

La découverte de la circulation pulmonaire d'Ibn al-Nafîs

Une séquence du projet *Les découvertes en pays d'Islam*

Résumé

Après avoir laissé s'exprimer les enfants quant à leur représentation du trajet du sang dans le corps humain, cette séquence propose quelques pistes pédagogiques pour confronter les thèses d'Ibn al-Nafîs et de Galien au sujet de la circulation sanguine, et montrer ainsi pourquoi l'idée de Galien fut abandonnée au profit de celle d'Ibn al-Nafîs.

La circulation pulmonaire

La découverte de la circulation pulmonaire par Ibn al-Nafîs <i>Amor Chadli</i>	22
« Mon sang n’a fait qu’un tour » : <i>La découverte de la circulation pulmonaire</i> <i>Nadia Ouahioune et Corinne Fortin</i>	31
Texte pour enfants <i>Anne Fauche</i>	45

La découverte de la circulation pulmonaire par Ibn al-Nafîs

C'est au XIII^e siècle, au Caire, qu'Ibn al-Nafîs a décrit, pour la première fois, la circulation pulmonaire, ouvrant ainsi la voie à la découverte de la circulation du sang, qui bouleversa la médecine.

Ibn al-Nafîs est né à al-Karash, près de Damas (Syrie), vers l'an 1210. Il fit ses études médicales à l'hôpital al-Nûrî, qui disposait d'une très riche bibliothèque. Il eut pour maître Muhyî al-Dîn al-Dakhwâr, connu pour ses travaux en ophtalmologie. Il exerça d'abord à Damas puis, vers l'âge de trente ans, s'installa au Caire sur l'invitation du sultan al-Kâmil pour exercer à l'hôpital al-Nâsirî, l'établissement de soins et d'enseignement le plus réputé d'Orient. Il y forma de nombreux élèves et en devint le médecin-chef. En 1284, il quitta cet hôpital pour diriger le nouvel hôpital al-Mansûrî. Il décéda en décembre 1288 au Caire, après avoir légué ses biens et sa bibliothèque à cet hôpital.

Ibn al-Nafîs fut tout autant médecin que philosophe, linguiste et juriste. Épris de science, il organisait chez lui des débats regroupant médecins, philosophes et théologiens et se distinguait par un savoir très large et une grande indépendance d'esprit. Écrivain de talent, il laissa des ouvrages de théologie et de philosophie ainsi que de nombreux traités médicaux, notamment le *Kitâb al-shâmil fî l-sinâ'a al-tibbiya* (*Livre complet de l'art médical*) qu'il s'était proposé de rédiger en trois cents volumes, mais dont il ne réalisa que quatre-vingts. Ibn al-Nafîs commenta les livres d'Hippocrate ainsi que le *Canon* d'Avicenne qu'il dissocia en deux ouvrages, le premier, le *Mûjaz fî l-tibb* (*Abrégé de médecine*), traitant de la pratique médicale, le

La circulation pulmonaire

second, le *Sharh tashrîh al-Qânûn* (*Commentaire de l'anatomie du Canon*), traitant uniquement d'anatomie. Il fut le premier à ériger cette branche de la médecine en une discipline autonome.

Doué d'un sens aigu de l'observation doublé d'un doute créateur, Ibn al-Nafîs croyait aux faits tels qu'il les percevait. « L'anatomie, écrivait-il, est un art et non une science et l'art s'acquiert par la pratique alors que la science s'acquiert par l'étude. » Autrement dit, il estimait que rechercher le savoir uniquement dans les livres des Anciens était loin d'être suffisant. Ce sont ces qualités qui lui ont permis de transgresser les dogmes de l'époque en matière de circulation du sang, ancrés dans les esprits depuis plus d'un millénaire, et de comprendre le rôle des poumons dans la circulation.

Pour mieux saisir l'importance de la découverte d'Ibn al-Nafîs, rappelons très brièvement ces dogmes, énoncés par Hippocrate et Aristote en Grèce, par Hérophile et Érasistrate à Alexandrie (v^e et iv^e siècles avant J.-C.) puis par Galien à Rome (ii^e siècle) et qui prévalurent jusqu'au xiii^e siècle.

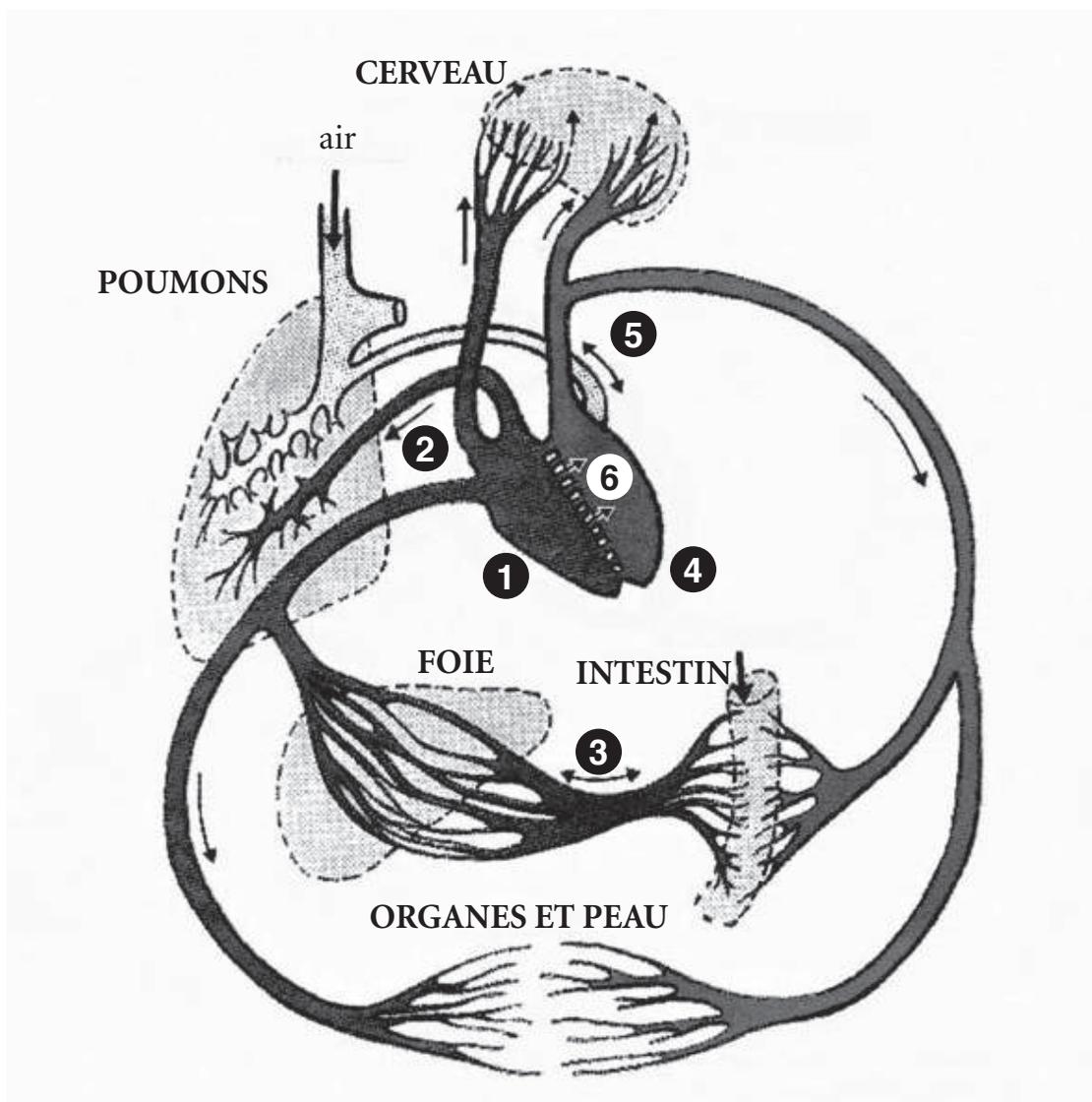
Pour les Anciens, le cœur était formé de deux compartiments bien distincts, un ventricule droit et un ventricule gauche séparés par une cloison. Les oreillettes n'étaient pas considérées comme des parties du cœur mais comme des sortes de vestibules prolongeant les veines afférentes : à droite, la « veine cave », formée par l'oreillette et la partie terminale des veines caves supérieure et inférieure ; à gauche, la « veine pulmonaire », formée par l'oreillette et la partie terminale des quatre veines pulmonaires. Ils considéraient donc que la « veine cave » et la « veine pulmonaire » étaient directement en rapport avec l'orifice auriculo-ventriculaire correspondant.

Pour Galien, le ventricule droit était en rapport avec les veines qui contiennent du sang qu'elles distribuent aux organes pour les nourrir. Dans ce système, le sang ne parvenait pas en totalité aux poumons. L'artère pulmonaire, en rapport avec ce ventricule, était considérée comme intervenant dans la nutrition du poumon et par conséquent comme une veine. Elle était dénommée « artérielle » en raison de l'épaisseur de sa paroi. La veine porte amenant le chyme intestinal (concentré de principes alimentaires puisés dans le tube digestif) au foie où il était transformé en

Les Découvertes en pays d'Islam

sang, intervenait aussi dans la nutrition du tube digestif. Elle était, de ce fait, le siège d'une circulation de sang et de chyme dans deux sens opposés. Le ventricule gauche était en rapport avec les artères. Sorte de chaudière, ce ventricule était le siège d'une chaleur innée partiellement refroidie par la respiration. Il générait le pneuma, ou souffle (ou encore esprit) vital, émanation vaporeuse développée à partir de la chaleur du ventricule gauche au contact de l'air venu des poumons par la veine pulmonaire et d'une petite

La circulation du sang selon Galien



1 : Ventricule droit

2 : Artère pulmonaire
[Veine artérielle]

3 : Veine porte

4 : Ventricule gauche

5 : Veine pulmonaire [Artère veineuse]

6 : Pores de la cloison interventriculaire

La circulation pulmonaire

quantité de sang raffiné qui traversait la cloison interventriculaire). Pour expliquer ce passage du sang à travers la cloison interventriculaire, Galien imagina l'existence de pores faisant communiquer les deux ventricules. Le pneuma généré dans le ventricule gauche et le sang parvenu à ce ventricule étaient diffusés par l'aorte à tous les organes, y compris au cœur, pour leur transmettre la vie et modérer leur chaleur. Dans ce système, la veine pulmonaire était considérée comme une artère, dénommée « veineuse » en raison de la minceur de sa paroi. Étant donné qu'elle apportait l'air au ventricule gauche et le pneuma aux poumons, elle était également le siège d'une circulation, dans deux sens opposés. Quant aux systèmes artériel et veineux, ils conduisaient tous deux le sang vers la périphérie où il s'épuisait sous forme de transpiration. De ce fait, le sang et le pneuma étaient sans cesse renouvelés.

Les médecins et philosophes des pays d'Islam qui précédèrent Ibn al-Nafis, tels al-Râzî (Rhazès), al-Mâjûsî (Haly Abbas), Ibn Sîna (Avicenne), al-Zahrâwî (Abulcassis) et Ibn Rushd (Averroès) ont tous prôné cette théorie. Ils ont été essentiellement des compilateurs en matière d'anatomie. Leurs contributions à cette discipline ont été fragmentaires, telle la description par al-Mâjûsî de passages faisant communiquer les ramifications artérielles et veineuses, préfigurant la notion de circulation capillaire. Comme Galien, ils expliquaient la structure des organes par leurs utilités, c'est-à-dire par des données physiologiques hypothétiques en adaptant la morphologie de ces organes à leur vision physiologique.

Il a fallu attendre le XIII^e siècle pour qu'Ibn al-Nafis réfute la conception de Galien et avance un schéma où le sang traverse les poumons avant de parvenir au cœur gauche et, de là, aux artères. Voici ce qu'il écrit : « Une fois que le sang a été raffiné dans la cavité droite du cœur, il doit nécessairement passer dans la cavité gauche, là où se forme le pneuma. Or, il n'y a pas de passage entre ces deux cavités car la substance du cœur en cet endroit est compacte, ne comportant ni passage apparent comme on le croyait communément, ni passage inapparent qui permettrait la traversée du sang comme l'a imaginé Galien. Les pores du cœur en cet endroit sont fermés et la substance du cœur est épaisse. Aussi, une fois raffiné, le sang doit nécessairement passer de la veine artérielle [artère pulmonaire] au

Les Découvertes en pays d'Islam

poumon pour se répandre dans sa masse, se mélanger à l'air, purifier sa partie fine puis pénétrer dans l'artère veineuse [veine pulmonaire] qui le conduit à la cavité gauche du cœur. Ce sang mélangé à l'air est devenu apte à générer le pneuma. Le reliquat du sang qui est moins raffiné est utilisé pour la nutrition du poumon. »

Ibn al-Nafis définit la structure des poumons comme étant formée des bronches, des ramifications de l'artère pulmonaire et des ramifications de la veine pulmonaire, le tout inclus dans une chair lâche et poreuse. Il pressent le mécanisme de l'hématose (enrichissement du sang en oxygène avec perte de gaz carbonique) : « L'air ne devient utile pour nourrir le pneuma que s'il se mélange à des constituants du sang pour former une combinaison constituée d'air et de ces constituants [...]. Le reste de l'air qui a été réchauffé et qui n'est pas utile pour réguler le pneuma a besoin d'être évacué pour laisser place à l'air qui va entrer après lui, soit isolément, soit mélangé aux constituants très fins du sang. Il est transporté au poumon pour être évacué au cours de l'expiration. » Il s'oppose enfin au double courant en sens inverse : « Dire que l'artère veineuse [veine pulmonaire] fait parvenir du cœur aux poumons le sang qui nourrit les poumons est tout à fait erroné. La nutrition des poumons ne se fait pas par cette artère [veine pulmonaire] car le sang de cette artère ne remonte pas de la cavité gauche du cœur vers les poumons étant donné que le sang qui est dans la cavité gauche provient des poumons et non que les poumons le prélèvent dans la cavité gauche. Quant au passage du cœur aux poumons, il se fait par la veine artérielle [artère pulmonaire]. »

Ainsi, la contribution d'Ibn al-Nafis en matière de circulation du sang se résume par les six points suivants :

1. il nie l'existence d'un passage du sang du ventricule droit au ventricule gauche à travers la cloison interventriculaire ;
2. il considère que le sang qui arrive aux poumons par l'artère pulmonaire le fait non pas tant pour les nourrir que pour se charger d'air et rejoindre, par les veines pulmonaires, le ventricule gauche où, selon la conception de l'époque, se forme le pneuma ;
3. il précise la circulation cardio-pulmonaire comme suit : le sang du ventricule droit arrive par l'artère pulmonaire aux poumons, se répand

Les Découvertes en pays d'Islam

dans leur masse, se combine à l'air qui arrive des bronches, se purifie, pénètre dans les ramifications de la veine pulmonaire par des « passages perceptibles » qui existent dans les poumons entre ces deux vaisseaux et parvient au ventricule gauche ;

4. il réfute l'existence d'une circulation dans deux sens opposés dans la veine pulmonaire et dans la veine porte ;

5. il a une prémonition en imaginant que les échanges entre le sang drainé par l'artère pulmonaire et l'air amené par les bronches jusqu'aux alvéoles s'effectuent dans les poumons par « la combinaison de certains constituants fins du sang avec une structure aériforme contenue dans l'air inspiré ». Ces « constituants fins du sang » et la « structure aériforme » seront identifiés au XVIII^e siècle par Lavoisier comme étant l'hémoglobine et l'oxygène qui se combinent pour former l'oxyhémoglobine ;

6. il dit aussi que l'air qui n'est pas utile pour générer le souffle vital est évacué au cours de l'expiration pour laisser place à un air nouveau. On sait depuis que l'air expiré draine le gaz carbonique formé dans les tissus.

On s'est demandé si Ibn al-Nafis n'a fait que formuler une hypothèse qui s'est révélée exacte ou s'il s'est basé sur une connaissance anatomique approfondie. La lecture du *Commentaire de l'anatomie du Canon* permet de conclure que ses idées nouvelles proviennent d'une réflexion physiologique fondée sur ses connaissances anatomiques. Lorsqu'il affirme que la cloison interventriculaire ne présente aucune communication apparente ou inapparente, sa détermination donne à penser qu'il avait minutieusement examiné cette cloison. Fort de ses convictions, Ibn al-Nafis s'est opposé à Galien et à Avicenne qui prétendaient, par exemple, que le diaphragme était perforé de deux orifices dont le plus grand livrait passage à l'aorte et à l'œsophage. Il les corrige avec une grande assurance : « L'aorte n'a pas besoin de perforer le diaphragme pour le traverser car elle le longe dans sa partie basse au niveau de la 12^e vertèbre dorsale, c'est-à-dire qu'elle passe derrière le diaphragme et s'adosse aux os du rachis [...]. J'ai souvent constaté l'inverse de ce qu'ils ont eu l'occasion d'observer à plusieurs reprises au cours de leurs dissections. » De telles affirmations ne laissent pas de doute sur le fait qu'Ibn al-Nafis ne s'est pas contenté du raisonnement mais l'a enrichi par l'expérience, autrement dit qu'il a procédé à des vérifications

La circulation pulmonaire

anatomiques sur l'homme. Rappelons qu'à cette époque, bien que cette pratique n'ait jamais été expressément interdite par le Coran, disséquer le corps humain était considéré par les théologiens comme une profanation sacrilège.

Au xvi^e siècle, Padoue renouait avec la logique rationnelle d'Aristote à travers les écrits des philosophes arabes. La traduction complète du *Canon* d'Avicenne paraissait en 1527. L'édition de 1547, publiée à Venise par Paolo Alpago, contenait une critique, par Ibn al-Nafis, de la doctrine de Galien sur le cœur et les artères. Ainsi, les idées d'Ibn al-Nafis circulaient parmi les anatomistes dont certains s'étaient inspirés de ses travaux, sans le citer. Michel Servet inséra la description de la circulation pulmonaire dans un ouvrage traitant de religion, *Christianismi restitutio*, qu'il publia en 1553, et qui lui valut pendant près de quatre siècles la réputation de découvreur de cette circulation.

De nombreux témoignages confirment que les médecins de l'école de Padoue, au xvi^e siècle, connaissaient les travaux d'Ibn al-Nafis et s'en étaient inspirés. Francesca Luchetta, dans un ouvrage sur Andrea Alpago, nous apprend que ce dernier s'était rendu en 1487 à Damas en tant que médecin du consul vénitien, qu'il avait été initié aux nuances de la langue arabe et à l'étude des manuscrits et ouvrages de médecine et de philosophie par un médecin et philosophe arabe, Chems Eddine Ibn al-Makki, qu'il appelait son « maître ». Après un séjour de plus de trente ans, il retourna à Padoue en 1520, rapportant avec lui une riche récolte de manuscrits et d'ouvrages arabes dont il avait traduit certains en latin, parmi lesquels des écrits d'Ibn al-Nafis. Après sa mort en 1522, son neveu, Paolo Alpago diffusa ces ouvrages.

En 1598, William Harvey se rendit à Padoue considérée comme la capitale des anatomistes d'Europe, pour poursuivre sa formation médicale commencée à Cambridge. En 1602, il reçut son diplôme de docteur en médecine. Voici ce qu'on lit dans son *Journal* (établi par le professeur Jean Hamburger en 1983) : « Je me souviens de la griserie qui s'empara de moi lorsque soudain, je sus que la circulation du sang m'avait livré son secret [...]. Je me trouvais à Padoue et j'avais vingt-quatre ans quand l'événement se produisit [...]. Et bientôt, je devais découvrir dans ces murs et dans

Les Découvertes en pays d'Islam

ces rues de Padoue, une fascinante ébullition d'esprit. Quelles influences précieuses n'ai-je pas reçu de professeurs fameux comme mon cher Fabrice d'Acquapendente. Il fallait l'entendre raconter comment il avait découvert les valves des veines qui, à l'intérieur de ces vaisseaux, semblent interdire au sang de se diriger vers l'extrémité des membres. Si j'étais resté en Angleterre, si je n'avais pas entendu mon cher Fabrice en parler abondamment, j'aurais manqué d'un pion essentiel sur l'échiquier de mes recherches. »

La découverte de la circulation du sang par William Harvey en 1628 a donc été précédée par les travaux de deux éminents initiateurs restés longtemps dans l'ombre, Ibn al-Nafis qui, dans les années 1240, a décrit la circulation pulmonaire et pressenti le mécanisme de l'hématose, et Fabrice d'Acquapendente qui, en 1560, a mis en évidence le rôle des valvules veineuses, lesquelles ont définitivement fixé l'orientation du sang veineux vers le cœur droit et non vers les « extrémités ».

On peut conclure que la découverte de la circulation du sang a été une construction anatomique et physiologique gréco-arabo-occidentale réalisée par étapes. Bénéficiant des connaissances antérieures, Ibn al-Nafis eut le mérite de remettre en cause les idées de Galien qui prévalaient depuis onze siècles et d'engager la question de la circulation du sang dans une direction réaliste qui ouvrit la voie aux recherches ultérieures. S'appuyant sur les débats et les controverses passionnées soulevées par les anatomistes padouans à propos de cette question, William Harvey démontra, par une expérimentation rigoureuse, que le sang circule dans un système vasculaire clos, qu'il est distribué par l'aorte à l'ensemble du corps, qu'il revient par les veines caves au cœur droit puis aux poumons pour se revivifier avant de passer dans le cœur gauche et de recommencer son cycle. C'est lui qui donna au problème de la circulation sanguine sa forme définitive, jetant ainsi les bases de la cardiologie moderne.

Les références bibliographiques de ce texte figurent dans l'avant-propos de notre traduction en langue française du *Commentaire de l'anatomie du Canon d'Avicenne par Ibn al-Nafis*, Tunis, Simfact, 2005.



« Mon sang n'a fait qu'un tour »
*La découverte
de la circulation pulmonaire*

Pré-requis en cycle 3 de l'école primaire : première approche de la respiration dans la partie « Corps humain et éducation à la santé ».

Objectifs notionnels :

Cycle 3

- Connaître le rôle de la circulation dans la nutrition des organes ;
- Connaître les relations anatomiques entre l'appareil circulatoire et l'appareil respiratoire ;
- Appréhender les risques liés au tabagisme, à la consommation d'alcool et à celles des drogues.

Collège, classe de cinquième

- Comprendre que le sang circule à sens unique dans des vaisseaux qui forment un système clos ;
- Rôle du cœur dans la mise en mouvement du sang.

Référence au programme de sciences et technologie du cycle 3 de l'école primaire :

Corps humain et éducation à la santé (première approche de la circulation sanguine).

Référence au programme de science de la vie et de la terre au collège (classe de cinquième) :

Fonctionnement de l'organisme et besoins en énergie : rôle du cœur dans le bon fonctionnement de l'organisme.

Les Découvertes en pays d'Islam

Liste du matériel pour une classe de 25 à 30 élèves :

Chronomètre, tuyau en plastique transparent assez long (50 cm), seringues, gants en vinyle, pailles, trousse garnie de 4 instruments inox pour dissection (petite et grosse pinces, scalpel, une paire de ciseaux), 2 cœurs-poumons, 15 cœurs d'agneau en bon état avec 2 cm de vaisseaux sanguins (afin de pouvoir y introduire les tuyaux en plastique) – à commander chez le boucher –, prévoir 2 bassines blanches (pour mieux voir le sang), des éponges.

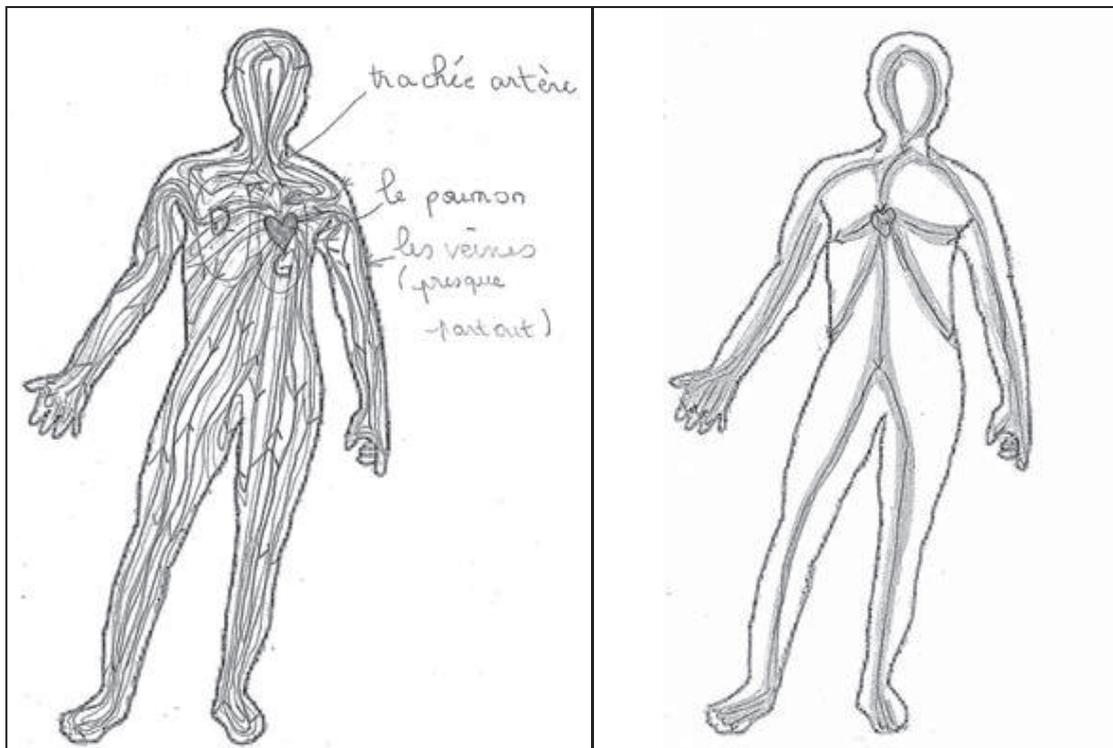
Vers le II^e siècle après J.-C., le médecin Galien propose une conception du trajet du sang dans le cœur qui fera autorité jusqu'au XIII^e siècle. Selon Galien, une partie du sang contenu dans la partie droite du cœur sert à nourrir les poumons, l'autre partie à éliminer des substances produites par le corps. Un peu de sang contenu dans la cavité droite du cœur passe aussi vers la cavité gauche en traversant la cloison qui sépare les deux moitiés du cœur.

Cette conception sera remise en cause, vers 1230, par Ibn al-Nafis, médecin chirurgien au Caire. Ibn al-Nafis fait une autre proposition : le sang sort de la cavité droite du cœur pour aller aux poumons, mais revient vers la cavité gauche du cœur, sans traverser la cloison. Ce n'est qu'au XVI^e siècle que le trajet du sang entre le cœur et les poumons, décrit par Ibn al-Nafis, sera « redécouvert » en Europe, par Servet et par Colombo. Au XVII^e siècle, Harvey s'appuiera sur l'idée du flux sanguin entre le cœur et les poumons pour construire son modèle circulaire de trajet du sang entre le cœur et tous les organes.

Ce bref rappel historique illustre à quel point les seules connaissances anatomiques ne renseignent pas, ou si peu, sur le fonctionnement réel des organes, car les mêmes faits anatomiques peuvent être différemment interprétés. Nous proposons, ici, de discuter quelques pistes pédagogiques pour confronter les thèses d'Ibn al-Nafis et de Galien, et montrer ainsi pourquoi l'idée de Galien fut abandonnée au profit de celle d'Ibn al-Nafis.

Les représentations des enfants face aux conceptions scientifiques

Les enfants ont leurs propres conceptions du trajet du sang dans le corps. Cela va de l'irrigation, telle l'eau s'écoulant dans les canaux d'un jardin, à l'idée de distribution du sang à partir d'un organe central (généralement le cœur), ou de circulation, au sens d'un trajet en une boucle fermée. Les dessins des enfants représentent aussi bien des « tuyaux » en réseau dans lesquels le sang est canalisé, mais pas nécessairement en mouvement, que des « tuyaux » reliés au cœur et parfois aux poumons.



Représentations du trajet du sang dans le corps

Dessin de Lice

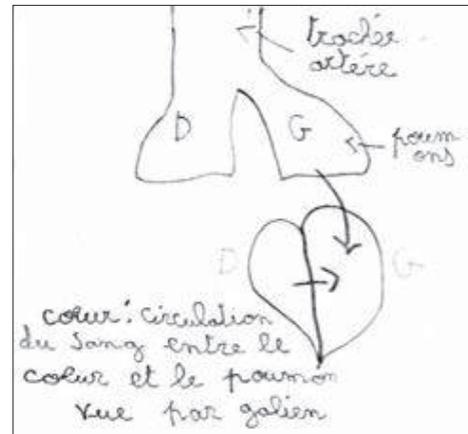
Dessin d'Aurore

(CM2, école Joliot-Curie, Montreuil) (CM1, école Joliot-Curie, Montreuil)

La confrontation entre ces conceptions « spontanées » et les conceptions historiques de Galien et d'Ibn al-Nafis permet d'engager, en classe, une discussion autour de quelques questions : que dit Galien ? que dit Ibn al-Nafis ? est-ce que le sang bouge ? bouge-t-il dans tous les sens ou dans un seul seulement, quel est le trajet du sang dans le cœur et dans le corps, etc. ?

La conception de Galien

Selon Galien, une partie du sang contenu dans la partie droite du cœur traverse la cloison par de petits pores (non visibles à l'œil nu) pour aller dans la partie gauche. L'air inspiré venant des poumons passe directement dans le cœur gauche.

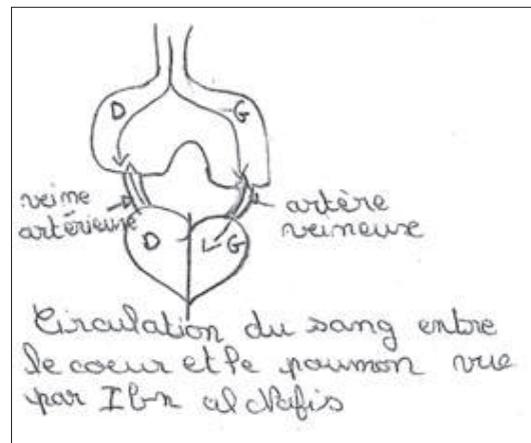


Dessin de Sarah

(CM1, école Joliot-Curie, Montreuil)

La conception d'Ibn al-Nafîs

Ibn al-Nafîs suppose, contrairement à Galien, que les poumons contiennent du sang ; que celui-ci vient du cœur et y retourne par deux chemins différents : « Il n'y a pas de passage entre ces deux cavités [droite et gauche] car la substance du cœur en cet endroit est compacte, ne comprenant ni de passage apparent comme on le croyait communément, ni de passage inapparent qui permettrait la traversée du sang comme l'a imaginé Galien. [...] Aussi, une fois raffiné, le sang doit nécessairement passer de la veine artérielle [artère pulmonaire] au poumon pour se répandre dans la masse, se mélanger à l'air, purifier sa partie fine puis pénétrer dans l'artère veineuse [veine pulmonaire] qui l'amène à la cavité gauche du cœur. »



Dessin de Kévin

(CM2, école Joliot-Curie, Montreuil)

Comment établir un lien fonctionnel entre le cœur et les poumons ?

Pour beaucoup d'enfants, le cœur et les poumons ont deux fonctions séparées :

- le cœur pour répartir le sang dans le corps ;
- les poumons pour respirer.

La circulation pulmonaire

Comment vérifier un possible lien entre ces deux organes comme le suppose Ibn al-Nafis ?

Le poumon est connu comme organe de la respiration, assurant l'entrée (l'inspiration) et la sortie d'air (l'expiration), tandis que le cœur est un organe qui contient du sang. Aussi, certains enfants soulignent le lien entre l'essoufflement lors d'un effort physique et l'accélération des battements du cœur : « Si on court trop longtemps, le cœur bat très vite, trop fort et on a du mal à respirer. » Un moyen d'établir une corrélation entre respiration et activité cardiaque consiste à mesurer les fréquences respiratoire et cardiaque, au repos et après un effort.

La mesure de la fréquence cardiaque

Elle peut se faire par la prise du pouls : il suffit de placer l'index et le majeur sur l'artère radiale (à l'intérieur du poignet) ou sur l'artère carotide du cou (à droite ou à gauche du larynx, sous la mâchoire inférieure). Ces pulsations correspondent à la propagation, dans la paroi de l'artère, d'une onde résultant de la contraction du cœur.

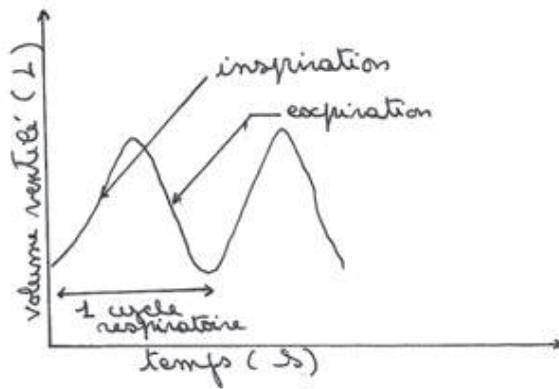
La fréquence cardiaque correspond au nombre de pulsations par minute. Chaque élève note son nombre de pulsations en une minute, au repos et après un exercice physique (après vingt flexions, par exemple).



La mesure de la fréquence respiratoire

Il s'agit de compter le nombre de cycles respiratoires. Chaque cycle est constitué d'une inspiration et d'une expiration. La fréquence est donc le nombre de cycles respiratoires en une minute. Là encore, cette mesure est d'abord effectuée au repos puis après un exercice physique (le même que celui réalisé pour la prise du pouls).

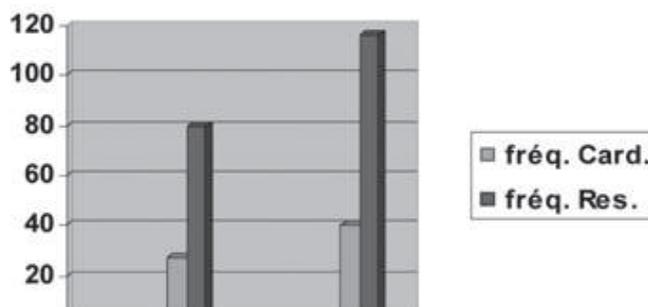
Les Découvertes en pays d'Islam



Les mesures sont alors consignées dans un tableau récapitulatif pour obtenir une moyenne.

Activités	Repos	Exercice physique
Fréquence respiratoire	26	40
	27	42
	28	40
	Moyenne = 27 cycles/min	Moyenne = 40,6 cycles/min
Fréquence cardiaque	80	120
	90	120
	70	110
	Moyenne = 80 pulsations/min	Moyenne = 116 pulsations/min

Représentation des résultats sous forme d'histogramme.



Les fréquences – cardiaque et respiratoire – varient de la même façon, au repos comme à l'effort. Les enfants envisagent alors de rechercher un lien explicatif entre les deux.

Pour la majorité des enfants, l'air inspiré passe dans les poumons où il se transforme en air expiré, sans se « mélanger » au sang. Un retour à la conception d'Ibn al-Nafis permet de s'interroger sur la présence du sang dans les poumons. Comment l'y mettre en évidence ?

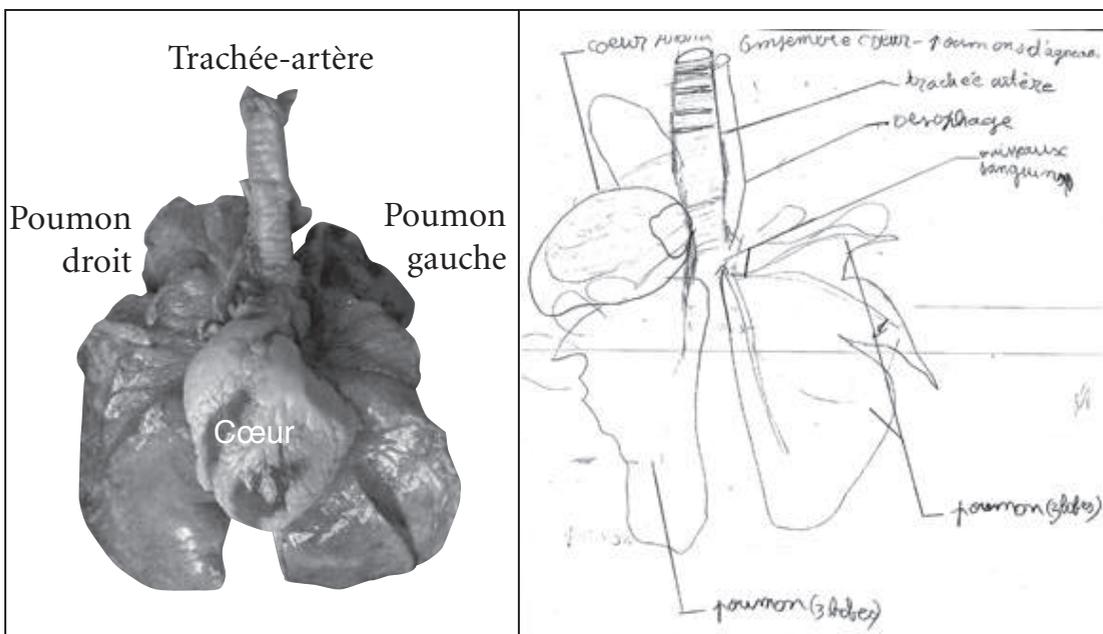
La circulation pulmonaire

Y a-t-il du sang dans nos poumons ?

Pour vérifier la présence de sang dans les poumons, les enfants observent, touchent et découpent des poumons. Un ensemble cœur-poumons, de préférence de mouton, est utilisé pour la manipulation (il faut prévoir au moins deux poumons-cœurs, l'un servant de témoin pour le comparer avec l'autre qui fait l'objet de manipulations).

L'observation à l'œil nu permet de découvrir deux poumons formés de trois lobes et la présence de deux types de « tuyaux » : ceux qui sont durs au toucher avec des anneaux (trachée et bronches) et ceux qui sont mous (les vaisseaux sanguins).

Pour vérifier que de l'air entre et sort des poumons, les enfants proposent de souffler dans la trachée (il est cependant préférable d'utiliser une seringue



Appareil cardio-respiratoire

Photo Didier Pol
(Multimédia)

Dessin d'observation de Sarah
(CM1, école Joliot-Curie, Montreuil)

Ensemble cœur-poumons (vue externe). Il s'agit d'un bloc cœur-poumons de mouton – l'organisation générale de l'appareil cardio-respiratoire du mouton est similaire à celle de l'homme. Pour aider les enfants à comprendre que moitié gauche et moitié droite du cœur sont inversées lorsque le corps est vu de face, il est intéressant de disposer d'une radiographie du thorax (de face et de profil) qui leur permette de situer exactement le cœur et les poumons et de les dessiner en vue de face avec l'orientation gauche-droite.

Les Découvertes en pays d'Islam

remplie d'air que de souffler, c'est-à-dire d'expirer une certaine quantité de CO_2). En utilisant un tuyau d'arrosage introduit dans la trachée, et en pinçant celle-ci sur le tuyau pour obtenir une bonne étanchéité, les enfants soufflent. Les poumons se gonflent et deviennent quasiment blancs. Les poumons dans lesquels les enfants n'ont pas soufflé demeurent rouges et n'augmentent pas de volume. Quant au cœur, il ne subit aucune modification de couleur ou de volume. Cette manipulation montre l'entrée de l'air dans les poumons par la trachée, mais pas sa sortie. En comparant par le toucher le poumon gonflé et celui non gonflé, on constate que le premier présente un aspect granuleux avec des bulles qui éclatent sous les doigts, tandis que le second reste mou. Des coupes transversales de poumons gonflés et non gonflés de 2 cm d'épaisseur placées dans des bassines remplies d'eau permettent d'observer, pour les poumons gonflés, la présence de quelques petits caillots de sang et de bulles et, pour les poumons non gonflés, la présence de quelques petits caillots mais l'absence des bulles.

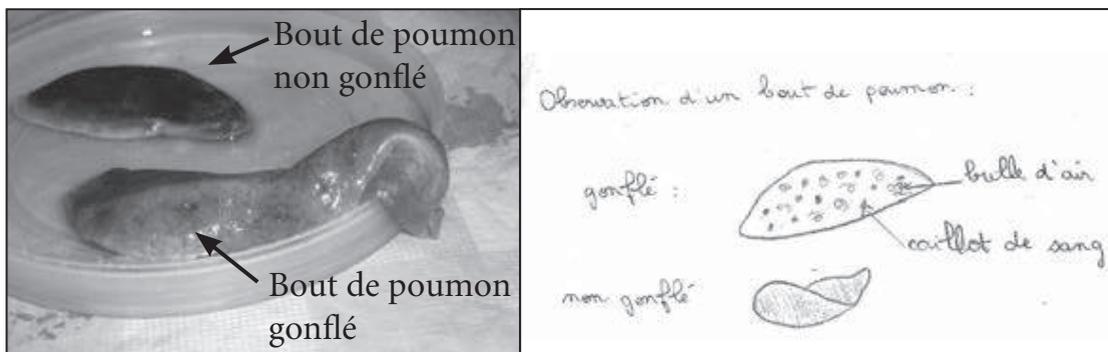


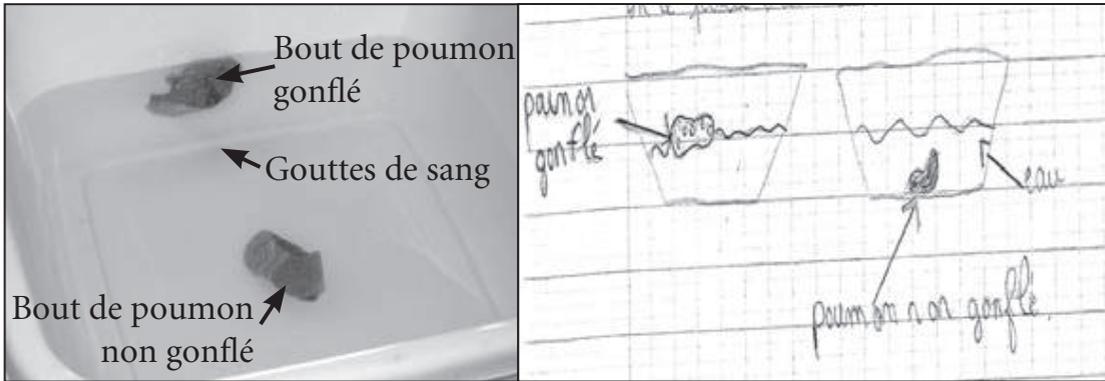
Photo Nadia Ouahioune,
(*La main à la pâte*)

Dessin de Lice
(CM2, école Joliot-Curie, Montreuil)

Certains enfants font une analogie avec le bain dans leur baignoire et les gaz « relâchés » !

Le fragment de poumon gonflé flotte tandis que le bout de poumon non gonflé coule au fond de la bassine. À leur grande surprise, les enfants constatent aussi que des gouttes de sang s'échappent des morceaux de poumons. L'origine des bulles est expliquée, par les enfants, par la présence de « tuyaux » pour l'air, et celle du sang par la présence d'autres « tuyaux ». Ils écrasent alors les fragments de poumons pour chasser l'air et les gouttes de sang.

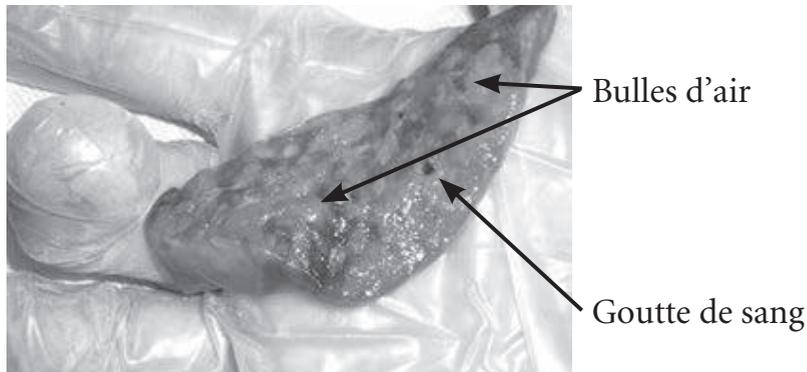
La circulation pulmonaire



Fragments de poumons gonflé et non gonflé plongés dans une bassine d'eau

Photo Nadia Ouahioune,
(*La main à la pâte*)

Dessin de Lice
(CM2, école Joliot-Curie, Montreuil)



Les enfants distinguent donc des « tuyaux » qui transportent l'air (la trachée, les bronches) et des « tuyaux » qui contiennent du sang (les vaisseaux sanguins).

Un retour à l'observation de l'ensemble cœur-poumons va alors permettre de visualiser les connexions anatomiques des vaisseaux sanguins entre le cœur et les poumons et de s'interroger sur le trajet du sang entre les deux organes.

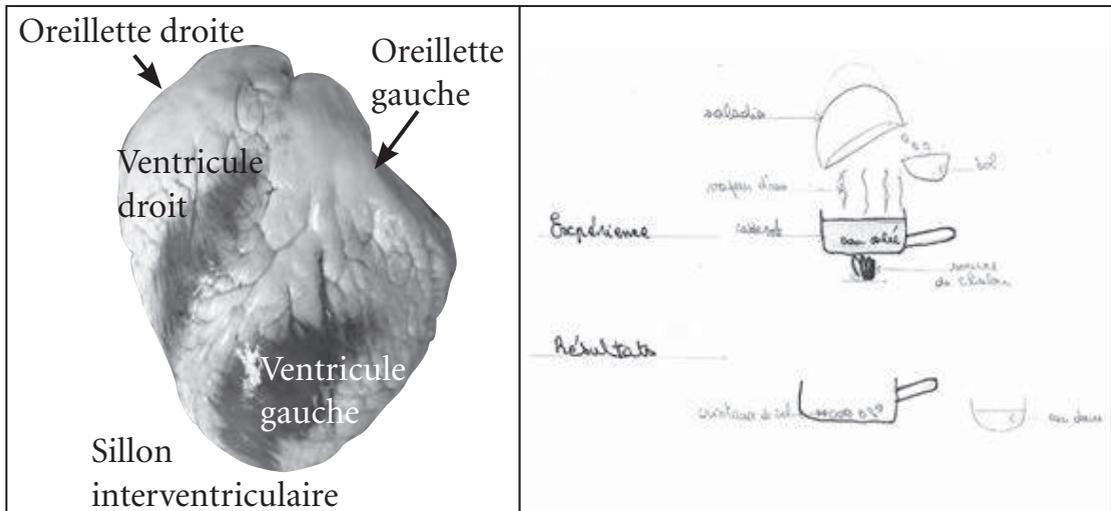
Quel est le trajet du sang entre le cœur et les poumons ?

À cette étape du raisonnement, il est important de revenir aux conceptions de Galien et d'Ibn al-Nafîs pour reprendre leurs hypothèses sur le trajet du sang dans le cœur.

D'après Galien, la cloison interventriculaire est perméable et le sang la traverse de la cavité droite vers la cavité gauche par de petits pores.

Les Découvertes en pays d'Islam

D'après Ibn al-Nafis, la cloison interventriculaire est imperméable. Le sang sort de la cavité droite du cœur pour rejoindre les poumons et revient des poumons vers la cavité gauche du cœur.



Cœur de mouton en face ventrale

Photo Didier Pol, Multimédia

Dessin d'Aurore
(CM2, école Joliot-Curie, Montreuil)

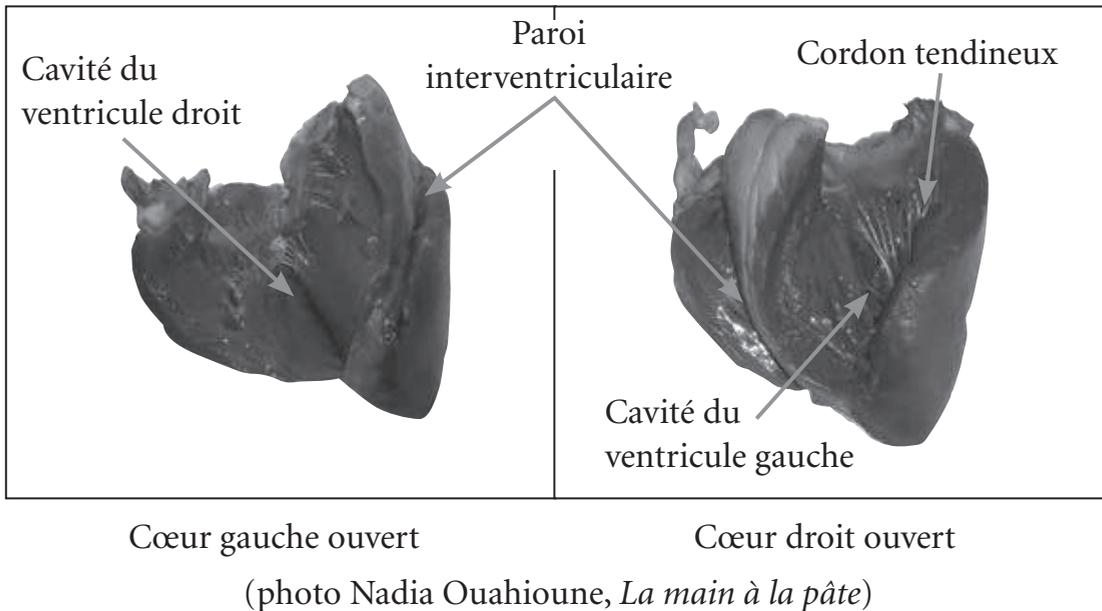
Pour tester ces deux hypothèses, il faut repérer préalablement les faces ventrale et dorsale du cœur : la face ventrale, à l'inverse de la face dorsale, présente un sillon interventriculaire en oblique et elle est renflée. Le sillon interventriculaire indique le tracé de la cloison de séparation entre les moitiés droite et gauche du cœur. À l'aide de pailles introduites dans les vaisseaux sanguins, il est possible de constater que le cœur est doté de :

- quatre cavités : deux oreillettes et deux ventricules ;
- deux types de vaisseaux sanguins sur la partie supérieure du cœur : les artères, à paroi blanche et rigide, et les veines, à paroi rouge et molle. Les artères désignent les vaisseaux contenant le sang qui sort du cœur, et les veines ceux contenant du sang qui revient au cœur.

Comment tester l'hypothèse de Galien ?

En ouvrant le cœur (voir les photos ci-contre), on constate que la cloison interventriculaire présente une texture rugueuse qui laisse penser à certains enfants qu'il existe bien des « espèces de trous » qui peuvent laisser passer le sang d'un ventricule à l'autre.

La circulation pulmonaire



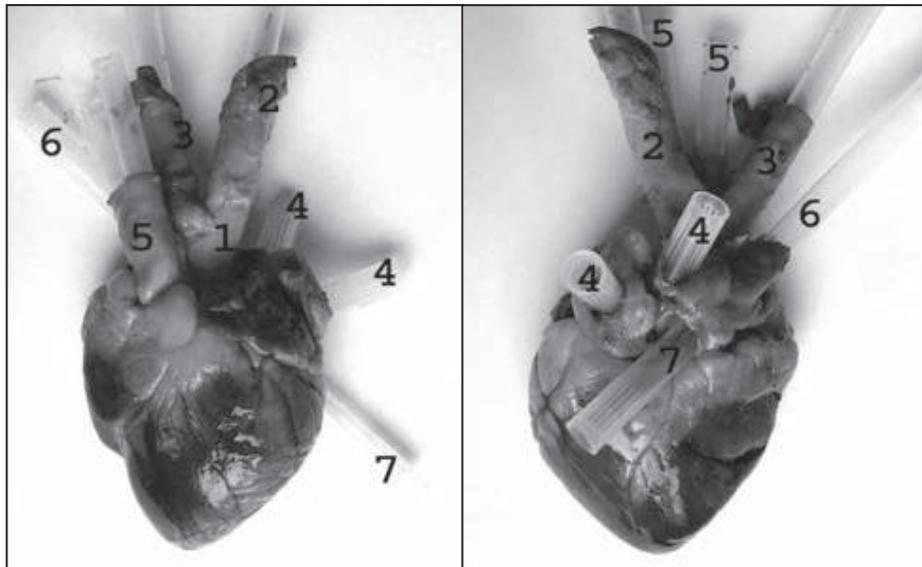
Pour tester s'il existe ou non des « trous » au niveau de la cloison, les enfants imaginent de remplir le cœur droit avec de l'eau colorée (à l'encre simplement) d'un volume déterminé, et de fermer, à l'aide d'un élastique, les deux demi-cœurs. Pour cela, prendre le cœur séparé des poumons avec des tronçons de vaisseaux sanguins assez longs (2 à 4 cm), comme expliqué en annexe. Par ailleurs, le cœur peut être maintenu « debout » dans un verre en plastique transparent. Quelques heures après, ou en fin de journée, on prend soin de vider le cœur en le retournant. D'abord le cœur droit : de l'eau colorée sort, et le volume recueilli est identique à celui introduit initialement. La même opération est réalisée avec le cœur gauche, mais aucun liquide ne sort. L'eau colorée n'est donc pas passée dans le cœur gauche. La cloison qui sépare les deux cœurs est donc bien étanche, comme l'affirmait Ibn al-Nafis.

Comment tester l'hypothèse d'Ibn al-Nafis ?

Pour Ibn al-Nafis, le trajet du sang entre le cœur et les poumons se fait donc en sens unique selon les étapes suivantes : arrivée du sang dans le cœur droit → sortie du cœur droit par l'artère pulmonaire → entrée du sang dans les poumons → sortie du sang des poumons → retour du sang au cœur gauche par la veine pulmonaire. Ainsi, selon Ibn al-Nafis, le sang passe du cœur droit aux poumons par l'artère pulmonaire, se mélange au « souffle vital » et rejoint le cœur gauche par la veine pulmonaire.

Les Découvertes en pays d'Islam

Les enfants proposent d'injecter de l'eau colorée dans les vaisseaux, pour simuler le sang et voir ainsi où se font l'entrée et la sortie de l'eau colorée. Après plusieurs tentatives dans les différents vaisseaux, les enfants notent que l'eau colorée injectée dans la veine cave (au niveau du cœur droit) ressort par l'artère pulmonaire. Si l'injection se fait par la veine pulmonaire, au niveau du cœur gauche, l'eau ressort par l'artère aorte.



Cœur de mouton

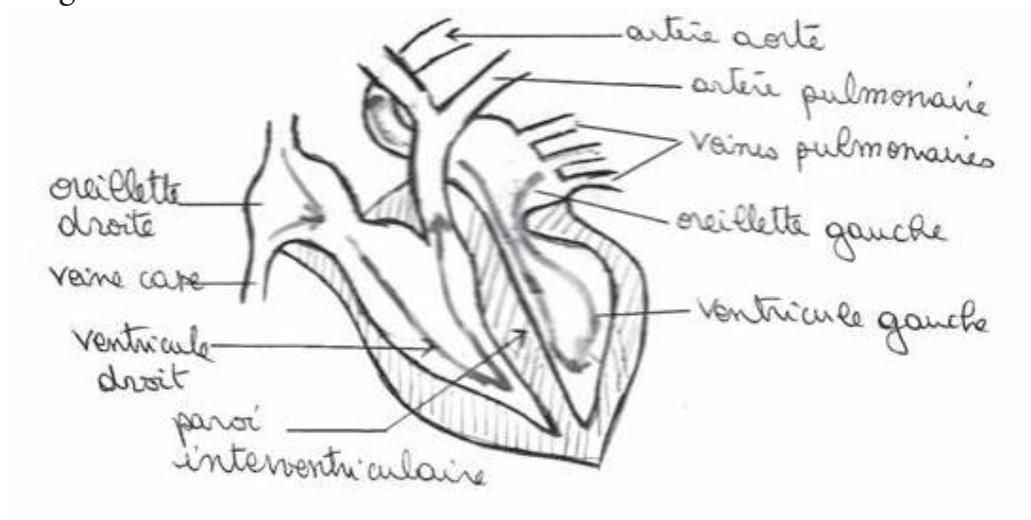
Face antérieure

Face postérieure

(photos Didier Pol, Multimédia)

1 : départ du tronc aortique ; 2 : aorte ; 3 : tronc brachio-céphalique droit ; 4 : veine pulmonaire ; 5 : artère pulmonaire (repoussée vers la droite du cœur pour le départ de l'aorte) ; 6 : veine cave supérieure ; 7 : veine cave inférieure.

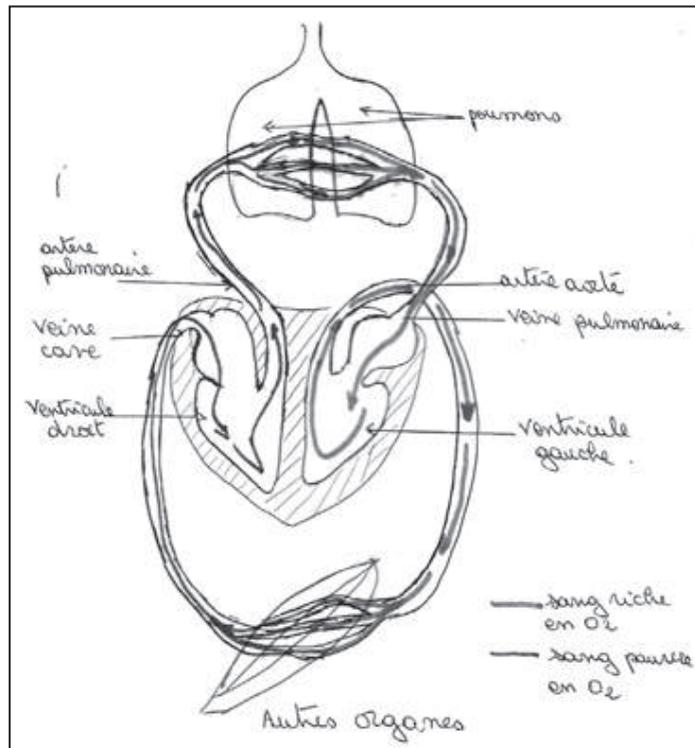
À l'aide d'un schéma du cœur disséqué, les enfants flèchent le trajet du sang dans le cœur :



La circulation pulmonaire

Épilogue

L'histoire de la circulation sanguine ne s'arrête pas avec Ibn al-Nafis. On lui doit d'avoir déterminé le déplacement du sang, du cœur droit aux poumons et des poumons au cœur gauche. Mais on doit à Harvey d'avoir démontré que le sang part du cœur et y revient en une boucle reliant la petite circulation, ou circulation pulmonaire, à la grande circulation.



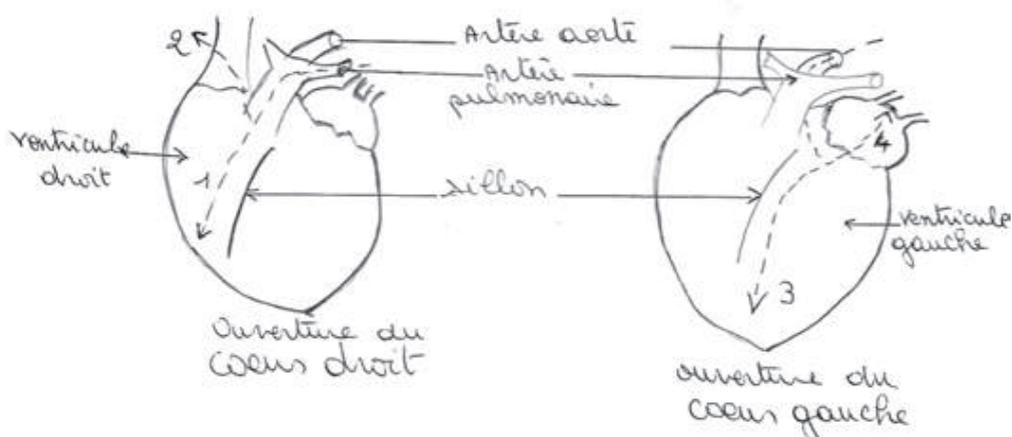
Annexe

Protocole expérimental de dissection

Placez le cœur dans la cuvette de dissection de façon à avoir la face ventrale face à vous.

Ouverture du cœur droit : Introduisez votre paire de ciseaux dans l'artère reliée au ventricule droit (artère pulmonaire) et couper tout le long au-dessus du sillon interventriculaire (incision 1-2).

Ouverture du cœur gauche : introduisez votre paire de ciseaux dans l'artère reliée au ventricule gauche et couper tout le long en dessous du sillon interventriculaire (incision 3-4).



Les Découvertes en pays d'Islam

Pour repérer les faces ventrale et dorsale du cœur

La face ventrale, à l'inverse de la face dorsale, présente un sillon interventriculaire en oblique et est renflée. Avec des pailles introduites dans les vaisseaux sanguins, on constate que le cœur est doté de cavités séparées par une paroi correspondant extérieurement au sillon interventriculaire.

Pour détacher le cœur de l'ensemble cœur-poumons

Il faut sectionner les vaisseaux du cœur en veillant à garder environ 4 cm au-dessus du cœur afin d'étudier plus facilement la couleur et la texture de la paroi. Ces tronçons de 4 cm peuvent aussi ultérieurement servir à y introduire des tuyaux en plastique et à y injecter de l'eau à l'aide de seringues et ainsi déterminer le trajet du sang à l'intérieur du cœur. Enfin, l'ouverture du cœur droit et du cœur gauche est plus aisée ainsi et les valvules sigmoïdes sont sauvegardées. On peut aussi se procurer des cœurs issus des abattoirs, mais bien souvent ils sont entaillés et les vaisseaux sont sectionnés trop court.



Enfants de CM1 de l'école Joliot-Curie (Montreuil)

Pour repérer les deux types de vaisseaux sanguins sur la partie supérieure du cœur

Les artères : paroi blanche et rigide,
Les veines (paroi rouge et molle).

Pour aller plus loin

La présence d'air dans les poumons est acquise par les enfants, de même le fait que l'air entre en contact avec le sang de nos poumons mais il en est tout autrement du « mélange » de l'air et du sang dans les poumons au niveau des alvéoles pulmonaires. L'enseignant proposera éventuellement une expérience qui leur permette de visualiser l'action de l'air, ou plus exactement du dioxygène sur le sang.

Deux flacons contenant du sang sont utilisés. Dans l'un, on place un bulleur d'aquarium et le sang prend une couleur rouge vif, tandis que le second fermé, présente un sang de couleur rouge sombre.

La différence de coloration des deux flacons est l'occasion de relancer le questionnement sur le lien entre l'air et le sang contenu dans les poumons : comment le sang arrive-t-il aux poumons ? d'où vient-il ?

Le jeu favori de Nabil et de sa sœur Fadila était de résoudre les énigmes qui surgissaient dès qu'ils se mettaient à observer ce qui se passait autour d'eux, ou en eux. Ils étaient d'autant plus passionnés qu'avec le temps, un peu de magie s'en mêlait, comme le jour où ils se demandèrent pourquoi leur cœur battait si fort à l'intérieur de leur corps quand ils étaient essoufflés...

Tout avait commencé par une course effrénée de Nabil et Fadila pour échapper à l'une de leurs grandes sœurs qu'ils avaient taquinée. Ils venaient d'atteindre sans encombre leur cachette au bord du fleuve et étaient très essoufflés. Les bras repliés sur son torse, Nabil interpella sa sœur :

— Fadila, pose tes mains sur ta poitrine, tu sens comme ça bat fort ?

— Oui, c'est mon cœur qui bat très fort et j'ai du mal à reprendre mon souffle, je respire trop vite.

— Moi aussi, Fadila, il faut attendre un peu.

Pourtant, il reprit aussitôt la parole :

— Pose tes mains sur ton cou, là aussi ça bat fort.

— Oui, mais j'ai l'impression que ça commence à se calmer, et en même temps nous respirons moins vite !

— Oui, ça se calme, mais je me demande ce qui battait comme ça sous mes doigts.

— Nabil, c'était du sang !

— Du sang, vraiment ? Comment en être sûr ? On ne peut pas regarder comment ça se passe au-dedans du corps tant qu'on est vivant, c'est ça le problème !

Les Découvertes en pays d'Islam

Un peu déçus que leur énigme ne soit pas plus vite résolue, Nabil et Fadila partirent marcher le long du fleuve puis le long des canaux d'irrigation qui arrosaient les champs. Fadila s'arrêta brusquement :

— Regarde, Nabil ! L'eau va rejoindre chaque petite parcelle de terre le long de ces rigoles ! Et si le courant devient trop fort, ça déborde ! Ça me fait penser au sang qui coule quand nous nous blessons...

— Tu as des idées bizarres, Fadila ! Ici, c'est de l'eau qui coule, et elle vient du fleuve, alors que le sang, normalement, il reste dans le corps !

— Mais je sais bien, j'essaie juste de comprendre ! Et puis, avoue que toi aussi, tu aimerais bien savoir comment ça se passe à l'intérieur de nous !

C'est alors que Nabil et Fadila entendirent un immense éclat de rire. Ils se retournèrent et virent un homme dont les vêtements et le turban étaient d'un blanc immaculé, comme sa barbe.

— Vous avez entendu tout ce que nous disions et vous vous moquez de nous ? Qui êtes-vous ?

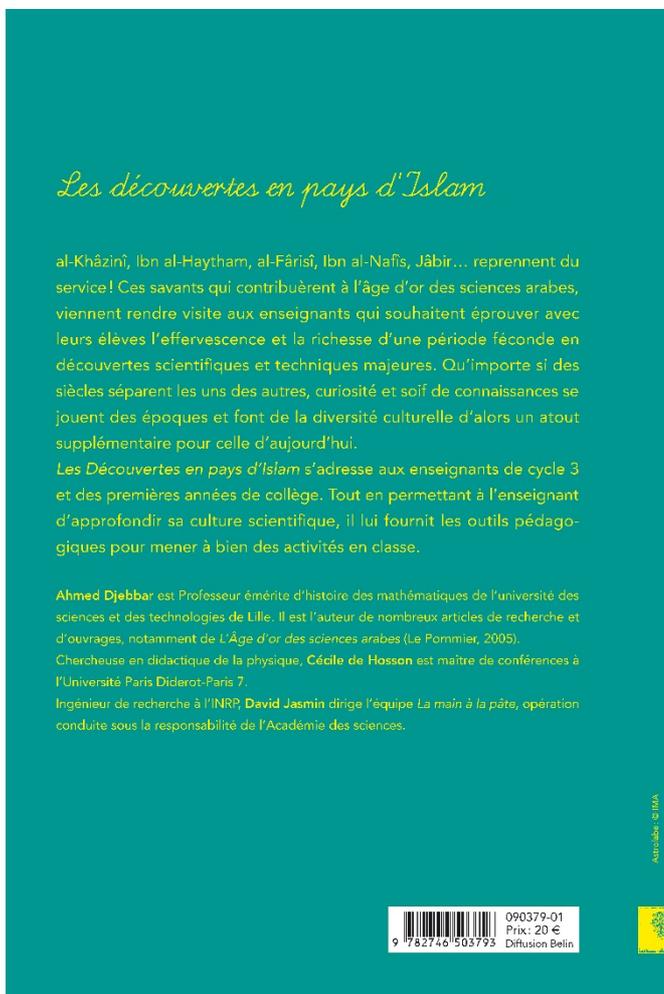
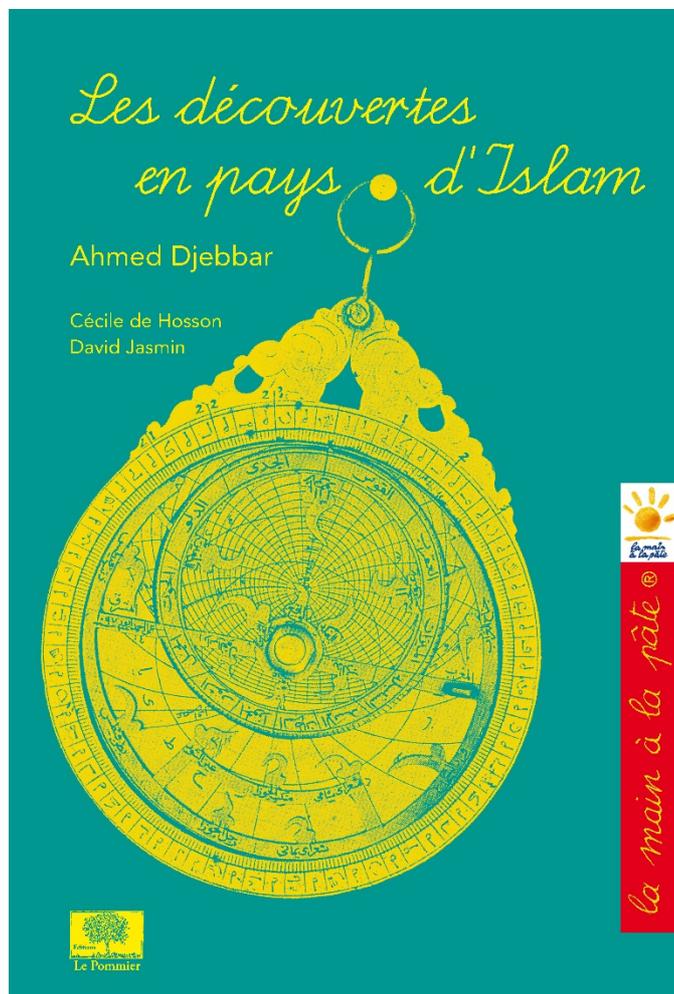
— Ce n'est pas de vous que je me moque, mais des savants dont j'ai lu les livres et qui étaient loin d'avoir d'aussi bonnes idées que vous ! Je m'appelle Ibn al-Nafis, j'ai dirigé un hôpital pour soigner les vivants, mais je me suis aussi intéressé à l'intérieur du corps de ceux qui ne l'étaient plus.

— Ibn al-Nafis, voudriez-vous, s'il vous plaît, nous aider à répondre à nos questions ?

— Oui, mais pas ici, car c'est très bien de réfléchir, mais il faut aussi observer. Suivez-moi, et vous comprendrez comment le sang passe par le cœur et par nos poumons pour nous garder vivants !

Ce qui arriva ensuite ne nous est pas parvenu, c'était il y a si longtemps, la mémoire s'est perdue ! Il n'en reste pas moins que c'est bien Ibn al-Nafis qui le premier a découvert comment le sang se renouvelle perpétuellement en nous à partir de l'air que nous respirons. Et d'une manière ou d'une autre, comme il a autrefois accompagné Nabil et Fadila, il accompagne aujourd'hui tous ceux et toutes celles qui se posent les mêmes questions. D'une manière ou d'une autre...

Cette ressource est issue du projet thématique *Les découvertes en pays d'Islam*, paru aux Éditions Le Pommier.



Retrouvez l'intégralité de ce projet sur : <https://www.fondation-lamap.org/projets-thematiques>.

Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE