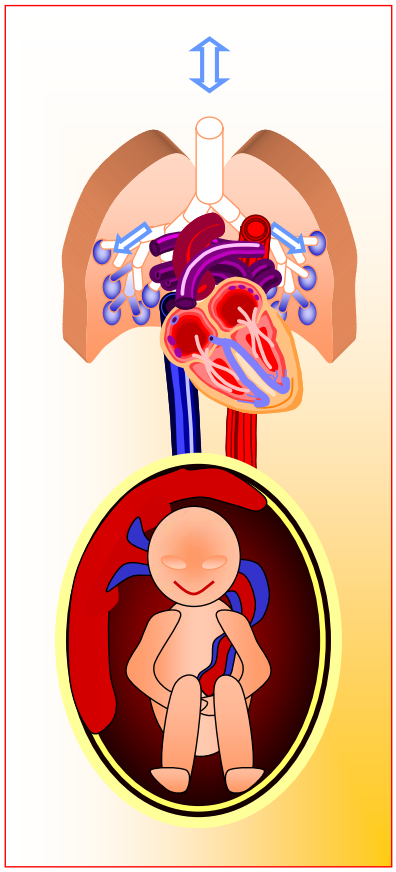
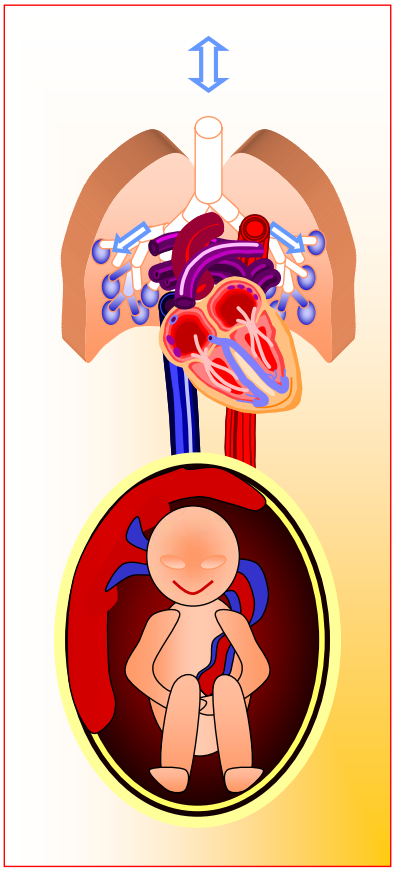
Circulation & Respiration foetale



Ph. Bonnin

Les circulations maternelles et fœtale
pp 223-249 In *L'Embryon chez l'homme et l'animal.* Ed J. Martal.
INSERM-INRA Editions,
collection Science Update, 2002.

G. Germain, Ph. Bonnin,
Physiologie de l'utérus gravide et vascularisation, in traité d'Obstétrique, D.Cabrol, JC.Pons, F.Coffinet,
Médecine Sciences Flamarion, 2003, pp 25-40.



Rappel : Respiration

Ventilation pulmonaire maternelle

Diffusion gazeuse pulmonaire maternelle

Circulation maternelle

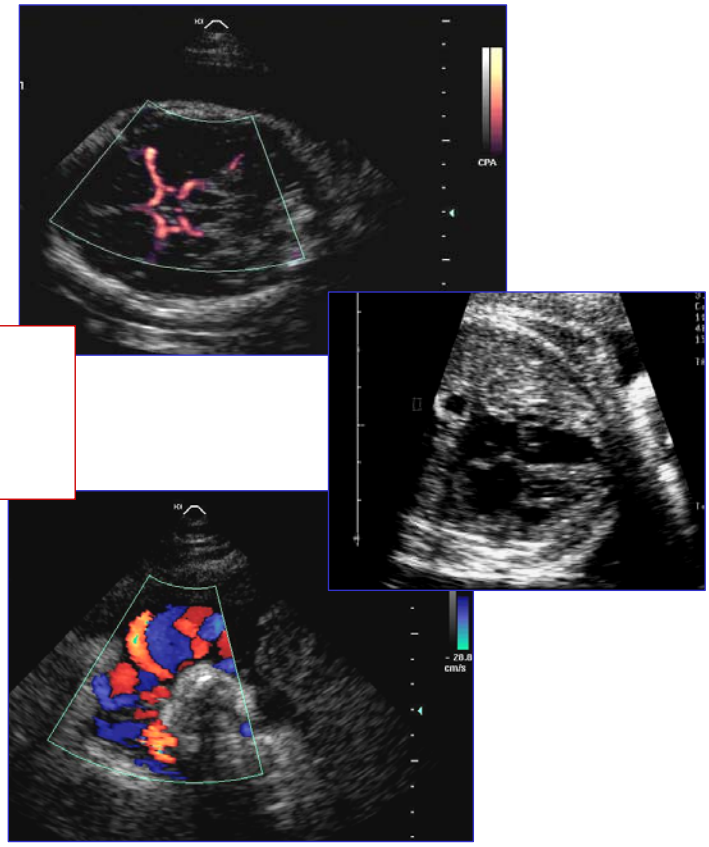
Diffusion gazeuse placentaire

Circulation foetale

Diffusion gazeuse capillaire

Respiration cellulaire foetale

Développement cardiocirculatoire foetal



CIRCULATIONS MATERNELLES ET FŒTALES (Plan)

- **RAPPELS ANATOMIQUES**
- **CIRCULATION UTERINE**
  - Anatomie
  - Grandeurs Physiologiques
- **CIRCULATION OMBILICALE**
  - Anatomie
  - Débit Ombilical
- **CIRCULATION FŒTALE**
  - Caractéristique
  - Régulation
- **TRANSFERT DES GAZ RESPIRATOIRES**
  - Transfert de l 'oxygène
  - Transfert du gaz carbonique
- **ADAPTATION DU NOUVEAU-NE A LA VIE AERIENNE**
  - Modifications subies par le circuit aérien
  - Modifications subies par le circuit vasculaire pulmonaire
  - Suppression de la circulation ombilicale
- **EXPLORATIONS FONCTIONNELLES DES CIRCULATIONS FOETO-MATERNELLE** (applications en clinique humaine)
  - Circulation ombilicale
  - Circulation utérine
  - Circulation cérébrale fœtale
  - Circulation au niveau de l 'isthme de l 'aorte
  - Echographie cardiaque foetale

CIRCULATIONS PLACENTAIRES ET FŒTALES

RAPPELS ANATOMIQUES

Placenta et
Membranes fœtales

8ème - 11ème semaines

- Villosités choriales
- caduque basale
  cavité amniotique
- caduque réfléchie
  cavité utérine
- caduque pariétale

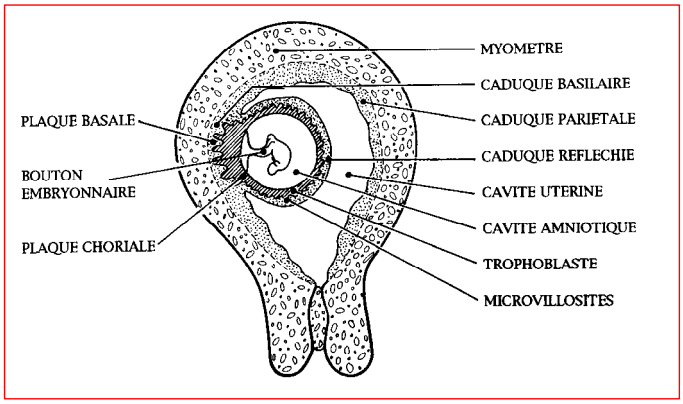
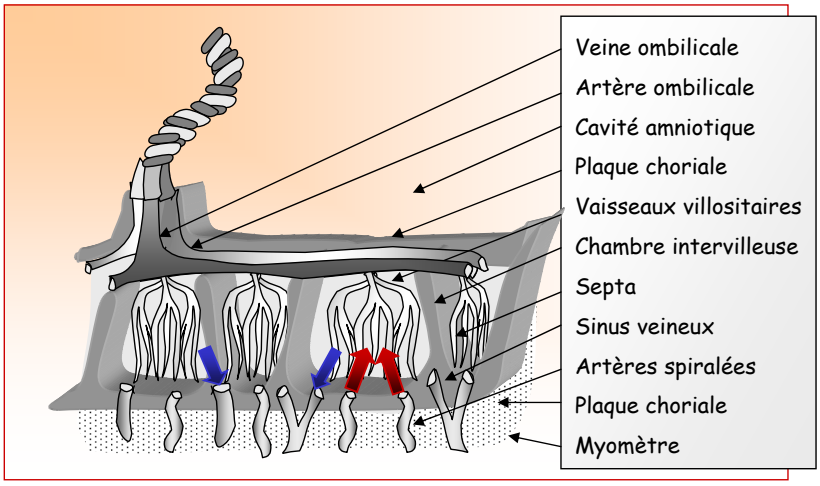


Schéma de l'œuf vers la 10ème semaine d'aménorrhée.

CIRCULATIONS PLACENTAIRES ET FŒTALES

16ème - 20ème semaine
- Accolement des caduques (disparition cavité utérine)
- Villosités choriales
- Nombres diminue (18 à 30)
  - arborisation
  - implantation à la plaque basale
  - développement dans la cavité intervilleuse



4ème mois

Cavité intervilleuse divisée en 18 à 30 (22) chambres intervilleuses

A chaque chambre intervilleuse
(Cotylédon maternel)
correspond une arborisation villositaire
(Villosité choriale)

Placenta humain de type *hémochorial*

Surface d 'échange de plusieurs m^2

Lieu des échanges
-gazeux et métaboliques
- substrats et déchets
- sécrétion d 'hormones.

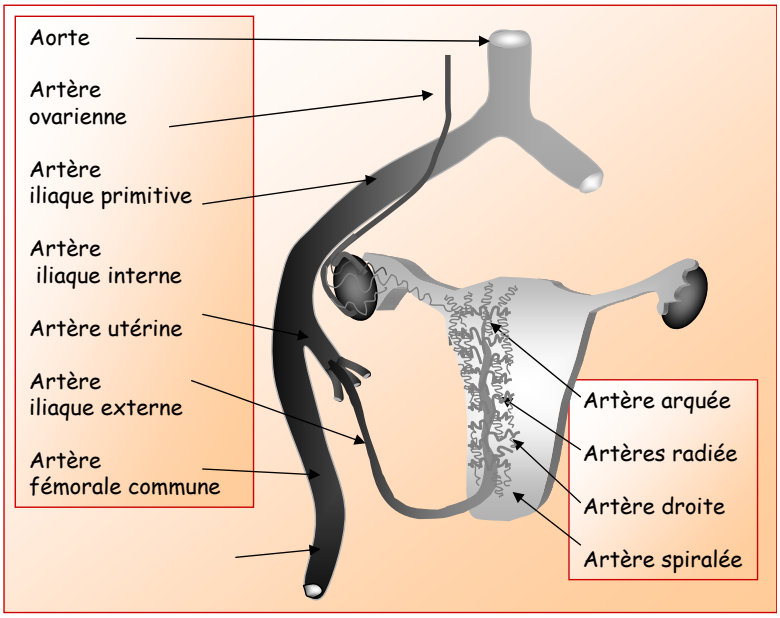
CIRCULATION UTERINE

ANATOMIE

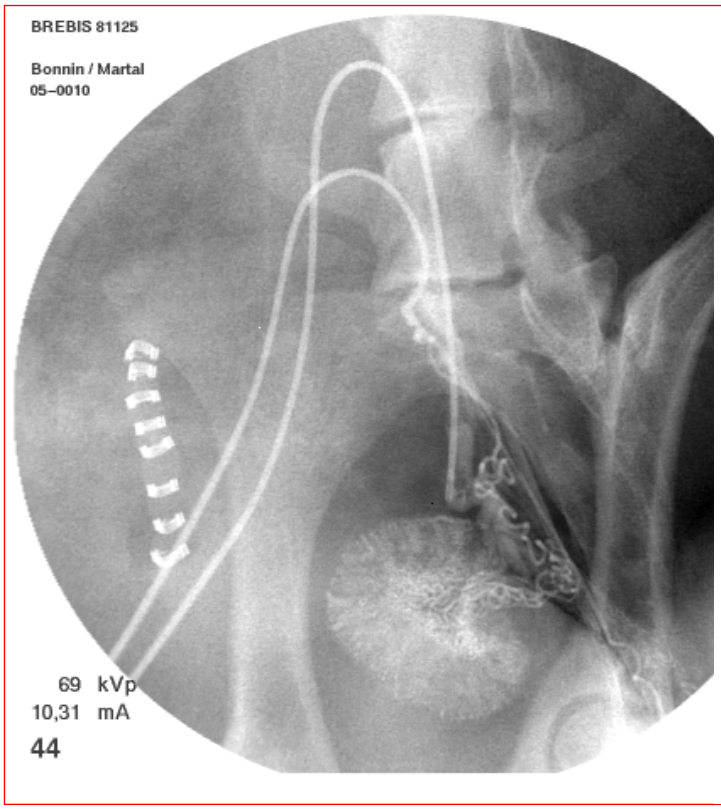
Aorte

- Artères Iliaques Primitives (artères ovariennes)
- Artère Hypogastriques
- Artères Utérines
- Artères -Arquées
  - Radiées
  - Spiralées (80 mmHg)

- Espace intervilleux (10 mmHg)
  - Sinus marginaux (10 mmHg)
  - Orifices veineux (8 mmHg)
  - Veines hypogastriques
  - Veines iliaques primitives
    - **Veine Cave inférieure**



CIRCULATION UTERINE



Cathétérisme sélectif de l'artère et de la veine utérines gauches chez la brebis.

•aborde l'utérus dans la partie médiane du corps
•monte le long de la face latérale de l'utérus vers la corne
•donne de nombreuses branches collatérales qui irriguent l'organe réalisant ici un véritable "parenchymogramme".
•La veine est plus large et parallèle, son trajet est ici indiqué par le cathéter poussé le plus loin.

Artère ovarienne
chez la brebis.

injectée à partir de son ostium au niveau de l'aorte abdominale

trajet oblique vers l'ovaire et son peloton au contact de la veine utéro-ovarienne non visible ici.

CIRCULATION UTERINE

GRANDEURS PHYSIOLOGIQUES

Volume sanguin : 150 à 200 ml dans l 'espace intervilleux

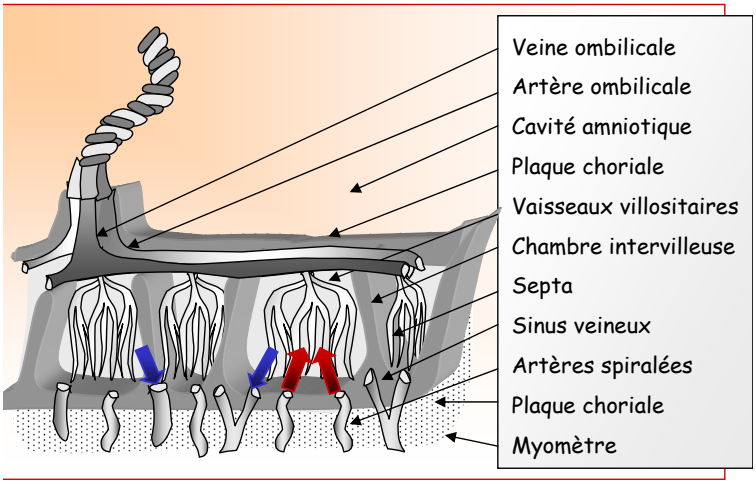
Vitesses circulatoires :

Au centre du cotylédon : 10 mm/s
En périphérie : 0,1mm/s

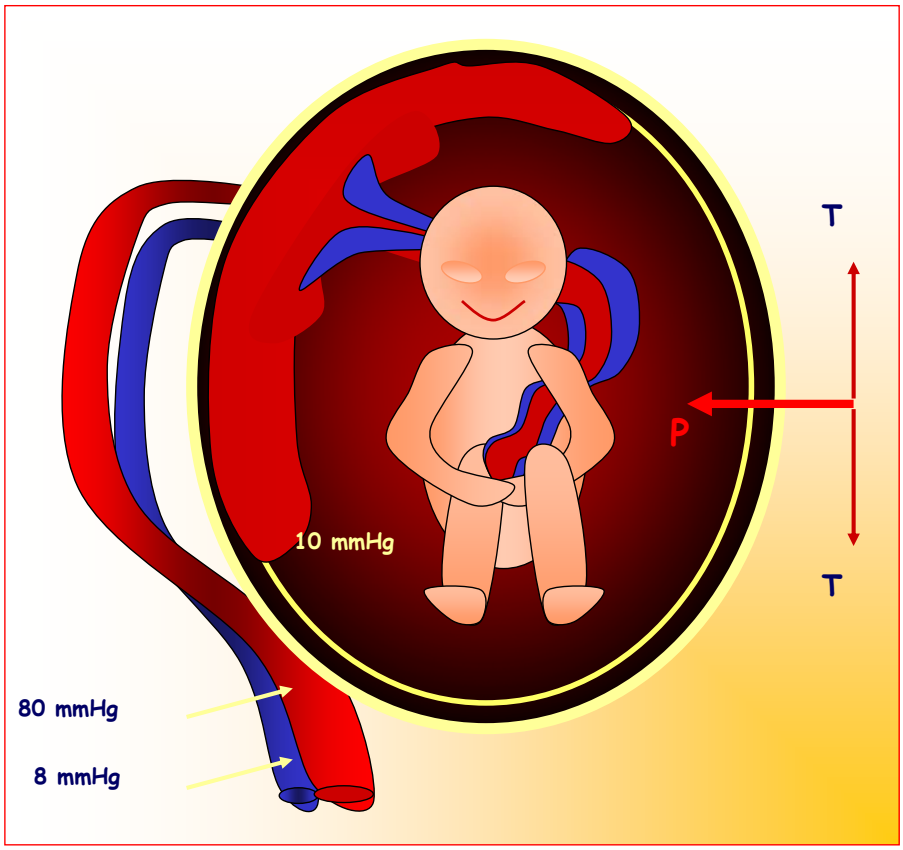
Débit : Débit utérin total (caduques + placenta + myomètre) : 500 à 700 ml/min

Circulation en vasodilatation maximale non sensible aux variations des gaz du sang
Oestrogènes - Endothéline - NO - Prostaglandies PGE PGI_2

Adrénaline ➔ diminution du débit utérin

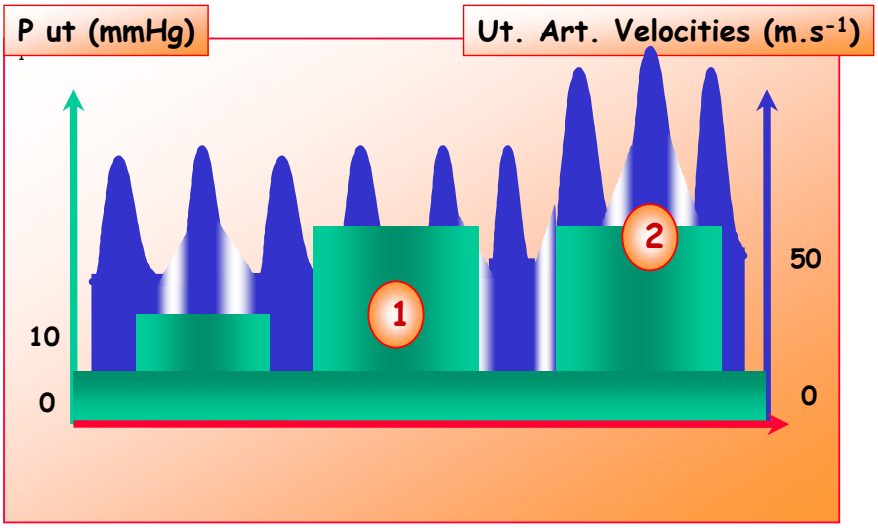


Modifications lors des contractions utérines

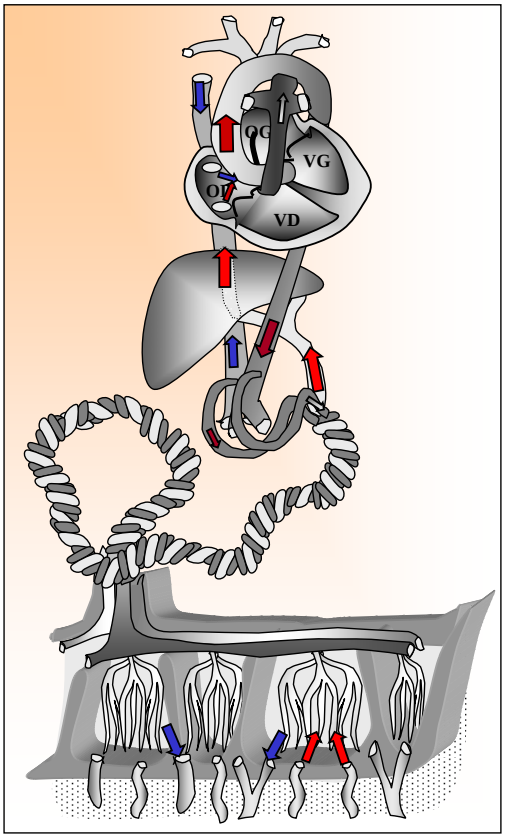


Effet « waterfall » : effect de

1. l'augmentation de la tension utérine
2. l'augmentation de la PA maternelle



CIRCULATION OMBILICALE



ANATOMIE

Aorte foetale

- (+/-) Artères Iliaques Primitives
- Artères Ombilicales (x2)

↳ Cordon ombilical, arborisation sur la plaque choriale

pénétration dans chaque arbre villositaires

(capillaires villositaires)

Contact avec le sang maternel contenu dans l'espace intervilleux au travers de la barrière placentaire

retour veineux parallèle dans les villosités

drainage par une Veine Ombilicale

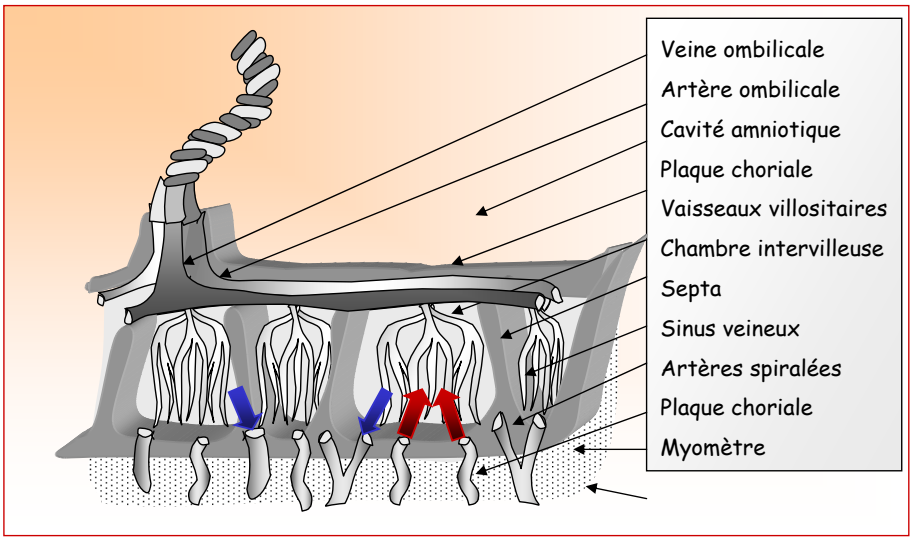
cordon ombilical ⇦

Canal d'Arantius (ductus veinosus) (lobe gauche du foie)

Veine cave inférieure fœtale

DEBIT OMBILICAL

110 à 120 ml/min/kg (poids fœtal)
Régulation passive (pas d'innervation)
Représente 30 % du débit cardiaque fœtal (DCC)
DCC dépend :
- VES invariable
- Fc
- (intérêt de l'enregistrement des RCF en clinique)



CIRCULATION FŒTALE

CARACTERISTIQUES

un circuit extracorporel (circulation ombilicale)
2 shunts « droit-gauche » (foramen ovale, canal artériel)
2 ventricules en parallèles (débit Cardiaque Combiné)

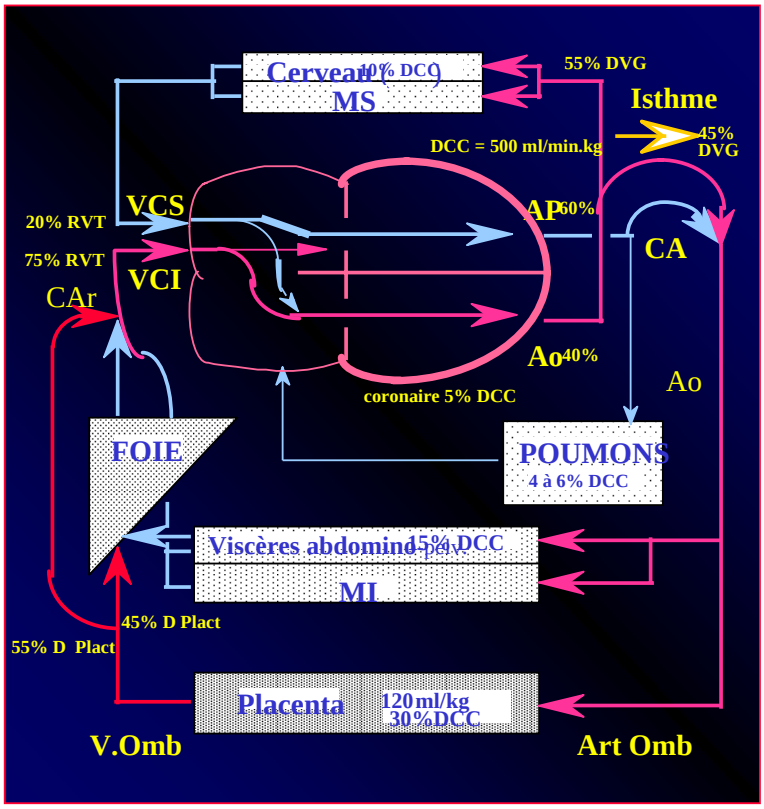
REGULATION

Fcf et Paf varient en fonction de
Mouvements somatiques
Mouvements respiratoires
Etat de veille-sommeil

Différences fonctionneles par rapport à l 'adulte

DCC élevé (500 ml/min.kg, ↘Fcf) ;
PA basse (PAM # 40 mmHg)
Fcf élevée (120-160 bpm) ;
Rh syst basses

CIRCULATION FŒTALE NORMALE



DCC : débit cardiaque combiné, DVG : débit ventriculaire gauche,
Ao : aorte, AP : artère pulmonaire, Car : canal d'Arantius,
CA: canal artériel,
VCI : veine cave inférieure,
VCS : veine cave supérieure,
RVT : retour veineux total,
MI : membres inférieurs,
MS : membres supérieurs.

DCC = débit VG (40%) + débit VD (60%),

DCC = débit systémique (70%)
+ débit placentaire (30%),

DCC = débit coronaire (5%)
+ débit cérébral (10%)
+ débit pulm. (4 à 6%)
+ débit viscères (15%)
+ débit placentaire (30%)
+ débit squelette, muscles (35%),

RVT = débit VCI (75%) +
débit VCS (20%) +
débit sinus coronaire (5%).

Développement pulmonaire foetal

Développement pulmonaire foetal

Origine

Endoderme : Epithélium trachéo-bronchique et alvéolaire
Glandes annexes

Mésoderme : Cartilage
Muscles lisse bronchique
Vaisseaux pulmonaires
Vaisseaux lymphatiques
Tissu interstitiel

Origine

Endoderme

mis au contact du

Mésoderme

développement in vitro
d 'un arbre bronchique

Développement pulmonaire foetal

Stade

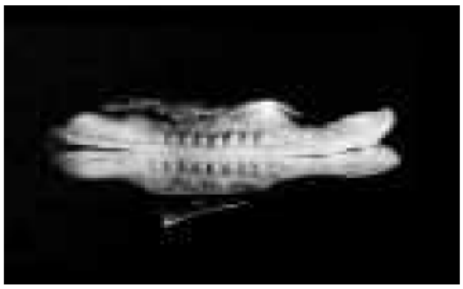
Embryonnaire : Trachée, Bronches souches, bronches lobaires J25 ➔ J50

Glandulaire : Division par dichotomie bourgeons terminaux J50 ➔ S16
jusqu 'à 15 - 20 générations

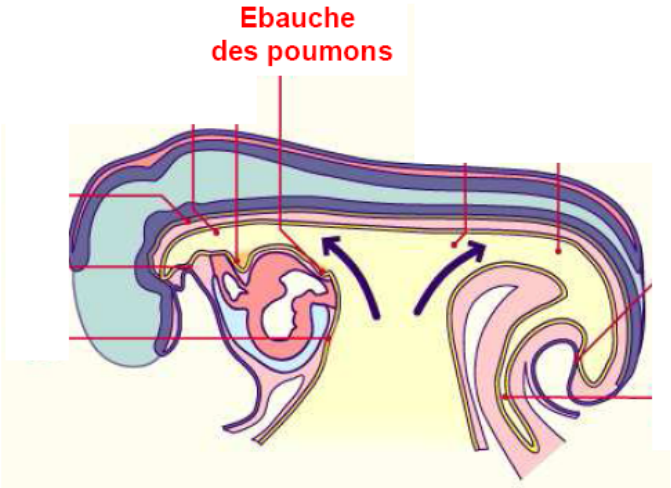
Canaliculaire :MISE EN PLACE DE L 'UNITE FONCTIONNELLE S16 ➔ S26
ACINUS PULMONAIRE, délimitation, invasion capillaire
différentiation cellulaire (Type I et type II),
apparition du liquide pulmonaire, du surfactant.
ACINUS : bronchiole respiratoire,
2-4 générations de bronchioles respiratoires
6-7 générations de bourgeons ➔ Saccules resp.

Sacculaire : ➔ développement des saccules terminales
(alvéoles après la naissance)

Stade embryonnaire: sillon laryngotrachéal vers 28 jours



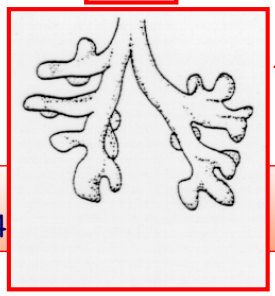
2 à 3.5 mm



Stade embryonnaire

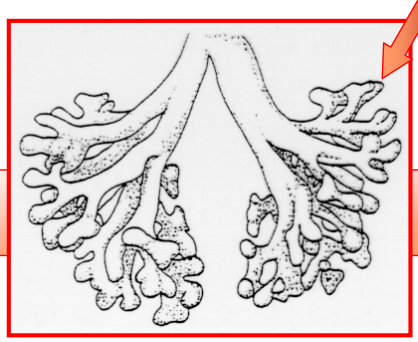
Longueur de l 'embryon (mm) 5
âge de l 'embryon (jours) 27

5
30



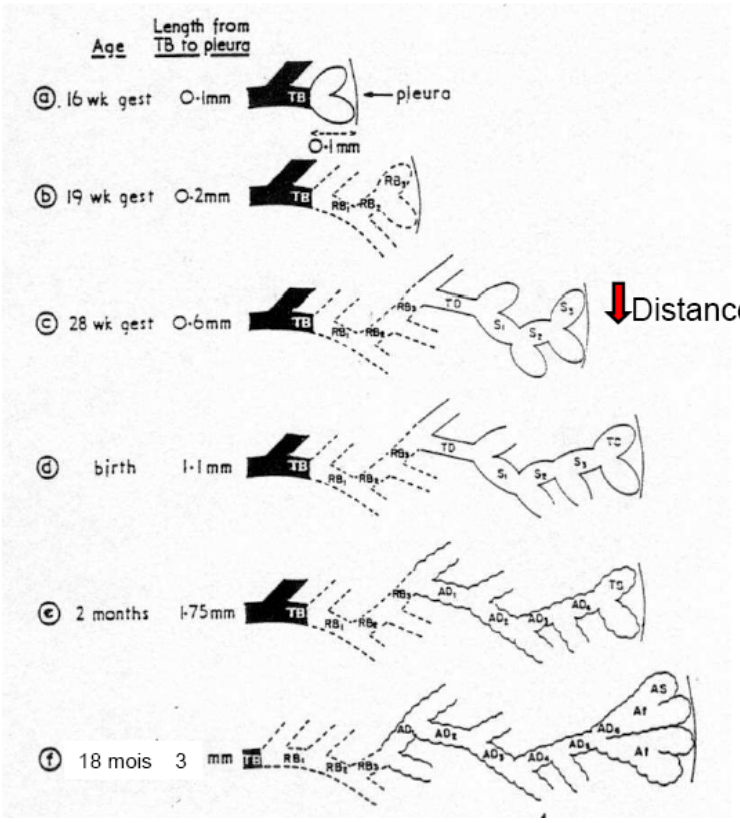
Longueur de l 'embryon (mm) 13
âge de l 'embryon (jours) 34

17
37



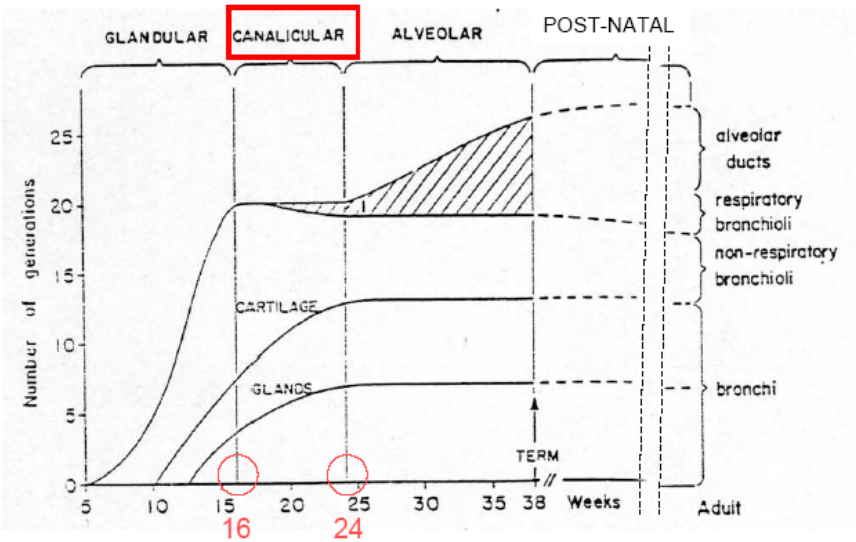
Longueur de l 'embryon (mm) 20
âge de l 'embryon (jours) 40

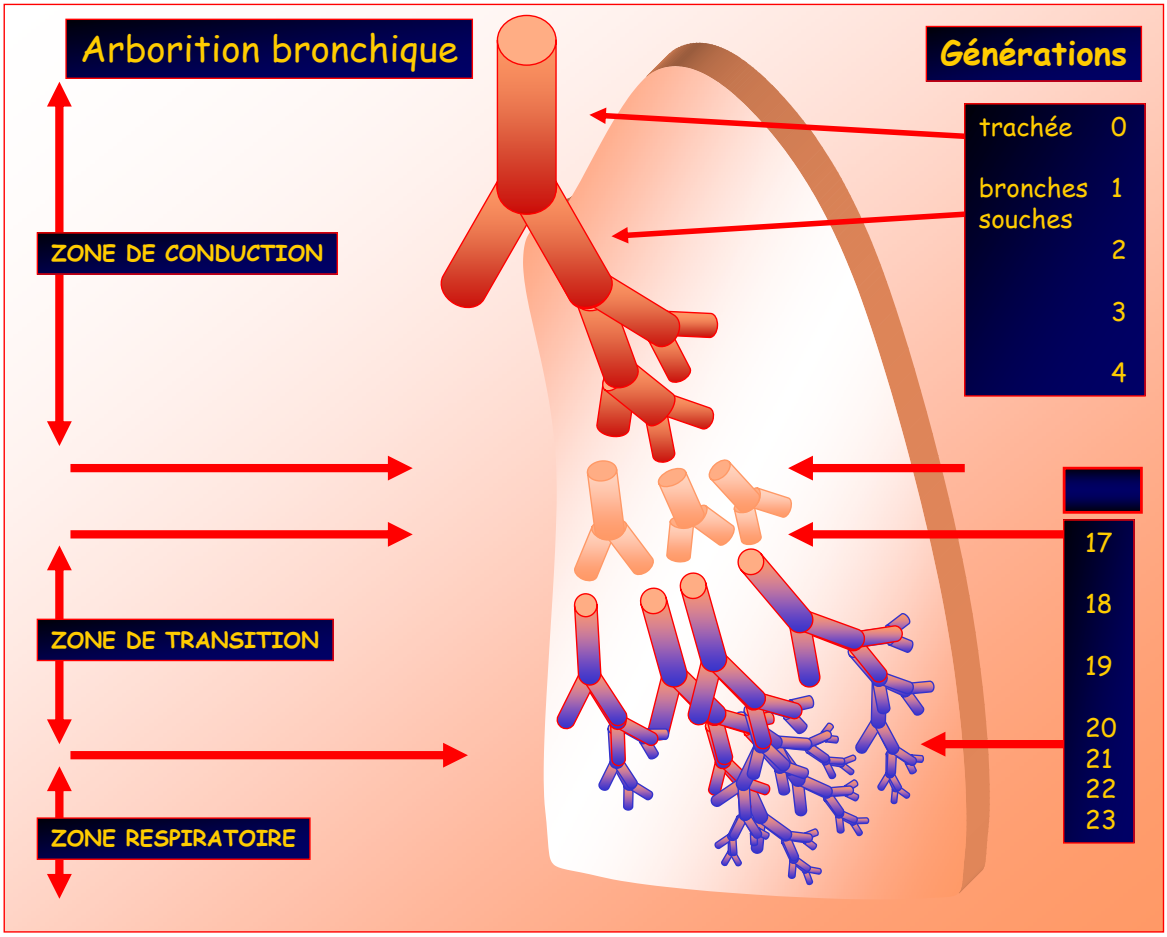
Formation de l'acinus

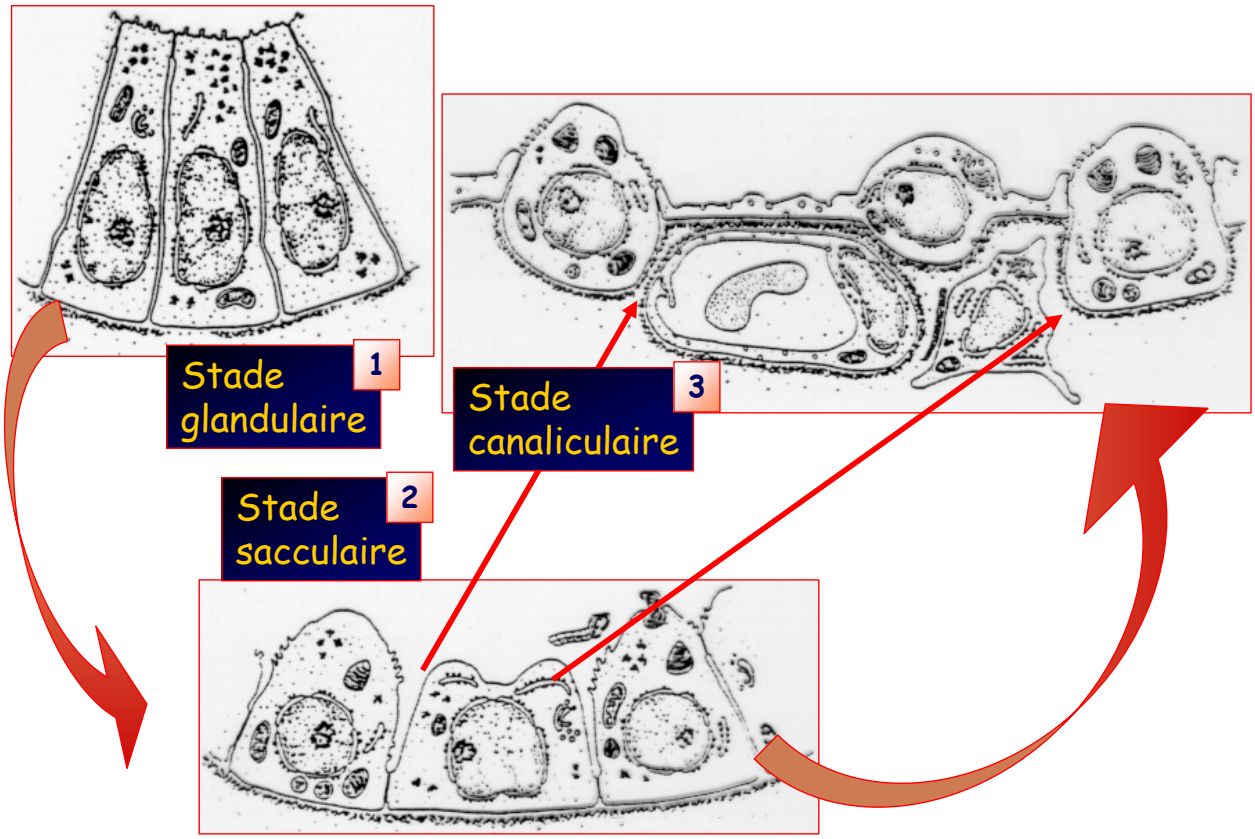


Distance alvéole-sang

Développement de l'arbre respiratoire

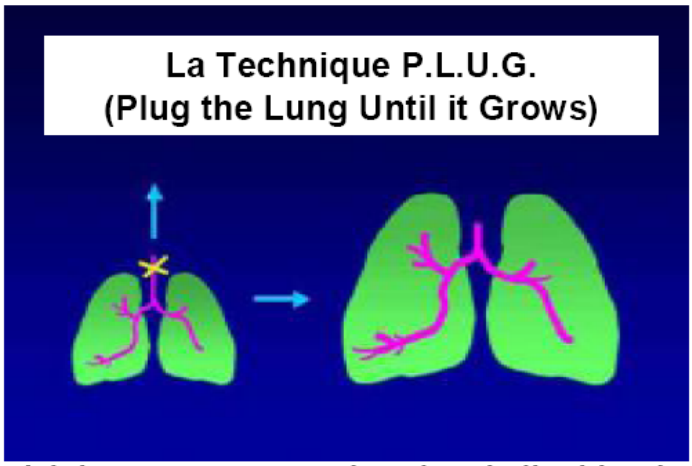



Arborition bronchique
Générations
trachée 0
bronches souches 1
2
3
4
ZONE DE CONDUCTION
17
18
19
20
21
22
23
ZONE DE TRANSITION
ZONE RESPIRATOIRE


Stade glandulaire
1
Stade canaliculaire
3
Stade sacculaire
2

Adaptation respiratoire : liquide pulmonaire

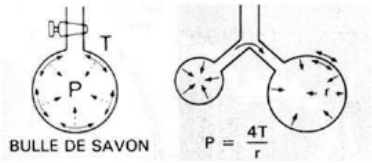
- Sécrétion permanente: formation d'une partie du liquide amniotique par transfert actif de Cl- (250 ml/j à terme)
- Détermine la taille des alvéoles et la capacité résiduelle fonctionnelle (CRF)



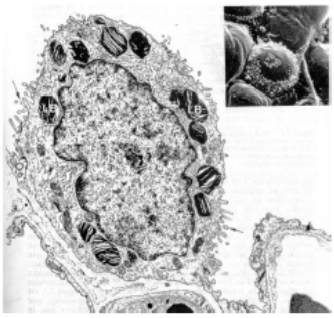
L'occlusion trachéale provoque une rétention du liquide sécrété par le poumon ; la tension exercée par le liquide force la croissance du poumon

Adaptation respiratoire :

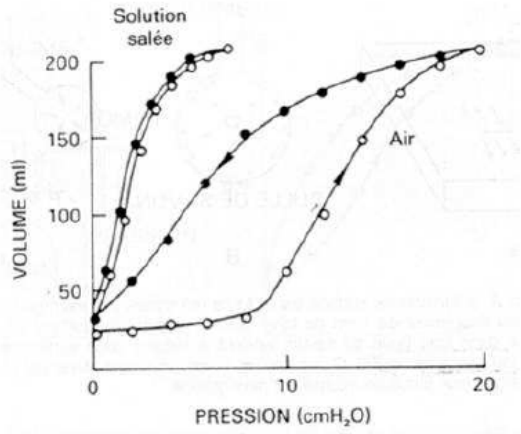
Propriétés tensioactives et surfactant (**Surf**ace **ac**tive age**nt**)



Loi de Laplace (alvéole bordé de liquide):
$P = 2T / r$



Pneumocyte II (Weibel)

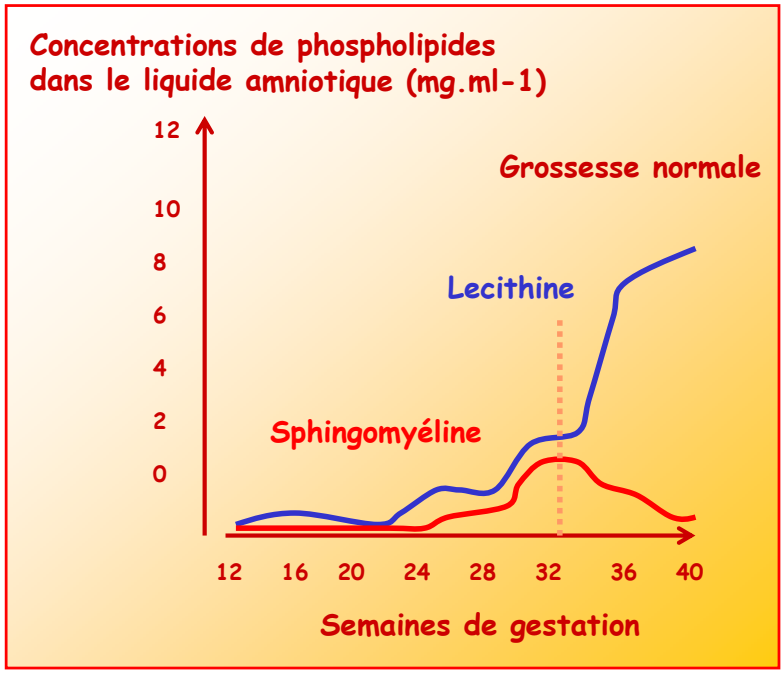


Poumon de chat ± solution salée qui abolit les forces de tension superficielles

Amniocentèse

- …
- degré de maturité du poumon fœtal en cas de risque de prématurité (**Surf**ace **ac**tive age**nt**)

Grossesse normale

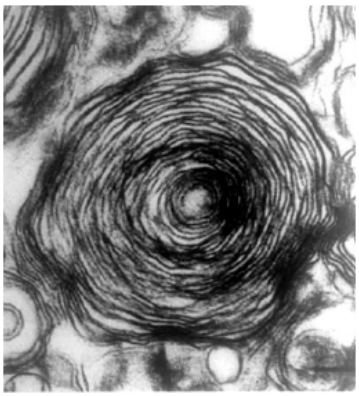


Les concentrations de lipides précipitables (surface active) de lécithine et de sphyngomyéline sont comparables dans le liquide amniotique jusqu 'à 30-32 SG.

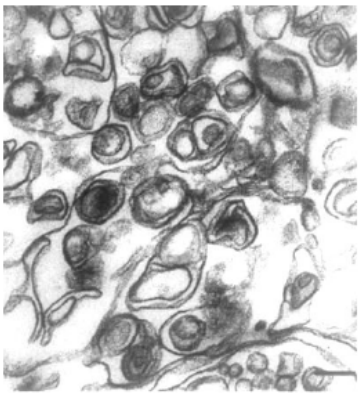
Après 32 SG, la concentration de lécithine augmente considérablement alors que celle de la sphyngomyéline diminue jusqu 'au terme.

Les poumons sont matures lorsque la concentration de lécithine est supérieure à 10 mg %

SURFACTANT - morphologie



corps lamellaire



corps myéliniques ⟷ myéline tubulaire

ÉPITHÉLIUM ALVÉOLAIRE

- **pneumocytes II**

  rôles:

  - synthèse et recyclage du surfactant

  - réparation alvéolaire *(régénération épithéliale et interactions avec les cellules mésenchymateuses)*

  - rôle immunomodulateur *(par contact direct ou par la production de nombreux médiateurs)*

SURFACTANT PULMONAIRE

- rôles:

  - abaissement de la tension superficielle à la surface alvéolaire

  - augmentation de la stabilité et de la compliance pulmonaires

  - maintien d'une capacité résiduelle fonctionnelle

... / ...

SURFACTANT PULMONAIRE

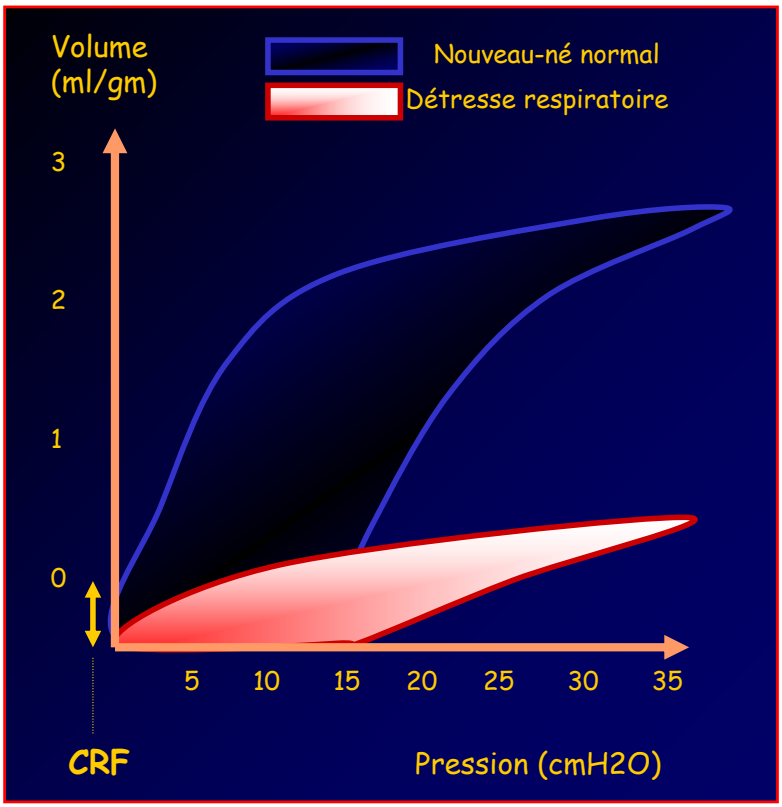
- rôles:

  - humidification de la surface alvéolaire

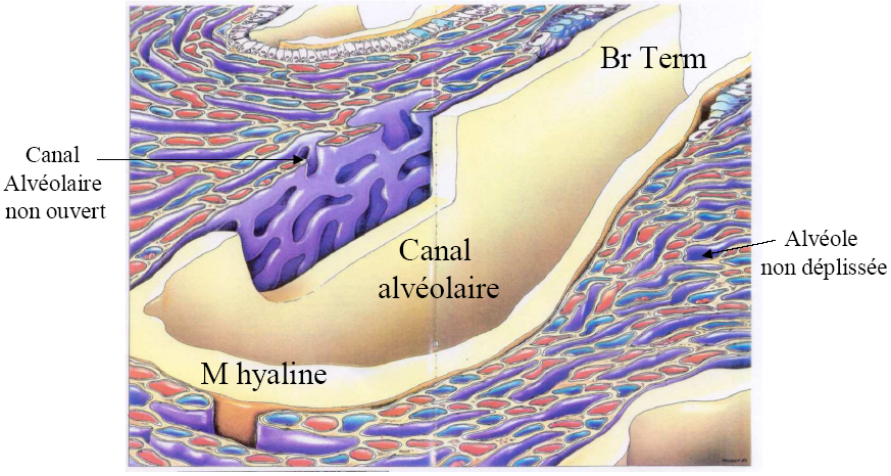
  - effet cytoprotecteur et antioxydant

  - effet favorisant la clairance muco-ciliaire
  (xticouches phospholipidiques à l'interface phase gel / phase sol)

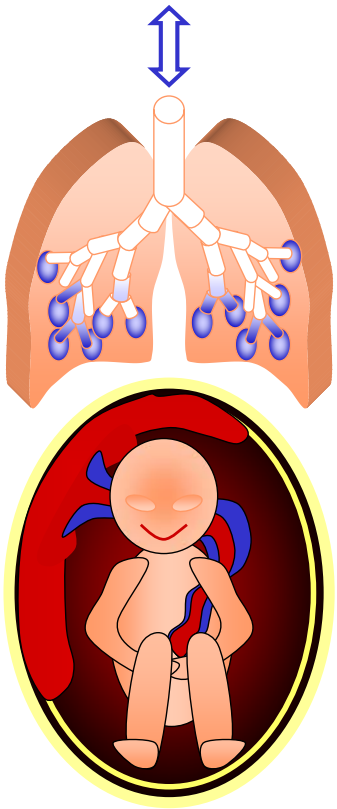
Diagramme Volume / pression des poumons d 'un nouveau-né normal et d 'un nouveau-né en détresse respiratoire.



Syndrome de détresse respiratoire néonatal



Transfert des gaz respiratoires



TRANSFERT DES GAZ RESPIRATOIRES

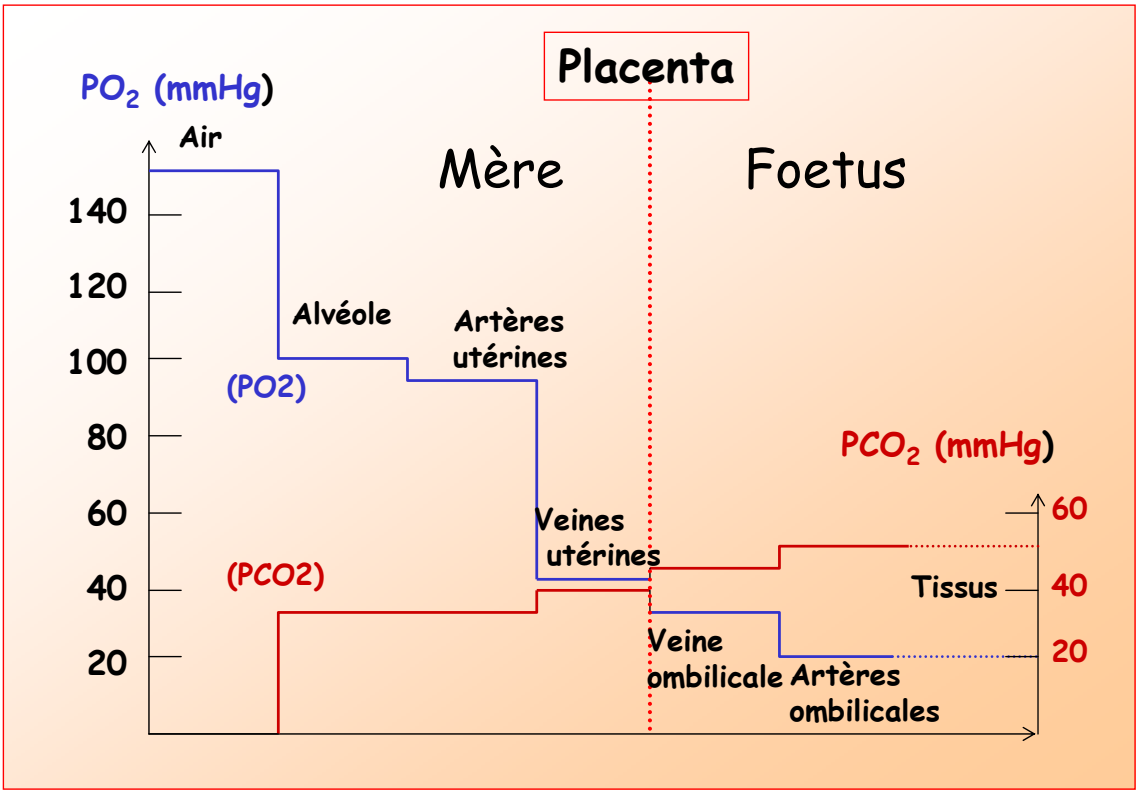
- **TRANSFERT DE L 'OXYGENE**
  - Valeurs des PO_2 maternelles et fœtales (➔ tab.)
    Le gradient de pression partielle est favorable tout le long de la surface d 'échange
  - Courbe de dissociation de l 'oxyhémoglobine maternelle et fœtale (fig.)
  - Double effet Böhr au niveau du placenta
    - Le sang maternel se charge en CO_2 et H+ : ➔ pH baisse ➔ affinité diminue
    - Le sang fœtal inversement : ➔ pH augmente ➔ affinité augmente
  - de plus : (Hb f) = 17 g/100ml
    (Hb m) = 11 g/100 ml

    Malgré des pressions partielles en oxugène fœtales basses, le contenu en oxygène dans le sang artériel ombilical (16 ml/100 ml) (veine ombilicale) est plus grand que dans le sang artériel maternel (15 ml/100 ml) (en dehors de la grossesse : 19 à 20 ml/100 ml, hémodilution physiologique).

TRANSFERT DES GAZ RESPIRATOIRES

- **TRANSFERT DU GAZ CARBONIQUE**
  - Le CO_2 est très diffusible, suit le gradient de pression partielle (Fœtus ➔ Mère)
  - Transfert facilité du fœtus vers la mère par :
    - sa transformation en COOH - par l 'anhydrase carbonique
    - sa combinaison à l 'Hb m (effet Haldane) (baisse de Hb m O_2)

"Cascade de l'oxygène ".

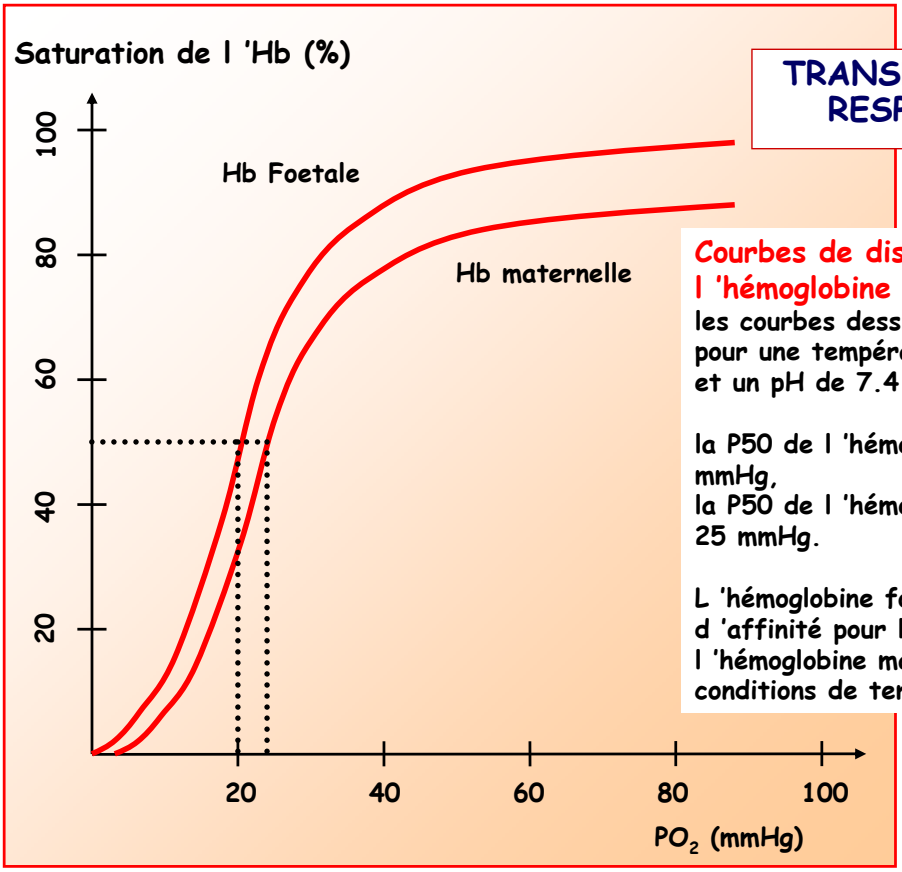


"Cascade de l'oxygène ".

	Sang maternel		Sang ombilical foetal	
	artère	veine	veine	artère
PO2 (mmHg)	95	38	35	22
Hémoglobinémie (g/100 ml)	12	12	16,5	16,5
Capacité en O2 (ml/100 ml)	16,5	16,5	21,5	21,5
Saturation en O2 (%)	98	72	75	50
Contenu en O2 (ml/100ml)	15,5	11,5	16	10
PCO2 (mmHg)	32	40	43	48
pH	7,42	7,35	7,38	7,34

- capacité en O_2 de l'Hb = pouvoir oxyphorique de l'Hb x hémoglobinémie
- pouvoir oxyphorique de l'Hb = quantité d'O_2 fixée par 1 g d'Hb (1,34 ml/g)
- saturation en oxygène de l'Hb = contenu réel en O_2 / capacité en O_2 ,
- : contenu en O_2 = capacité en O_2 x saturation de l'Hb pour la PO_2 locale

TRANSFERT DES GAZ RESPIRATOIRES



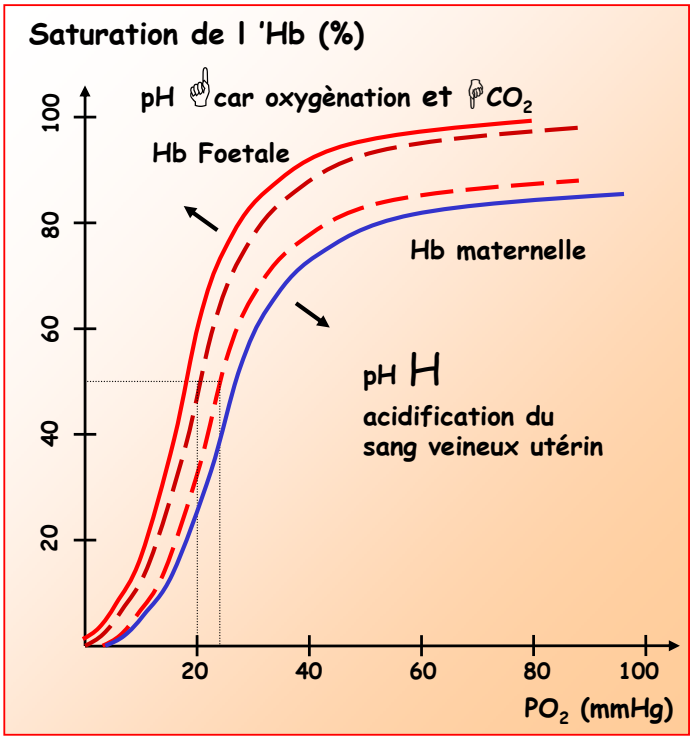
Courbes de dissociation de l 'hémoglobine fœtale et maternelle

les courbes dessinées ici sont acquises pour une température de 37°C et un pH de 7.4

la P50 de l 'hémoglobine fœtale est de 20 mmHg,
la P50 de l 'hémoglobine maternelle est de 25 mmHg.

L 'hémoglobine fœtale a donc plus d 'affinité pour l 'oxygène que l 'hémoglobine maternelle dans les mêmes conditions de température et de pH.

TRANSFERT DES GAZ RESPIRATOIRES



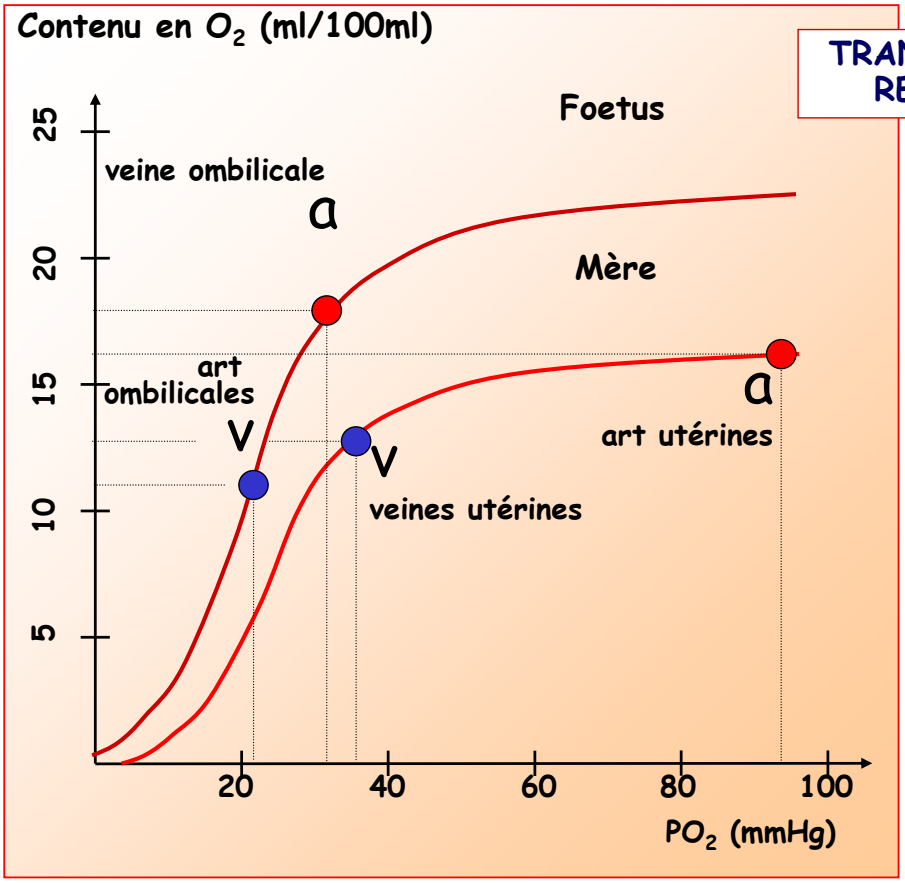
Double effet Bohr :
L 'acidité du sang fœtal (CO2, ion H+, …) passe du sang fœtal vers le sang maternel suivant un gradient de pression.

☞ Le pH sanguin fœtal s 'élève, décalant la courbe de dissociation de l 'hémoglobine fœtale
vers la gauche : l 'hémoglobine fœtale a ainsi plus d 'affinité pour l 'oxygène.

☞ Le pH sanguin maternel s 'abaisse, décalant la courbe de dissociation de l 'hémoglobine
maternelle vers la droite : l 'hémoglobine maternelle perd une part de son affinité pour
l 'oxygène.

Ce double effet Bohr favorise le transfert de l 'oxygène de la mère au fœtus dans le placenta.

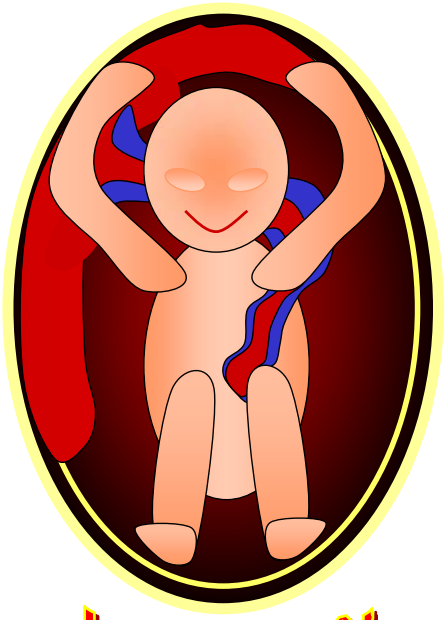
TRANSFERT DES GAZ RESPIRATOIRES



Grâce à la polyglobulie fœtale, malgré des PO2 fœtales basses le contenu en oxygène artériel dans le sang fœtal est élevé.

La Naissance

L 'Adaptation Cardiaque
et Respiratoire
à la Vie Aérienne
est une Urgence vitale



Je suis prêt!

ADAPTATION DU NOUVEAU-NE A LA VIE AERIENNE
PREMIERE URGENCE : ADAPTATION CARDIO-PULMONAIRE

➢ **MODIFICATIONS SUBIES PAR LE CIRCUIT AERIEN**

- ⇨ PASSAGE DU DEFILE GENITAL
  (compression thoracique, expression du liquide)
- ⇨ PREMIERE GOULEE D 'AIR PASSIVE (compliance thoracique)
- ⇨ REFLEXE RESPIRATOIRE (origine ?)
- ⇨ 1ère INSPIRATION (-15 à 20 cm H2O : opening pressure)
- ⇨ 1ère EXPIRATION (+90 cm H2O)

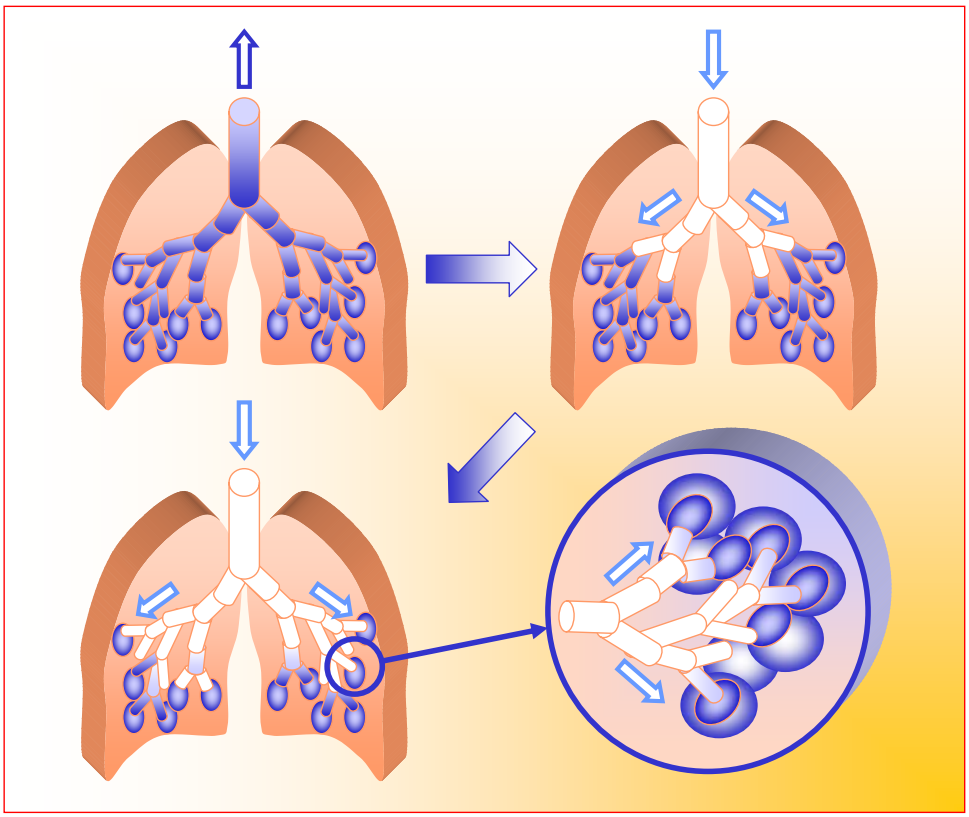
➢ LIQUIDE PULMONAIRE ⇨ INTERSTITIUM ⇨ LYMPHE
➢ CREATION D 'UNE CRF (25 à 30 ml/kg)

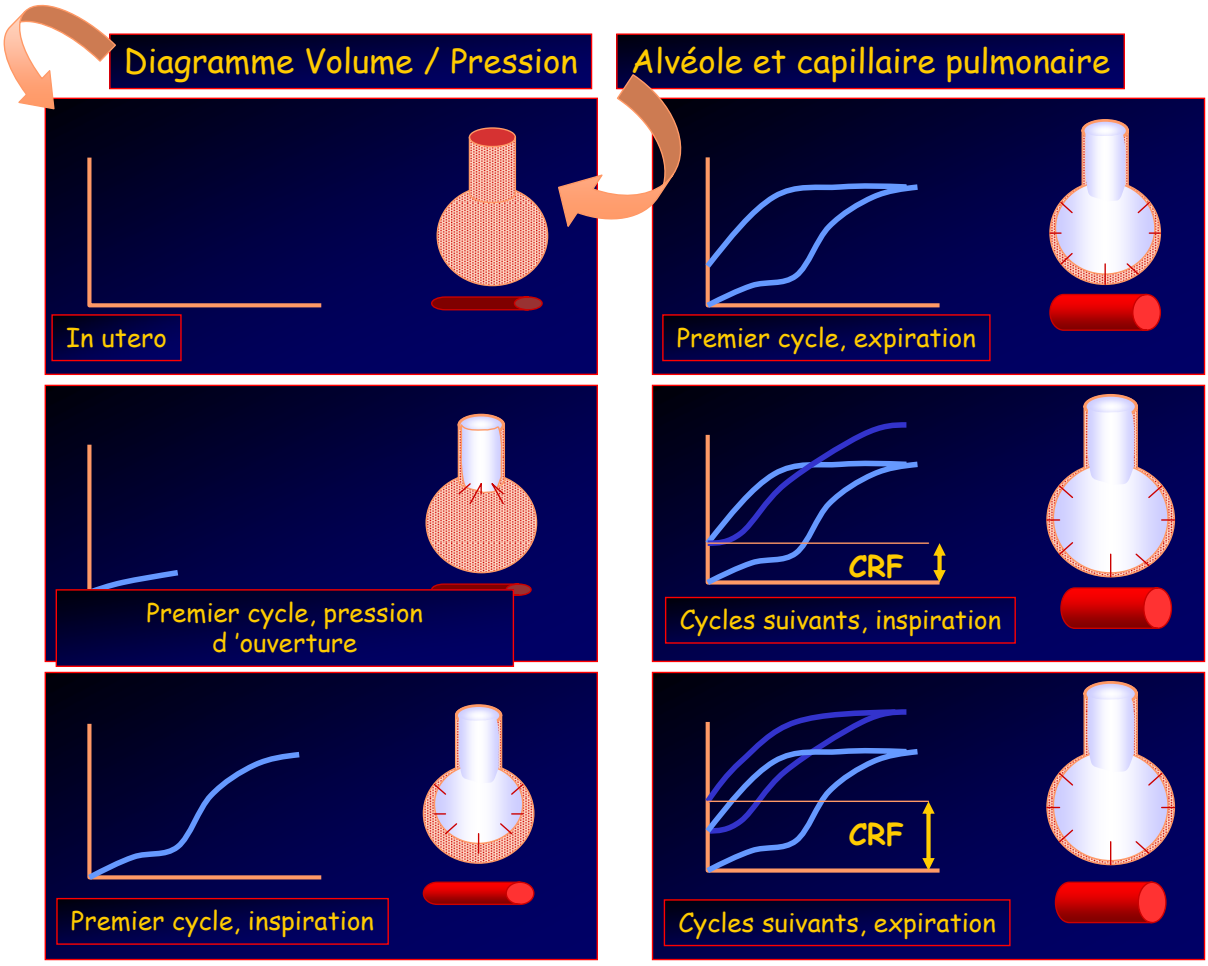
1

➢ **MODIFICATIONS SUBIES PAR LE CIRCUIT VASCULAIRE PULMONAIRE** 2

➢ **SUPPRESSION DE LA CIRCULATION OMBILICALE** 3

Première inspiration : différents stade du déplacement du liquide pulmonaire dans les voies aériennes.





ADAPTATION DU NOUVEAU-NE A LA VIE AERIENNE
PREMIERE URGENCE : ADAPTATION CARDIO-PULMONAIRE

➢ **MODIFICATIONS SUBIES PAR LE CIRCUIT VASCULAIRE PULMONAIRE** (2)

⇨ VENTILATION PULMONAIRE
BAISSE pCO2
AUGMENTATION pO2
⇨ VASODILATATION
⇨ BAISSE Rh PULMONAIRE
⇨ AUGMENTATION Q PULMONAIRE

➢ **SUPPRESSION DE LA CIRCULATION OMBILICALE** (3)

⇨ BRUSQUE AUGMENTATION DES Rh SYST.
SANS AUGMENTATION DE LA PRESSION ARTERIELLE

ADAPTATION DU NOUVEAU-NE A LA VIE AERIENNE
PREMIERE URGENCE : ADAPTATION CARDIO-PULMONAIRE

AU TOTAL

(2) ⇨ BAISSE Pression OD

(3) ⇨ AUGMENTATION Pression OG

⇨ FERMETURE FORAMENT OVALE
⇨ (fermeture du 1er shunt)

(2) ⇨ BAISSE DES Rh PULM

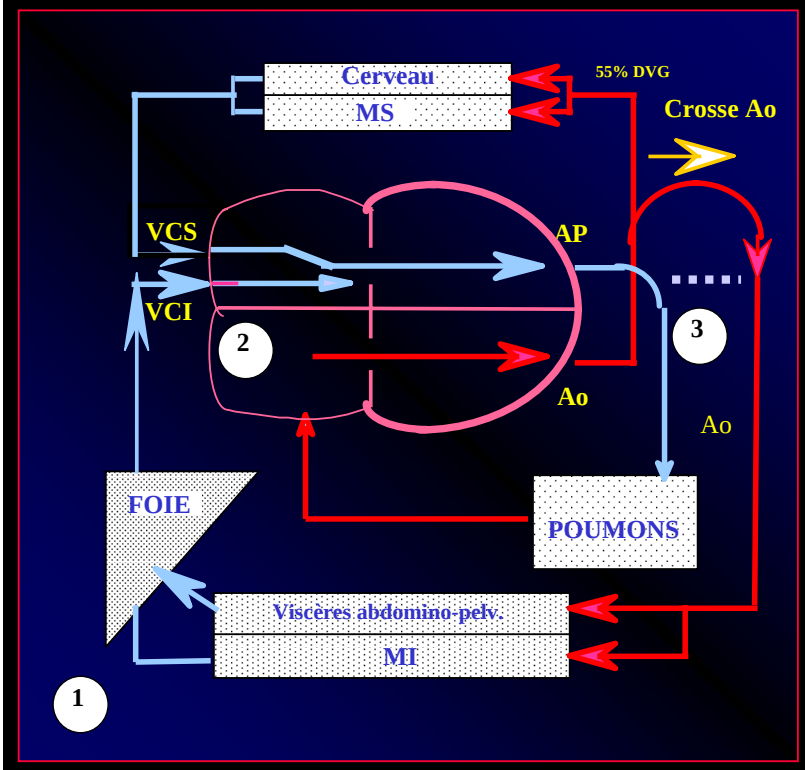
(3) ⇨ AUGMENTATION DES Rh SYST.

⇨ INVERSION DU GRADIENT DE PRESSION DANS CANAL ARTERIEL
⇨ SHUNT GAUCHE - DROIT (*PAROI SENSIBLE A pO2 ELEVEE*)

⇨ VASOCONSTRICTION ⇨ (fermeture du 2ème shunt)

LES DEUX VENTRICULE SONT EN SERIE

ADAPTATION DU NOUVEAU-NE A LA VIE AERIENNE
PREMIERE URGENCE : ADAPTATION CARDIO-PULMONAIRE



L'établissement d'une ventilation pulmonaire

et la fermeture des trois shunts :
canal d'Arantius (1),
foramen ovale (2)
et canal artériel (3),

aboutissent à la constitution d'une circulation de type adulte avec :

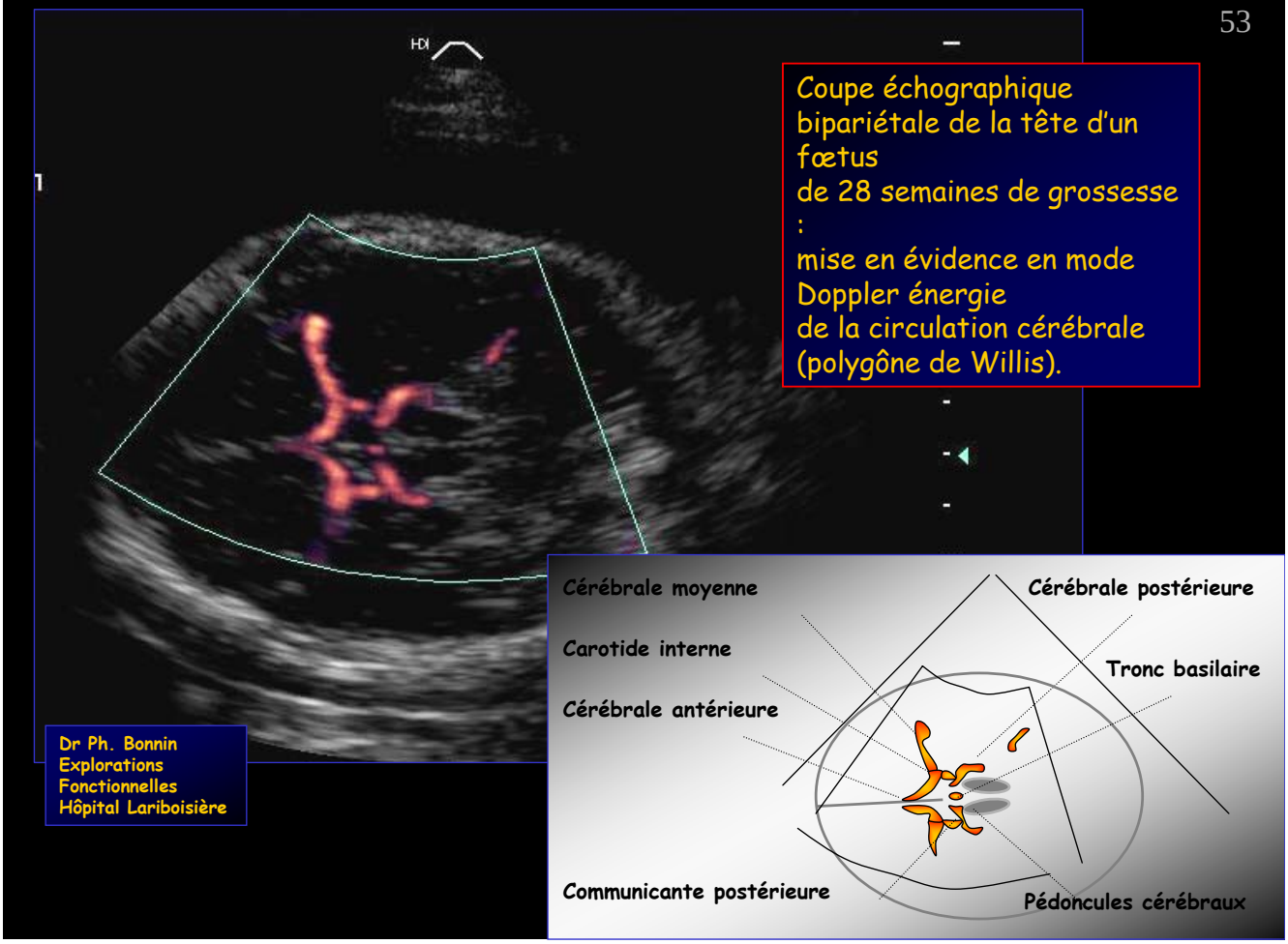
une circulation pulmonaire en série avec une circulation systémique,

un cœur droit en série avec un cœur gauche.

EXPLORATIONS
ECHO-DOPPLER
DES CIRCULATIONS FOETOMATERNELLES
(applications en clinique humaine)

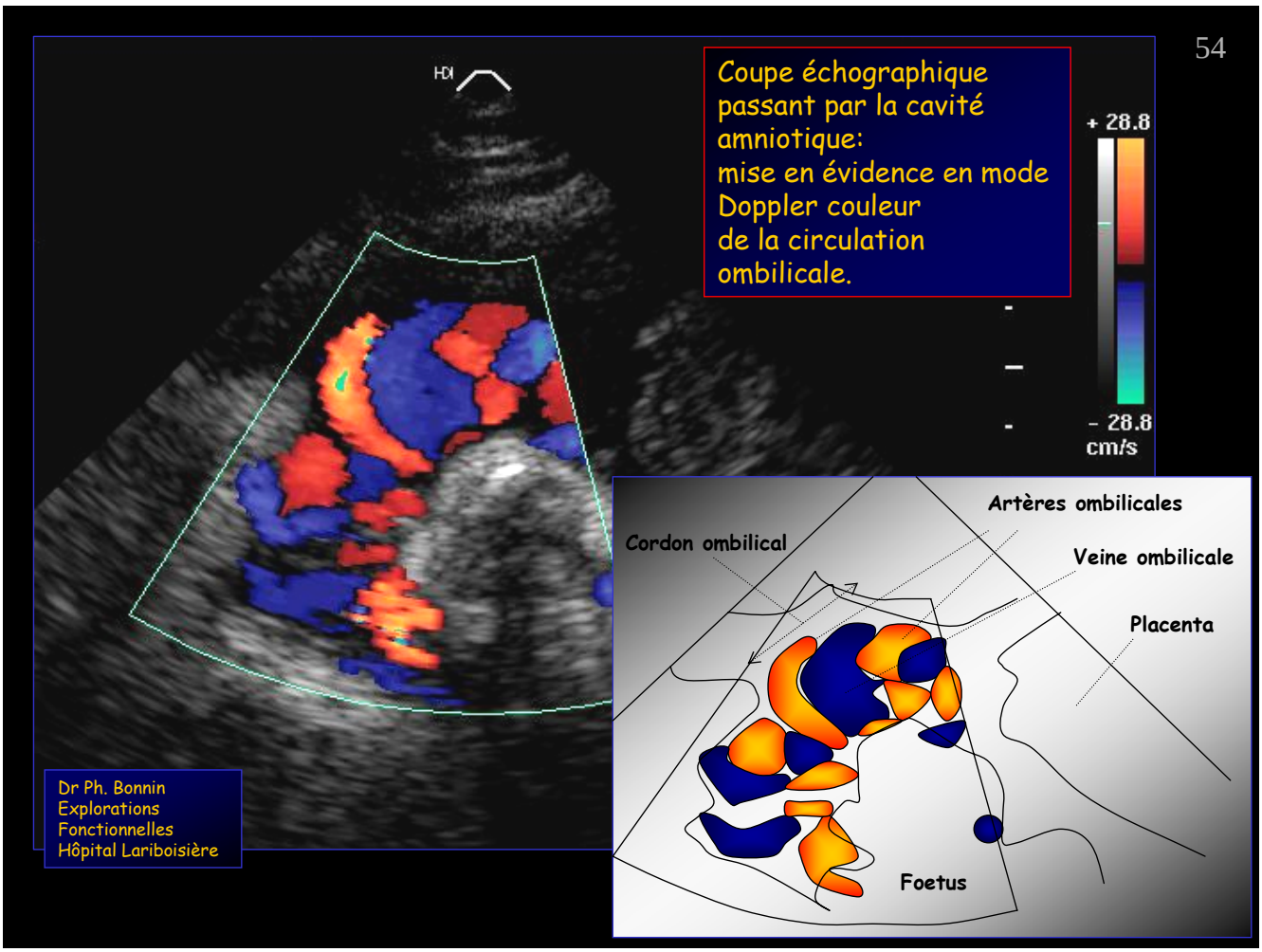
CIRCULATION OMBILICALE
CIRCULATION UTERINE
CIRCULATION CEREBRALE FOETALE
CIRCULATION AU NIVEAU DE L 'ISTHME DE L 'AORTE
ECHOGRAPHIE CARDIAQUE FOETALE

Coupe échographique biparietale de la tête d'un fœtus de 28 semaines de grossesse : mise en évidence en mode Doppler énergie de la circulation cérébrale (polygône de Willis).



Dr Ph. Bonnin
Explorations
Fonctionnelles
Hôpital Lariboisière

Coupe échographique passant par la cavité amniotique: mise en évidence en mode Doppler couleur de la circulation ombilicale.



Dr Ph. Bonnin
Explorations
Fonctionnelles
Hôpital Lariboisière

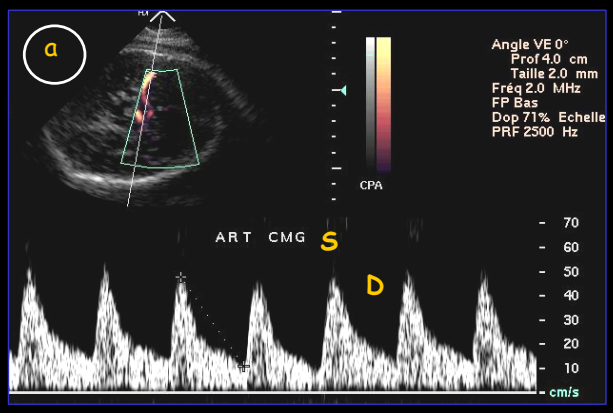
CIRCULATIONS FOETO-MATERNELLES

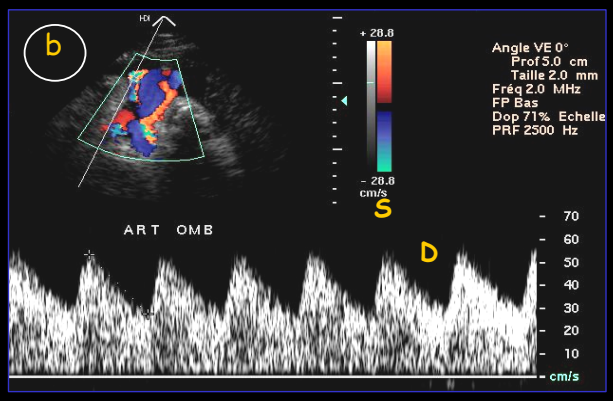
Par effet Doppler, on peut enregistrer les vitesses circulatoires (courbe vélocimétrique) dans les artères cérébrales (a),

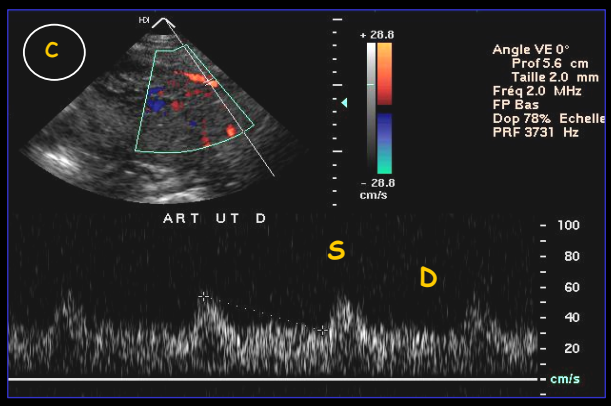
les artères ombilicales (b)

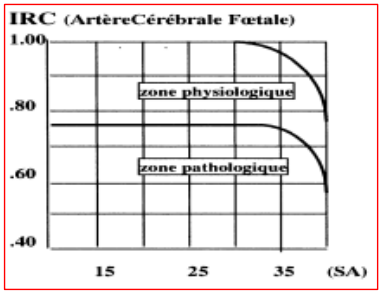
et les artères utérines (c).

Ces différentes artères présentent une modulation systolo-diastolique avec un maximum systolique (S) contemporain de la contraction cardiaque et un minimum en fin de diastole ou télédiastolique (D).
Avec ces vitesses, on peut calculer des indices de résistance ou de pulsatilité qui permettent d'apprécier la normalité de ces circulations

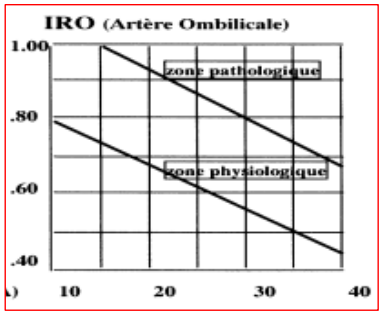




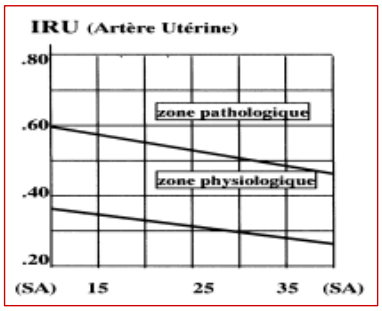




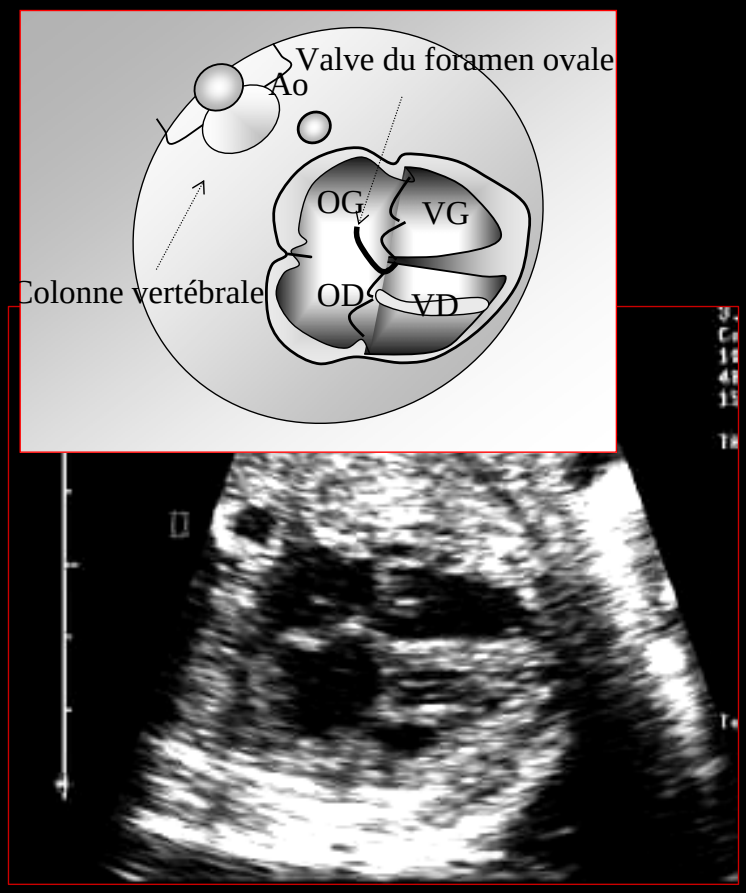
a) Evolution de l'indice de résistance cérébral fœtal au cours de la grossesse (SA: semaines d'aménorrhée), la zone pathologique située au-dessous de la zone physiologique regroupe les indices bas traduisant une vasodilatation anormale de la circulation cérébrale fœtale.



b) Evolution de l'indice de résistance ombilical, la zone pathologique située au-dessus de la zone physiologique regroupe les indices pathologiques traduisant une perturbation circulatoire ombilicale. L'association d'une anomalie sur les circulations cérébrale fœtale et ombilicale traduit une souffrance fœtale.



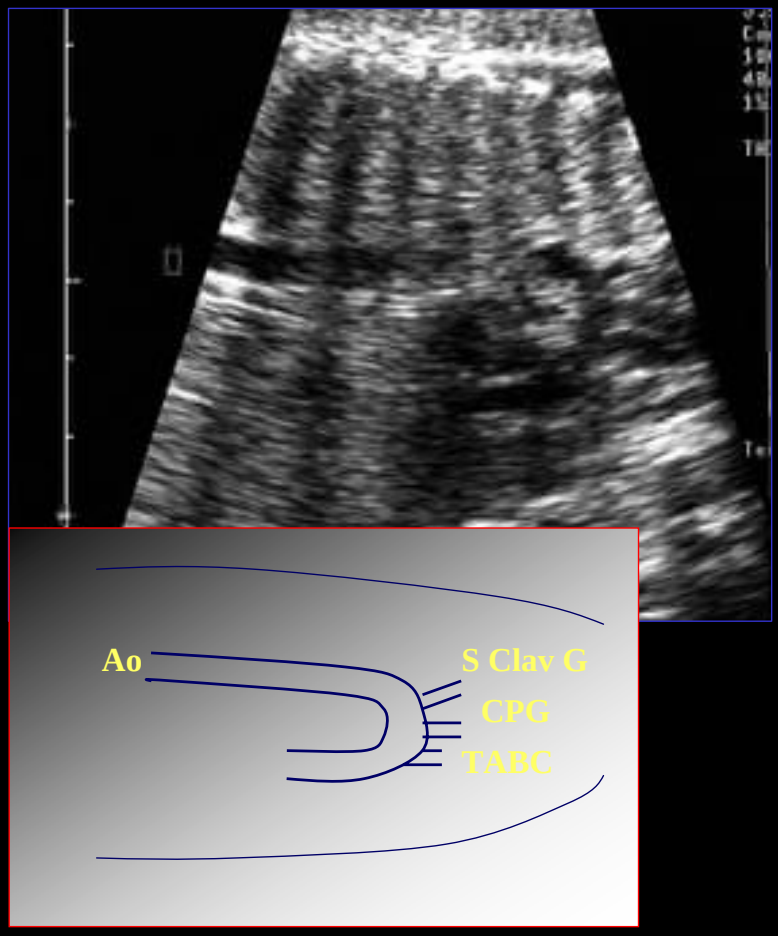
c) Evolution de l'indice de résistance utéro-placentaire, la zone pathologique située au-dessus de la zone physiologique regroupe les indices pathologiques traduisant une perturbation circulatoire utérine, une insuffisance d'augmentation du flux diastolique donc du débit.



Echocardiographie fœtale.

"Coupe quatre cavités"

montrant le cœur droit avec son ventricule, charnu, et son oreille, le cœur gauche avec son ventricule et son oreillette où bat la valve du foramen ovale ou trou de Botal. En arrière de l'oreillette gauche, on visualise l'aorte descendante en coupe transversale.



Echocardiographie fœtale.

Arc aortique fœtal.

On visualise l'émergence des trois troncs supra-aortiques : tronc artériel brachio-céphalique, carotide primitive gauche et artère sous-clavière gauche

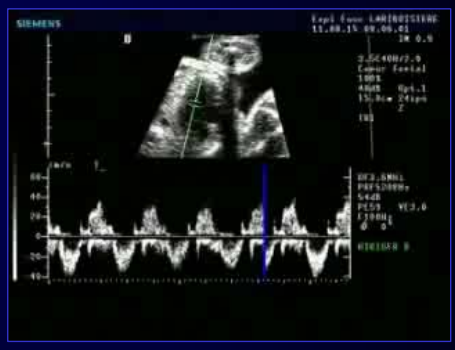
SIEMENS MME BANGALI

SIEMENS

SIEMENS

SIEMENS MME BANGALI

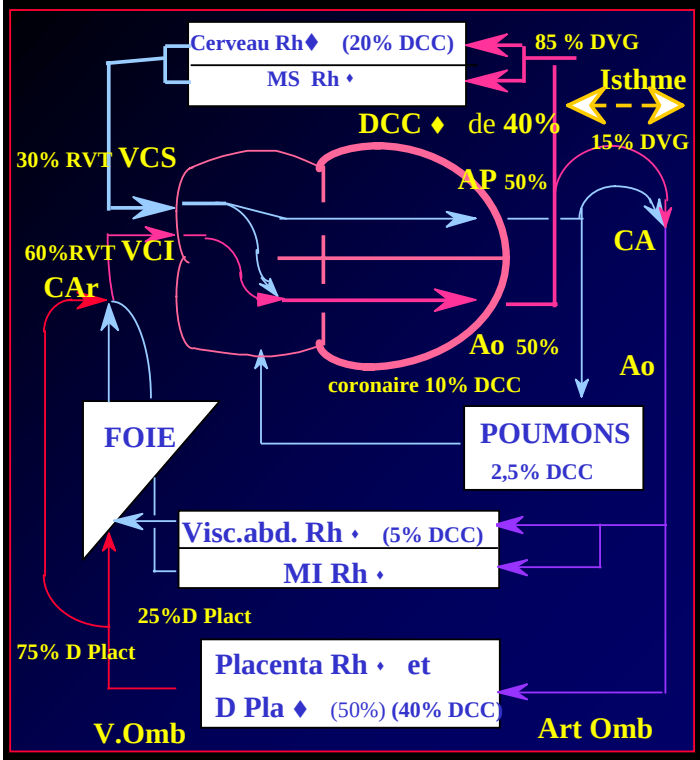
SIEMENS


SIEMENS

Souffrance fœtale
d 'origine placentaire

- Redistribution vasculaire fœtale
- Toxémie gravidique

REDISTRIBUTION VASCULAIRE



Lorsque le débit sanguin ombilical diminue devant l'augmentation des résistances placentaires, on observe une baisse du débit cardiaque combiné (DCC) et une modification de sa distribution dans l'organisme fœtal.

(Les valeurs chiffrées sont indicatives et données à partir de la littérature).

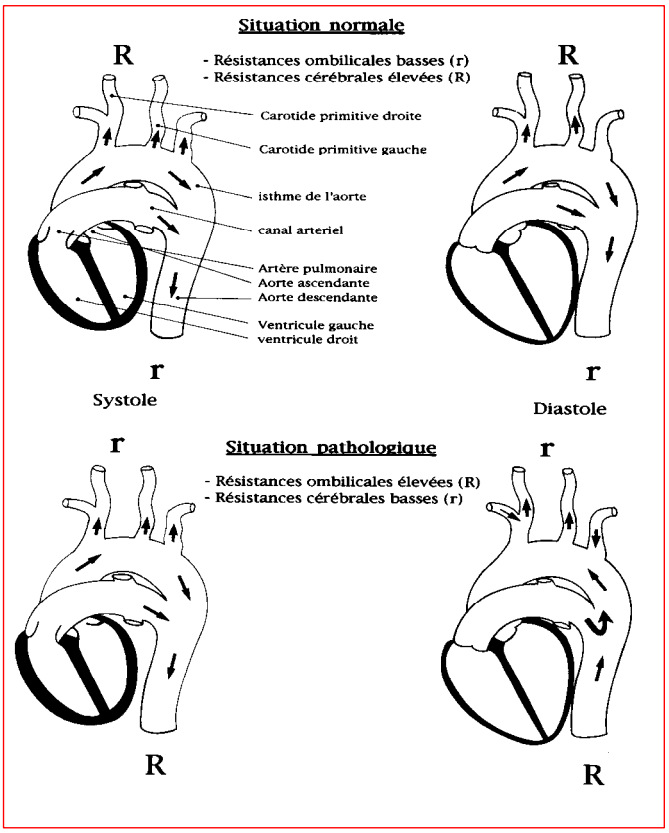
DCC = débit VG (50%) + débit VG (50%),

DCC = débit systémique (60%) + débit placentaire (40%),

DCC = débit coronaire (10%) + débit cérébral (20%) + débit pulmonaire (2,5%) + débit viscères (5%) + débit placentaire (40%) + débit squelette, muscles (22,5%).

RVT = débit VCI (60%) + débit VCS (30%) + débit sinus coronaire (10%).

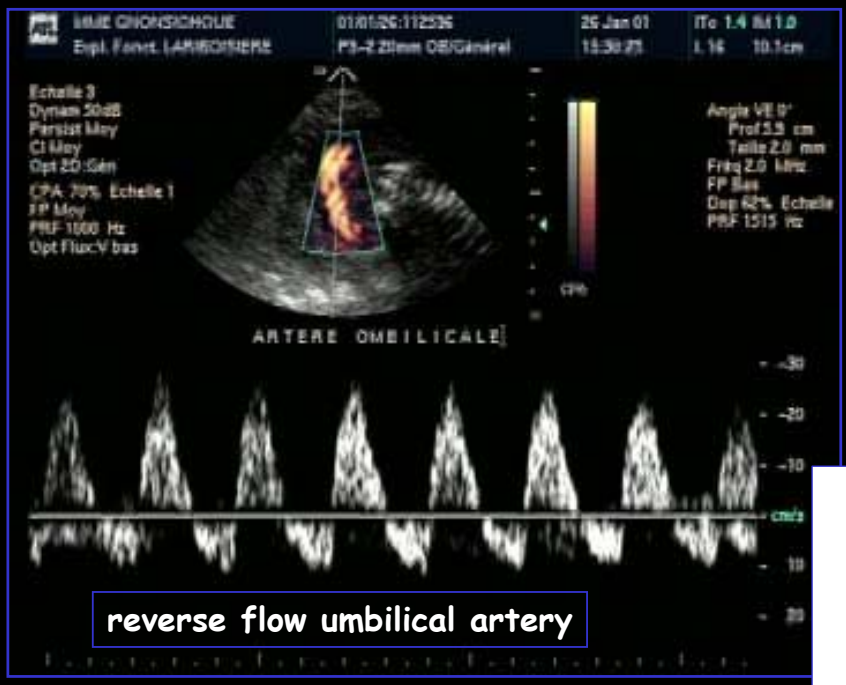
Modification du sens des flux au niveau de l'isthme de l'aorte.



En situation normale, les résistances hémodynamiques ombilicales sont basses et pendant le temps diastolique, les vitesses restent antérogrades, c'est-à-dire dirigées vers le placenta. En présence d'une insuffisance placentaire entraînant une réduction du débit ombilical et une hypoxie fœtale on observe une modification du sens des flux au niveau de l'isthme de l'aorte. Pendant le temps diastolique, le flux isthmique devient rétrograde, car l'équilibre des résistances hémodynamiques de part et d'autre de l'isthme sont modifiées.
Les résistances cérébrales et myocardiques s'abaissent, les résistances ombilicales s'élèvent. Le flux net isthmique peut ainsi devenir

nul

EXPLORATIONS ULTRASONORES DES CIRCULATIONS FOETO-MATERNELLES



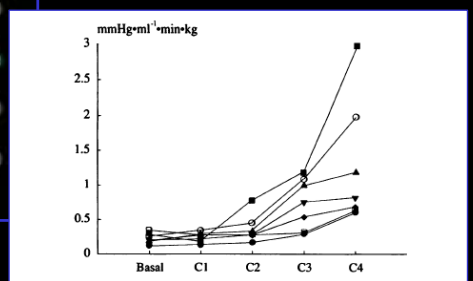


FIG 3. *Graph illustrates changes in resistance achieved in the umbilical circulation during the four levels of compression (C).*