

Chapitre 10 : Développement de l'appareil circulatoire

Collège universitaire et hospitalier des histologistes, embryologistes, cytologistes et cytogénéticiens (CHEC)

2014

Table des matières

Introduction.....	3
1. LA CIRCULATION EMBRYONNAIRE (4ème semaine du développement)	3
1.1. Formation des vaisseaux extra-embryonnaires (qui assurent la circulation du sang entre l'embryon et les annexes).....	3
1.2. Formation des vaisseaux intra-embryonnaires (qui assurent la circulation du sang dans l'embryon) .	3
1.3. Le tube cardiaque	4
1.4. La circulation à la fin de la 4ème semaine.....	5
2. LA CIRCULATION FOETALE	6
2.1. La formation du cœur à quatre cavités	6
2.1.1. La plicature du tube cardiaque.....	6
2.1.2. Le cloisonnement auriculo-ventriculaire	6
2.1.3. La formation des oreillettes définitives	7
2.1.4. Formation des ventricules définitifs	8
2.1.5. Evolution du cono-truncus	8
2.2. Les modifications du système artériel.....	9
2.2.1. Les modifications des arcs aortiques sont les premières.....	10
2.2.2. Les modifications des aortes primitives	10
2.2.3. Les artères vitellines.....	11
2.2.4. Les artères ombilicales	11
2.3. Les modifications du système veineux.....	11
2.3.1. Les veines vitellines.....	11
2.3.2. Les veines ombilicales	11
2.3.3. Les veines cardinales	12
2.3.4. Le sinus veineux	12
2.4. Le développement du système lymphatique.....	13
2.4.1. Les capillaires lymphatiques	13
2.4.2. Les « sacs » lymphatiques	13
2.4.3. Les vaisseaux collecteurs	13
2.4.4. Les ganglions ou nœuds lymphatiques	13
2.5. Les spécificités fonctionnelles de la circulation foetale.....	14
3. A LA NAISSANCE.....	14
4. LES MALFORMATIONS.....	15
4.1. Du point de vue anatomique.....	15
4.2. Du point de vue fonctionnel.....	16

Introduction

Au cours du développement la mise en place du système circulatoire se fait en trois étapes successives :

- la première **circulation, dite « embryonnaire »**, intervient à la quatrième semaine du développement du fait de la mise en communication du tube cardiaque avec les artères et les veines primitives
- la deuxième **circulation, dite « fœtale »**, est la résultante de la transformation du tube cardiaque en un cœur à quatre cavités et du passage des vaisseaux primitifs aux vaisseaux définitifs. Elle persiste pendant toute la grossesse.
- la troisième, dite **circulation définitive**, se met en place à la naissance du fait des modifications de pression secondaires à l'ouverture de la circulation pulmonaire et à l'interruption de la circulation ombilicale.

Figure 1 : Le système circulatoire

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

1. LA CIRCULATION EMBRYONNAIRE (4ème semaine du développement)

Elle résulte de la mise en communication des vaisseaux primitifs et de l'ébauche cardiaque.

1.1. Formation des vaisseaux extra-embryonnaires (qui assurent la circulation du sang entre l'embryon et les annexes)

Dès la 3ème semaine et pendant la 4ème semaine du développement ([cf. Chapitre 4 : Troisième semaine du développement de l'oeuf](#)), les **îlots vasculo-sanguins primitifs** (Ilots de Wolff et Pander) se différencient au niveau du **mésenchyme extra-embryonnaire** de la **splanchnopleure** (autour de la vésicule ombilicale ou vitelline), du **pédicule embryonnaire** et de la **lame chorale**.

Figure 2 : Les îlots vasculo-sanguins primitifs

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

1) **Au niveau des villosités et de la lame chorale**, les vaisseaux occupent les axes des **villosités tertiaires** puis cheminent dans le **chorion** et le **pédicule embryonnaire**. Ils sont drainés par des troncs vasculaires, les **troncs ombilicaux**, qui cheminent au voisinage du **canal allantoïdien** dans le cordon ombilical.

2) **Au niveau de la splanchnopleure**, les vaisseaux sont également drainés par deux gros troncs qui vont rejoindre la circulation intra-embryonnaire, les **troncs vitellins**.

Figure 3 : Au niveau des villosités et de la lame chorale

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

1.2. Formation des vaisseaux intra-embryonnaires (qui assurent la circulation du sang dans l'embryon)

Selon un mécanisme de différenciation comparable, des îlots vasculo-sanguins primitifs apparaissent à la fin de la 3^e semaine dans le mésenchyme intra-embryonnaire, ils sont à l'origine des **artères et des veines primitives**.

1) Les artères primitives

- Les premières ébauches apparaissent dans la région dorsale, sur toute la longueur de l'embryon, ce sont les **aortes dorsales droite et gauche** dont les **parties caudales fusionnent** à la fin de la 4^{ème} semaine.

Figure 4 : Les artères primitives

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

- De chaque côté, leur portion céphalique, située en position ventrale après la délimitation, entre en connexion avec l'extrémité céphalique du **tube cardiaque** : ce sont les **aortes ventrales**.

- De chaque côté également, pendant la quatrième semaine, des anastomoses se constituent entre **aortes dorsales** et **aortes ventrales** dans le mésenchyme des **arcs branchiaux** : les **arcs aortiques**.

Figure 5 : Les artères primitives

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2) Les veines primitives apparaissent après les artères :

- Les principales sont au nombre de quatre, les **veines cardinales**. Disposées de façon symétrique, elles drainent respectivement les parties céphalique (**Veine cardinale antérieure**) et caudale (**Veine cardinale postérieure**) de l'embryon.

- De chaque côté, les veines cardinales antérieure et postérieure confluent en un tronc commun, le **canal de Cuvier**, qui s'abouche à l'extrémité caudale du **tube cardiaque**.

Figure 6 : Les veines primitives

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

1.3. Le tube cardiaque

Impair et médian, le **tube cardiaque** se constitue par fusion, le 22^{ème} jour, des **tubes endocardiques** dérivés des ébauches vasculaires de la zone cardiogène ([cf. Chapitre 5 : Quatrième semaine du développement de l'oeuf](#)) :

1) Les tubes endocardiques, ébauches vasculaires apparues au 19^{ème} jour sous l'action inductrice de l'endoderme, sont à l'origine du revêtement intérieur du cœur définitif : l'**endocarde**.

2) Les **dérivés du mésoderme splanchnopleural** situés autour de ces ébauches constituent le **myocardio-épicarde** séparé de l'endocarde par une couche de liquide extra-cellulaire, la **gelée cardiaque**.

- Les cellules situées au contact de l'endocarde se différencient en myoblastes qui seront à l'origine du **myocarde**.

- Les cellules périphériques se différencient en un mésothélium qui donnera le **feuillet viscéral du péricarde**.

Figure 7 : Le tube cardiaque

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

3) La **cavité péricardique** correspond à la partie du coelome intra-embryonnaire qui entoure le tube cardiaque, elle est limitée à l'extérieur par le feuillet somatopleural à l'origine du péricarde pariétal. Les premiers battements cardiaques apparaissent au 22^{ème} jour, dès la formation du tube cardiaque.

Le **tube cardiaque** est alors constitué, de son extrémité caudale à son extrémité céphalique, de 5 zones dilatées, les **cavités cardiaques primitives** :

- le **sinus veineux** (SV), confluent où se jettent les deux canaux de Cuvier, les deux veines ombilicales et les deux veines vitellines
- l'**oreillette primitive** (OP) zone dilatée séparée par le sillon auriculo-ventriculaire du segment suivant ,
- le **ventricule primitif** (VP) zone dilatée (qui donnera le ventricule gauche définitif) séparée elle-même par le sillon bulbo-ventriculaire du segment suivant :
- le **bulbus cordis** (BC) (futur ventricule droit) qui lui fait suite et se prolonge par
- le **conotruncus** (CT) point de départ des aortes ventrales.

Figure 8 : la cavité péricardique

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

1.4. La circulation à la fin de la 4ème semaine

1) **La circulation intra-embryonnaire** : Le sang, pulsé par les battements cardiaques à partir du pôle artériel du **tube cardiaque**, emprunte le trajet des **aortes ventrales** puis **dorsales**.

A partir des aortes dorsales le sang irrigue les tissus embryonnaires en suivant le trajet des **artères segmentaires et intersegmentaires** qui se distribuent dans trois directions :

- dorsale, pour vasculariser le **tube neural** et la paroi dorsale
- latérale, vascularisant le mésoblaste intermédiaire
- ventrale destinées à l'**intestin primitif** et à ses annexes.

Certaines de ces branches ventrales assurent la jonction avec le **réseau vitellin** (dans la partie moyenne de l'embryon) et avec le **réseau ombilical** (dans la partie caudale).

Après irrigation des tissus embryonnaires, le sang revient au tube cardiaque par le réseau des **veines cardinales** et les **canaux de Cuvier** qui s'abouchent au **sinus veineux**.

Figure 9 : La circulation à la fin de la 4ème semaine

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2) **La circulation ombilicale** draine le sang (oxygéné) provenant du placenta par les **veines ombilicales** qui aboutissent au **sinus veineux**. Après passage dans la **circulation intra-embryonnaire**, le sang (appauvri en oxygène) retourne au placenta en empruntant le trajet des **artères ombilicales**.

Figure 10 : La circulation ombilicale

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

3) **La circulation vitelline** est branchée en dérivation : de chaque côté de l'embryon l'**artère vitelline est en connexion avec l'aorte dorsale** dans la partie moyenne de l'embryon tandis que la **veine vitelline** aboutit dans le **sinus veineux**.

Au cours de la **circulation embryonnaire**, le sinus veineux reçoit ainsi à la fois le **sang oxygéné** venant du **placenta** par les **veines ombilicales** et le **sang pauvre en oxygène** provenant du **réseau cardinal** et du **réseau vitellin** : l'embryon est donc irrigué par du **sang mêlé**.

Figure 11 : La circulation vitelline

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2. LA CIRCULATION FOETALE

La **circulation foetale** se met en place progressivement pendant le deuxième mois.

Elle résulte de modifications des constituants de la circulation embryonnaire : les transformations du **tube cardiaque** (plicature et cloisonnement) modifient les cavités primitives qui font place au **cœur à quatre cavités** et les transformations des **vaisseaux primitifs**, induites par le développement des organes et appareils, entraînent la mise en place des **vaisseaux définitifs**.

Figure 12 : La circulation foetale

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.1. La formation du cœur à quatre cavités

La formation du cœur à quatre cavités intervient au cours de la 5^{ème} et de la 6^{ème} semaines du développement. Elle résulte de plusieurs phénomènes successifs : la plicature du tube cardiaque et le déplacement des cavités primitives (4^{ème}-5^{ème} semaines) puis l'évolution et le cloisonnement des cavités primitives. (5^{ème}-6^{ème} semaines).

2.1.1. La plicature du tube cardiaque

Au cours de la 4^{ème} semaine du développement, la croissance du **tube cardiaque** est plus rapide que celle de la **cavité péricardique** qui le contient. Cela se traduit par une plicature et le déplacement des cavités primitives à l'intérieur de la cavité péricardique. Ce déplacement intervient dans deux plans de l'espace :

- dans un plan sagittal, l' **oreillette primitive** (O.P.) **vient se placer en arrière du ventricule primitif** (V.P.) entraînant en arrière d'elle le **sinus veineux** (S.V.) et l' **abouchement des vaisseaux afférents** et
- dans un plan frontal, le **bulbus cordis** (B.C.) **venant se placer à droite du ventricule primitif** (V.P.).

Figure 13 : La plicature du tube cardiaque

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

Il en résulte une **boucle à convexité droite** qui détermine la position normale des futures cavités cardiaques - "**situs solitus**" .

(En cas de plicature inverse dans le plan frontal - "situs inversus", il y aura inversion dans la position des futures cavités ventriculaires)

A la fin de la plicature, l'oreillette primitive s'élargit et vient se plaquer à la face postérieure du bulbus cordis. Ses **expansions antéro-supérieures** donneront les auricules et sa **paroi postérieure** incorpore progressivement le sinus veineux.

Figure 14 : La plicature du tube cardiaque

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.1.2. Le cloisonnement auriculo-ventriculaire

Après la plicature du tube cardiaque primitif, le **canal auriculo-ventriculaire** fait communiquer la **partie gauche de l'O.P.** avec le **V.P.** (futur ventricule gauche). Au début de la 5^{ème} semaine, **cet orifice s'élargit vers la droite** mettant également en communication la **partie droite de l'O.P.** avec le **B.C.** (futur ventricule droit).

C'est également à ce stade que se développent sur les bords du canal auriculo-ventriculaire, des saillies de l'endocarde, les **bourgeons endocardiques** :

- deux principaux en position antéro-supérieure et postéro-inférieure
- deux accessoires latéraux, droit et gauche.

Figure 15 : Le cloisonnement auriculo-ventriculaire

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

Les **bourgeons principaux** se rejoignent et fusionnent sur la **ligne médiane** de l'ébauche cardiaque constituant un massif cellulaire, le **septum intermedium**. Cette première cloison divise le **canal auriculo-ventriculaire initial** en deux **orifices auriculo-ventriculaires droit et gauche** qui mettent de chaque côté en communication l'**oreillette primitive** avec le **futur ventricule**.

Après l'individualisation de ces deux orifices, le septum intermedium va donner de chaque côté une **expansion latérale** pour constituer, avec les **bourgeons latéraux**, les **valvules des orifices auriculo-ventriculaires**. Il est aussi à l'origine de deux autres expansions, l'une vers le haut qui participe au cloisonnement inter-auriculaire, l'autre vers le bas qui participera à la formation de la cloison interventriculaire.

Figure 16 : Le cloisonnement auriculo-ventriculaire

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.1.3. La formation des oreillettes définitives

La **formation des oreillettes définitives** dépend du cloisonnement de la région auriculaire mais aussi des modifications de l'oreillette primitive résultant de son augmentation de volume et de l'incorporation du système veineux d'une part, des transformations de la circulation veineuse d'autre part.

1) Le cloisonnement de la région auriculaire intervient en deux étapes :

- Pendant la 5^{ème} semaine, une première cloison, le **septum primum**, naît du plafond de l'oreillette primitive et **se développe vers le bas** en direction du **septum intermedium**. D'abord incomplète, elle reste séparée de ce dernier par un premier orifice, l'**ostium primum**, qui maintient la communication entre les deux moitiés droite et gauche de l'oreillette primitive. Lorsque **cette première cloison se complète et se soude au septum intermedium en comblant l'ostium primum**, un **phénomène d'apoptose** fait apparaître à sa partie supérieure un nouvel orifice de communication d'aspect criblé, l'**ostium secundum**.

Figure 17 : La formation des oreillettes définitives

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

- Pendant la 6^{ème} semaine, une deuxième cloison, le **septum secundum** apparaît à droite de la précédente. En forme de croissant, elle **se développe vers le bas**, s'accole au **septum intermedium** mais reste incomplète dans sa partie inférieure. Il persiste ainsi un orifice en chicane, le **trou de Botal ou foramen ovale**, qui maintiendra jusqu'à la naissance la communication et le passage du sang entre les **deux oreillettes droite et gauche**. La partie inférieure du septum primum constitue un clapet, la valvule du foramen ovale, qui est soulevé au passage du **flux sanguin**.

Figure 18 : Le cloisonnement de la région auriculaire

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2) La **formation des oreillette définitives** est conditionnée par le ballonnement et l'**augmentation de volume en arrière de l'oreillette primitive** qui englobe le **sinus veineux** et par les modifications de la circulation veineuse (**cf. "Les modifications du système veineux"**) :

- à gauche, la **régression des veines afférentes** entraîne celle la partie gauche du sinus veineux. Par contre, le ballonnement détermine une évagination de la paroi postérieure de l'oreillette primitive qui se

développe dès la fin de la quatrième semaine et donne rapidement **quatre branches** qui rejoignent les vaisseaux de l'ébauche pulmonaire (cf. Chapitre 12. "Développement de l'appareil respiratoire" - § 3 "Formation des vaisseaux sanguins") à la sixième semaine. Elles deviendront les **veines pulmonaires** ayant chacune, vers la 12^{ème} semaine, un orifice d'abouchement indépendant dans l'oreillette gauche du fait de l'augmentation de volume de l'oreillette.

- à droite, du fait de l'incorporation du sinus veineux et de l'évolution des veines afférentes (cf. "Les modifications du système veineux"), l'oreillette devient le lieu d'abouchement de la **veine cave inférieure**, de la **veine cave supérieure** et du **sinus coronaire** qui dérive du **reste de la partie gauche du sinus veineux**.

Figure 19 : La formation des oreillettes définitives

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.1.4. Formation des ventricules définitifs

Le cloisonnement interventriculaire commence dès la fin de la 4^{ème} semaine sous la forme d'une crête musculaire, le **septum inferius**, qui se développe en regard du **sillon bulbo-ventriculaire** en direction des **bourrelets endocardiques du canal auriculo-ventriculaire**. Cette cloison sépare le **ventricule gauche** (dérivé du ventricule primitif) et le **ventricule droit** (dérivé du bulbus cordis) mais elle n'est pas complète ; il persiste un orifice de communication entre le bord supérieur du septum inferius et le septum intermedium, le **foramen inter-ventriculaire**; la fermeture de cet orifice dépend des transformations du cono-truncus (cf. § "Evolution du cono-truncus").

Figure 20 : Formation des ventricules définitifs

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

Au cours de la 5^{ème} et 6^{ème} semaine de développement, les **parois ventriculaires s'épaississent** et les **cavités ventriculaires augmentent de volume** par creusement de ces parois. Les bourgeons endocardiques des orifices auriculo-ventriculaires s'allongent et se transforment en valvules dont l'extrémité libre reste attachée à la paroi ventriculaire par des liens musculaires et fibreux, les **pilliers et les cordages**. Ces valvules prennent leur aspect définitif vers la 12^{ème} semaine.

Figure 21 : Formation des ventricules définitifs

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.1.5. Evolution du cono-truncus

Elle dépend de l'activité inductrice des cellules dérivées de la zone cardiogène et des crêtes neurales et se caractérise par un élargissement, un cloisonnement associé à une torsion suivis d'un remodelage de la partie inférieure du conus.

1) L'élargissement intervient au début de la 5^{ème} semaine : l'**ostium bulbaire** qui faisait communiquer le **conus** avec le **bulbus cordis s'élargit en haut et à gauche** en surplombant le **foramen inter-ventriculaire** et en permettant le passage direct du **flux sanguin** depuis le **ventricule primitif** (futur ventricule gauche) vers le **cono-truncus**. Cet orifice élargi prend le nom d'**orifice cono-ventriculaire**.

Figure 22 : Evolution du cono-truncus

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2) Le cloisonnement prend son origine sous la forme de **bourgeons endocardiques** qui apparaissent à la 5^{ème} semaine :

- deux accessoires, **droit et gauche**, au niveau du **truncus**, partie supérieure du **cono-truncus**, en continuité vers le haut avec le sac aortique, confluent d'où partent les aortes ventrales,

- deux principaux, **ventral et dorsal**, sur toute la hauteur du truncus et du conus qui se rejoignent pour former la **cloison cono-truncale** dont le bord inférieur surplombe le **foramen inter-ventriculaire**.

Figure 23 : Evolution du cono-truncus

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

3) La **rotation dans un sens anti-horaire** et vers le bas qui accompagne ce cloisonnement va entraîner la **torsion de la cloison cono-truncale**.

Cette torsion commence au niveau du conus séparé en deux chambres : l'une, **antéro-gauche**, en communication avec le **ventricule gauche** et l'autre, **postéro-droite**, en communication avec le **ventricule droit**.

A la partie supérieure du truncus, le **septum truncal** sépare le truncus en deux chambres **aortique** et **pulmonaire**. A ce niveau la rotation, très atténuée, détermine l'**enroulement du segment juxta-cardiaque de l'aorte et du tronc de l'artère pulmonaire** et la position définitive des orifices dérivés du cloisonnement de l'orifice cono-truncal : l'**orifice aortique** venant se placer en arrière de l'**orifice pulmonaire**.

Au niveau de ces orifices, la prolifération des bourgeons endocardiques accessoires associée à celle des bourgeons principaux est à l'origine de la formation des valvules.

Figure 24 : Evolution du cono-truncus

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

4) Le remodelage du conus est secondaire à un abaissement associé à l'effacement de la partie aortique. Cette évolution a plusieurs conséquences :

- la partie pulmonaire du conus persiste et devient l'**infundibulum pulmonaire**, segment qui sépare l'**origine de l'artère pulmonaire dans le ventricule droit** de l'**orifice pulmonaire** : ce dernier reste ainsi à distance des valvules tricuspides qui ferment l'**orifice auriculo-ventriculaire droit**.

- l'effacement de la partie aortique du conus accentue, au contraire, la proximité de l'**orifice aortique** et des valves mitrales qui ferment l'**orifice auriculo-ventriculaire gauche**,

- au cours de l'abaissement, la **partie inférieure du septum conal vient combler le foramen inter-ventriculaire** constituant la partie fibreuse de la cloison inter-ventriculaire. Il y a désormais séparation complète des **deux ventricules** droit et gauche.

A la fin de la 6^{ème} semaine, les quatre cavités cardiaques définitives sont constituées, le cœur mesure à ce stade 8 mm sur son grand axe.

Figure 25 : Evolution du cono-truncus

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.2. Les modifications du système artériel

Les artères primitives constituent à la 4^{ème} semaine ([cf. §1.4. "La circulation à la fin de la 4ème semaine"](#)) un **premier système artériel** comprenant les **aortes dorsales** et leurs **branches** en connexion avec les **artères vitellines** et **ombilicales**, les **aortes ventrales** et les **arcs aortiques** dont les segments juxta-cardiaques confluent pour constituer une citerne, le **sac aortique**, qui s'abouche à l'extrémité céphalique du **truncus**.

Le système artériel définitif résulte des modifications des artères primitives qui interviennent entre la 4^{ème} et la 7^{ème} semaines.

Figure 26 : le système artériel

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.2.1. Les modifications des arcs aortiques sont les premières

- Les **trois premiers arcs** sont situés à la 4^{ème} semaine de chaque côté de l'**intestin pharyngien**. Vers le 25^{ème} jour **les premiers régressent** à droite comme à gauche **tandis qu'apparaissent les quatrièmes**. Vers le 29^{ème} jour, **les seconds régressent à leur tour** en même temps qu'interviennent les modifications des arcs branchiaux (**cf. Chapitre 11 : "Développement de l'appareil digestif"**). **Les troisièmes persistent** et donneront de chaque côté les **artères carotides communes** et le **segment proximal des artères carotides internes**.
- **Les quatrièmes persistent** et participent à la constitution de l'**aorte définitive** à gauche, de l'**artère sous-clavière** à droite,
- Les cinquièmes sont inexistantes dans l'espèce humaine.

Figure 27 : Les modifications des arcs aortiques

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

- Les **sixièmes apparaissent** en même temps que se constitue le septum aortico-pulmonaire qui prolonge en haut le septum truncal et **sépare en deux** la partie inférieure du **sac aortique** : à la fin de la 7^{ème} semaine, **ce cloisonnement met en relation la partie droite du sac aortique avec les troisièmes et quatrièmes arcs** tandis que **la partie gauche est en connexion avec l'extrémité proximale des sixièmes arcs**. Les sixièmes arcs prolongent ainsi le **tronc de l'artère pulmonaire**. Ils donnent naissance chacun à une **expansion dorsale** qui entre en connexion avec les **vaisseaux de l'ébauche pulmonaire** (**cf. Chapitre 12 : "Développement de l'Appareil respiratoire"**).

La partie distale du sixième arc disparaît à droite. À gauche elle persiste et maintient jusqu'à la naissance une communication entre l'artère pulmonaire et l'aorte, le **canal artériel ou ductus arteriosus**.

Figure 28 : Les modifications des arcs aortiques

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.2.2. Les modifications des aortes primitives

Les **modifications des aortes primitives et de leurs branches** accompagnent l'évolution des arcs aortiques et des flux sanguins :

- Le **segment d'aorte dorsale compris de chaque côté entre le 3^{ème} et le 4^{ème} arc s'oblitére**
- Le **segment d'aorte dorsale situé en avant du 3^{ème} arc persiste** des deux côtés et donne le trajet de l'**artère carotide interne**
- L'**extrémité céphalique du sac aortique et l'aorte ventrale** persistent des deux côtés et donnent le trajet de l'**artère carotide commune** et de l'**artère carotide externe**,
- Le **segment de l'aorte dorsale compris entre le 4^{ème} arc aortique et le point de départ de la 7^{ème} artère segmentaire persiste** : à gauche il donne le **trajet de l'aorte descendante**, à droite une **partie de celui de l'artère sous-clavière**,

Figure 29 : Les modifications des aortes primitives

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

- Le **segment de l'aorte dorsale compris entre la 7^{ème} et la 8^{ème} segmentaires** disparaît à droite, il persiste à gauche et continue le trajet de l'aorte descendante,

- A partir de la 8^{ème} segmentaire les **portions caudales des aortes primitives ont fusionné** dès la 4^{ème} semaine, ce sont les branches segmentaires ventrales de ce trajet commun qui donnent naissance avec les restes de la circulation vitelline aux troncs vasculaires des viscères abdominaux.

Au total, le trajet de l'**aorte définitive** comprend une **partie du truncus**, une **partie du sac aortique**, le 4^{ème} **arc aortique gauche**, le **segment d'aorte dorsale gauche compris entre le 4^{ème} arc aortique et la 8^{ème} artère segmentaire** et la **portion caudale fusionnée des aortes dorsales primitives** dit aorte dorsale commune.

Figure 30 : Les modifications des aortes primitives

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.2.3. Les artères vitellines

Les **artères vitellines**, après leur abouchement aux **branches segmentaires ventrales de l'aorte dorsale commune** et la régression de la vésicule vitelline, se distribuent aux viscères abdominaux et donnent naissance à trois importants troncs artériels : le **tronc coeliaque**, l'**artère mésentérique supérieure** et l'**artère mésentérique inférieure**.

2.2.4. Les artères ombilicales

Les **artères ombilicales**, depuis la mise en place de la circulation embryonnaire ([cf. § "La circulation embryonnaire"](#)), sont en connexion avec les **branches segmentaires ventrales de la partie caudale de l'aorte dorsale commune**.

La partie proximale de leur trajet deviendra de chaque côté l'**artère iliaque interne**. Le reste du trajet s'oblitére après la naissance.

Figure 31 : Les modifications du système artériel

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.3. Les modifications du système veineux

Les **veines primitives** aboutissent toutes à la quatrième semaine au niveau du **sinus veineux**, leurs trajets vont se modifier du fait du développement important de l'ébauche hépatique et de l'apparition de courants circulatoires préférentiels qui accompagnent le développement fœtal.

2.3.1. Les veines vitellines

Les **veines vitellines**, drainent la circulation de retour de l'intestin primitif. Les très nombreuses branches constituent initialement deux réseaux. **Le premier** autour de l'**intestin primitif** avec un trajet préférentiel qui devient celui de la **veine mésentérique supérieure** et de la **veine porte**. **Le second** à l'**intérieur de l'ébauche hépatique** : il alimente les **sinusoïdes hépatiques** et est drainé dans le sinus veineux par le **segment terminal juxta-cardiaque de la veine vitelline droite**.

Figure 32 : Les veines vitellines

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.3.2. Les veines ombilicales

Les **veines ombilicales** ramènent le sang oxygéné du placenta au sinus veineux, leur segment juxta-cardiaque est entièrement inclus des deux côtés dans l'ébauche hépatique en développement. Du fait de

flux préférentiels à l'intérieur de l'ébauche hépatique, la **veine ombilicale gauche** prédomine et **se déverse vers le segment juxta-cardiaque de la veine vitelline droite** tandis que cette dernière s'oblitère sur le **reste de son trajet**. Ce trajet veineux préférentiel est appelé le **canal veineux d'Arentius**.

Dès lors, l'**ensemble de la circulation veineuse vitelline et ombilicale** traverse le foie avant de revenir au cœur par l'intermédiaire de la **partie terminale du trajet de la veine vitelline droite** devenu le **canal hépato-cardiaque**.

Le trajet de la veine ombilicale gauche situé entre l'ombilic et le foie s'oblitère après la naissance, ce trajet fibreux devient le ligament rond.

Figure 33 : Les veines ombilicales

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.3.3. Les veines cardinales

Les **veines cardinales** sont très remaniées du fait du développement d'anastomoses qui drainent préférentiellement le sang du côté gauche vers le coté droit et de réseaux néo-formés en même temps que le modelage des organes.

- La **veine cardinale antérieure droite** devient le **tronc veineux brachio-céphalique droit**, son **segment terminal** constitue avec le **canal de Cuvier droit** la **veine cave supérieure**.

Figure 34 : Les veines cardinales

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

- La **veine cardinale antérieure gauche** est drainée vers la **veine cave supérieure** par le **tronc veineux brachio-céphalique gauche** dérivé de l'**anastomose** apparue entre les deux cardinales antérieures.

- Les **veines cardinales postérieures** vont constituer dans le région thoracique le **système azygos** constitué de la **portion thoracique de leur trajet** des deux côtés réunis par **une ou plusieurs anastomoses** (les veines hémi-azygos). L'ensemble est drainé vers la veine cave supérieure par la **portion terminale de la veine cardinale postérieure droite** qui devient la **crosse de la veine azygos**.

Figure 35 : Les veines cardinales

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

- Les **portions abdominales des veines cardinales** vont régresser au profit du **résau sous-cardinal** qui se développe en même temps que le mésonephros. Le courant préférentiel emprunte le trajet des **extrémités caudales des deux cardinales postérieures** et l'**anastomose** qui les réunit puis celui de la **veine sous-cardinale droite qui vient s'aboucher au canal hépato cardiaque droit**. Ainsi se constitue le trajet de la **veine cave inférieure** qui draine la circulation de retour des membres inférieurs, du petit bassin et des viscères abdominaux.

Figure 36 : Les veines cardinales

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.3.4. Le sinus veineux

Le **sinus veineux** est entièrement inclus au cours du développement cardiaque dans la **région auriculaire** de telle sorte que les **abouchements des veines définitives** (veine cave supérieure et veine cave inférieure) se feront directement dans l'**oreillette droite**. Seul persiste la **zone d'abouchement du canal de Cuvier gauche** qui devient le **sinus coronaire** où se draine la circulation de retour du myocarde.

Figure 37 : Le sinus veineux

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.4. Le développement du système lymphatique

Annexé à la **circulation veineuse de retour** dans laquelle il s'abouche, le **système lymphatique** se développe entre la 5^{ème} et la 9^{ème} semaine.

2.4.1. Les capillaires lymphatiques

Les capillaires lymphatiques apparaissent dès la 5^{ème} semaine dans les tissus périphériques sous la forme de lacunes dans le mésenchyme. Ces lacunes aplaties sont bordées par un revêtement endothélial et communiquent entre elles.

2.4.2. Les « sacs » lymphatiques

Les « **sacs** » lymphatiques sont des poches plus volumineuses, également intra mésenchymateuses, qui apparaissent vers la 6^o semaine au contact des gros troncs veineux. Au nombre de six, on distingue :

- deux **sacs jugulaires** situés de chaque côté en arrière du confluent jugulo-sous-clavier
- deux **sacs iliaques** situés de chaque côté en arrière du confluent des veines iliaques interne et externe
- un **sac pré-aortique** ou rétro-péritonéal situé en avant des gros vaisseaux , à la racine du mésentère
- la **citerne lymphatique** située au même niveau mais en arrière des gros vaisseaux.

Figure 38 : Le système lymphatique

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.4.3. Les vaisseaux collecteurs

Les vaisseaux collecteurs ont une paroi plus épaisse , ils assurent le drainage du chyle depuis les espaces lymphatiques vers les sacs et entre les sacs. Les plus volumineux sont les **canaux thoraciques** qui joignent la **grande citerne** aux **sacs jugulaires** de chaque côté, ils sont réunis par une **anastomose**.

Entre la 6^{ème} et la 9^{ème} semaine des courants circulatoires préférentiels se développent de telle sorte que, le plus souvent, la totalité de la lymphe de la région thoracique, de la région abdominale et des membres inférieurs emprunte le trajet du **canal thoracique définitif** constitué à partir de la **partie caudale du canal thoracique droit**, de l'**anastomose** et de la **partie céphalique du canal thoracique gauche**. Ce canal s'abouche dans la circulation veineuse au niveau du **confluent jugulo-sous-clavier gauche**. Les autres vaisseaux lymphatiques collecteurs rejoignent ce même confluent de façon indépendante à droite et à gauche.

2.4.4. Les ganglions ou nœuds lymphatiques

Les **ganglions** ou nœuds lymphatiques sont des organes lymphoïdes qui se développent au cours de la maturation du système immunitaire. A partir de la 11^o semaine, ils se disposent sous forme de chaînes le long des vaisseaux collecteurs dans les zones de confluences. Ils seront progressivement colonisés par les cellules lymphoïdes mais la différenciation est un processus qui s'étale pendant toute la grossesse et ces structures n'acquièrent leur efficacité complète qu'après la naissance.

Figure 39 : Le système lymphatique

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

2.5. Les spécificités fonctionnelles de la circulation foetale

L'ensemble des modifications du cœur et des vaisseaux intervenues au cours du deuxième mois aboutit à la constitution de l'appareil circulatoire définitif mais, du point de vue fonctionnel jusqu'à la naissance, du fait d'une circulation particulière, le fœtus est toujours irrigué par du sang mêlé.

La circulation foetale se caractérise par le maintien de la **circulation ombilicale** qui, en l'absence d'une circulation pulmonaire fonctionnelle, apporte au fœtus le sang enrichi en oxygène au niveau du **placenta**. Ce flux sanguin, **afférent** pour le fœtus, emprunte le trajet de la **veine ombilicale** qui aboutit dans la **circulation veineuse** au niveau du **foie** et **suit le trajet de la veine cave inférieure** pour aboutir à l'**oreillette droite**. Cette dernière reçoit également la circulation de retour des vaisseaux périphériques du fœtus par l'intermédiaire des **veines caves inférieure et supérieure**.

Figure 40 : Les spécificités fonctionnelles de la circulation foetale

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

Du cœur vers les organes et les tissus périphériques, le flux sanguin artériel passe par l'**aorte et ses branches**. L'aorte reçoit, à chaque systole, le flux sanguin venant du **cœur gauche** mais aussi celui du **cœur droit** du fait de l'existence de deux shunts droits-gauche, le **foramen ovale** (au niveau de la cloison inter-auriculaire) et le **canal artériel** entre le tronc de l'artère pulmonaire et l'aorte.

Figure 41 : Les spécificités fonctionnelles de la circulation foetale

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

3. A LA NAISSANCE

La circulation définitive se met en place.

Le premier mouvement respiratoire est associé au premier cri. La circulation pulmonaire devient fonctionnelle et le **sang oxygéné** est ramené au niveau de l'**oreillette gauche** par les **veines pulmonaires**. Ce sang passe ensuite dans le **ventricule gauche** à travers l'**orifice mitral** et il est chassé dans l'**aorte** à chaque systole.

La **circulation veineuse** de retour aboutit à l'**oreillette droite** et le sang, appauvri en oxygène, passe dans le **ventricule droit** à travers l'**orifice tricuspide**, il est chassé à chaque systole vers l'**artère pulmonaire** dont les branches se distribuent dans les **poumons**.

Figure 42 : La circulation définitive

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

Les mouvements respiratoires entraînent une augmentation de pression et de débit dans l'oreillette gauche qui a pour conséquence la **fermeture du foramen ovale** et la séparation des deux oreillettes. De même, dès la naissance, il y a normalement **régression du canal artériel** et fermeture de la communication entre artère pulmonaire et aorte.

La circulation ombilicale est interrompue par la section du cordon ombilical, ce qui entraîne une diminution du **retour veineux cave inférieur** et une diminution de la pression dans le cœur droit. Le segment de la veine ombilicale situé entre l'ombilic et le foie persistera sous la forme d'un cordon fibreux, le **ligament rond**.

Désormais, les **cavités gauches** ne contiennent que le sang enrichi en oxygène, les **cavités droites** que le sang appauvri en oxygène, sauf au cours de certaines malformations.

Figure 43 : La circulation définitive

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

4. LES MALFORMATIONS

Les cardiopathies congénitales sont des malformations fréquentes (10% de la totalité des malformations) constatées dans 7 cas pour mille naissances.

Les causes en sont multiples mais ne sont retrouvées que dans 10 % des cas :

- la moitié sont des anomalies chromosomiques : trisomie 21, trisomie 13, trisomie 18, microdélétion du chromosome 22.....
- les autres causes retrouvées sont des maladies géniques ou tératogènes, infectieuses (Rubéole) ou médicamenteuses.

Ces malformations peuvent, le plus souvent, être mise en évidence au cours de la surveillance échographique de la grossesse (2^{ème} et 3^{ème} trimestres).

4.1. Du point de vue anatomique

Du point de vue anatomique, ces malformations correspondent à des anomalies qui résultent de la perturbation des étapes du développement cardio-vasculaire décrite ci-dessus :

- Anomalie de position : **Dextrocardie**
- Anomalie de la boucle : **Situs inversus, inversion de la position des cavités et des abouchements des gros vaisseaux**. Ces deux anomalies sont parfois associées.

Figure 44 : Du point de vue anatomique

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

- Anomalies du cloisonnement
 - Cloisonnement auriculo-ventriculaire :
 - **Canal atrio-ventriculaire (CAV)** partiel ou **complet** souvent associé à une dysplasie valvulaire
 - Anomalies des valvules avec cardiomégalie
 - Cloisonnement auriculaire : **Communication inter-auriculaire (CIA)** par persistance du foramen ovale
 - Cloisonnement cono-troncal :
 - **Persistance du truncus** par défaut de cloisonnement
 - **Transposition des gros vaisseaux**
 - Division inégale avec atrésie ou sténose pulmonaire ou aortique
 - **Communication inter-ventriculaire (CIV)** par défaut d'alignement du septum conal qui ne rejoint pas le reste du septum.
- Anomalies du système artériel :
 - Anomalies de trajet de l'aorte ou de l'artère pulmonaire
 - **Persistance du canal artériel**
 - **Sténoses aortiques (en amont ou en aval de l'abouchement du canal artériel)** ou pulmonaires
- Anomalies du système veineux :
 - Anomalies des retours veineux
 - Défaut d'incorporation des veines pulmonaires dans l'oreillette G

Figure 45 : Du point de vue anatomique

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.

4.2. Du point de vue fonctionnel

Du point de vue fonctionnel, ces malformations ont des conséquences circulatoires qui peuvent être responsables de la mort fœtale ou apparaître au moment de la naissance ou dans la période post-natale. A l'exception de l'hypoplasie ventriculaire gauche rapidement fatale, elles peuvent souvent bénéficier d'un traitement chirurgical.

- Les premières s'accompagnent d'un **shunt gauche-droit** avec augmentation de la pression pulmonaire du fait de la pression plus élevée dans le cœur gauche que dans le cœur droit: **CIV** (zone membraneuse du septum inter-ventriculaire), **persistance du canal artériel**, **CIA** (persistance du foramen ovale), canal atrio-ventriculaire.
- Les secondes s'accompagnent d'un **shunt droit-gauche** du fait d'une augmentation de pression dans la circulation pulmonaire et le cœur droit, avec passage de sang désaturé en oxygène vers la grande circulation et une cyanose (cardiopathies cyanogènes): **transposition des gros vaisseaux**, **Tétralogie de Fallot** (associant **CIV**, **sténose de l'infundibulum pulmonaire**, **dextroposition de l'aorte** et **hypertrophie ventriculaire droite**).
- Les sténose artérielles entraînent un hypertrophie ventriculaire en aval du rétrécissement, les conséquences circulatoires dépendent de leur localisation.

Figure 46 : Du point de vue fonctionnel

Ceci est une animation, disponible sur la version en ligne.