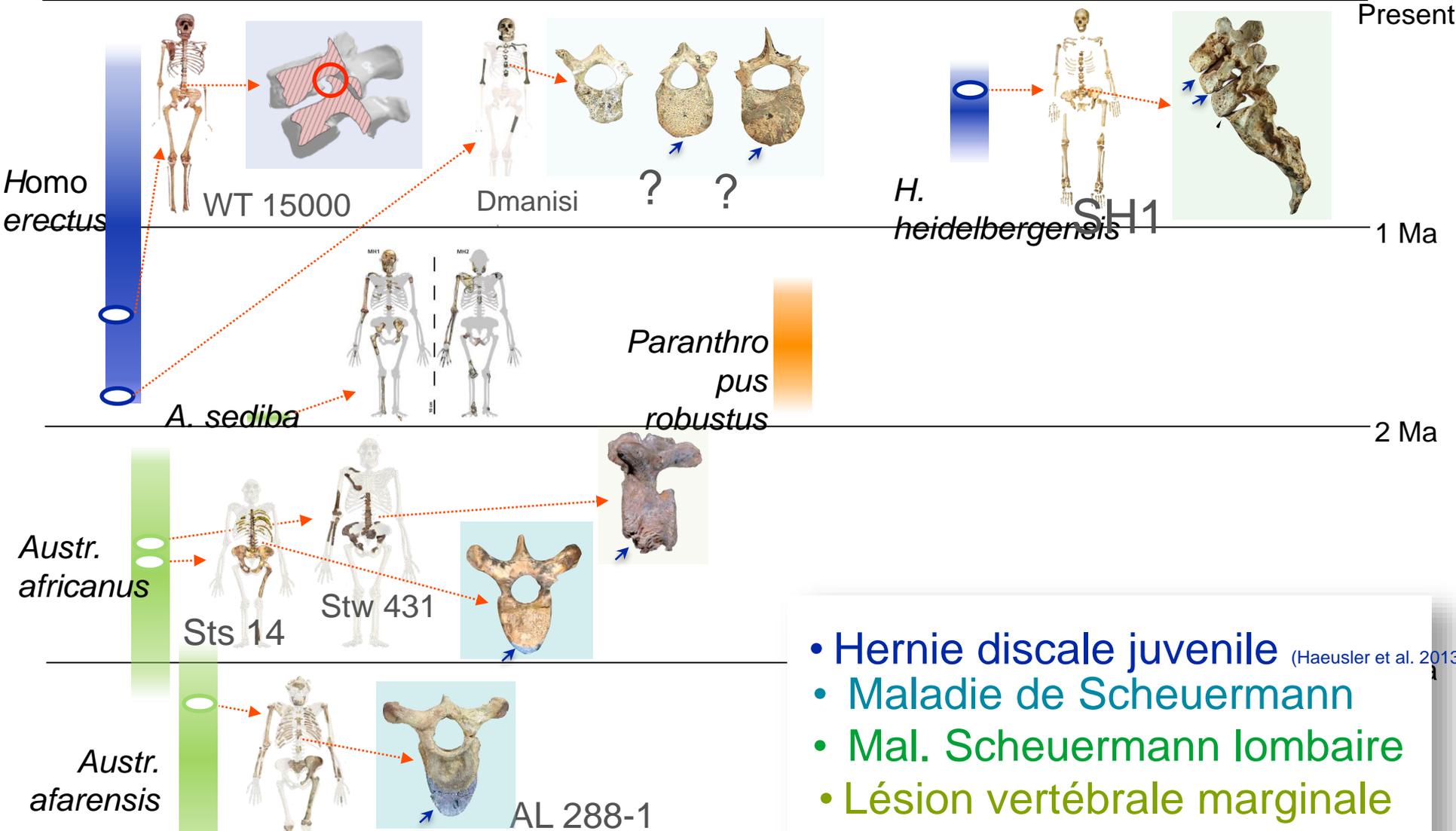


KENYA

Pathologies rachidiennes chez les 1ers hominidés

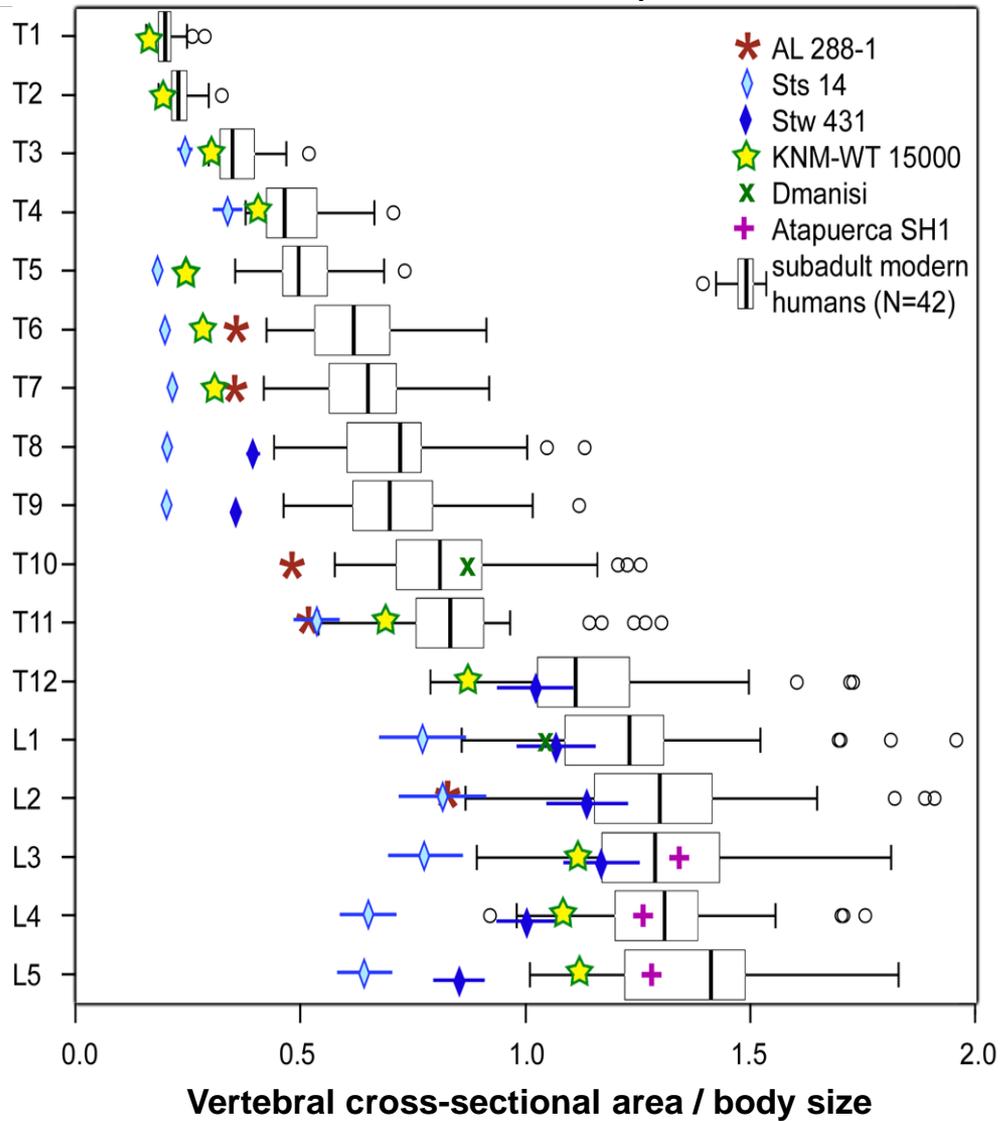


Vertèbres thoracolombaires des 1ers hominidés



- **Hernie discale juvénile** (Haeusler et al. 2013)
- **Maladie de Scheuermann**
- **Mal. Scheuermann lombaire**
- **Lésion vertébrale marginale**
(DD: brucellosis, anterior disc herniation)

Evolution de la taille des vertèbres



Present
Homo sapiens



1.5 Ma
Homo erectus



2.5 Ma
Australopithecus africanus





**Chez les hominidés
le nombre de sujets atteints de la maladie de Scheuerman
était de 8 sur 22 sujets,
tandis que la proportion chez l'homme actuel
est de 1% à 4% !**

**Presque un individu sur deux souffraient de
pathologies associées à des stress biomécaniques**

Cause ?

**Les premiers hominidés possédaient des corps
vertébraux petits par rapport à leur taille**

Homo sapiens neanderthalensis

- 400 000 to - 40 000 years

Europe , Asie

Lumbar lordosis
human like



Flat
lordosis

Reconstruction
M. Boule 1911



Reconstruction
M. Hausler, 2015



Incidence 56°

La Chapelle-aux-Saints
- 50 000 y.