

# Cinquième plongée

## Situation

Jérémy se présente au même centre le lundi après-midi pour sa cinquième plongée.

## Communication

Lundi, 14h au centre de plongée

DP : Jérémy et Benoît, vous plongez encore ensemble cet après-midi si ça vous va.

Jérémy : Pas de problème pour moi. Qu'est-ce qui est prévu ?

DP : Je vous emmène sur une épave posée sur le sable à 20 mètres. C'est une barge de 10 mètres bien colonisée. Je vous laisse planifier votre plongée. Vous me donnerez vos paramètres sur le bateau.

Benoît: Super. Comme on ne consomme pas beaucoup on va pouvoir rester un moment.

Voix off : Le bateau arrive sur site de plongée. Les palanquées sont prêtes à se mettre à l'eau. Après le briefing, le DP demande à chaque palanquée les paramètres prévus de leur plongée.

DP: Jeremy et Benoît, qu'est-ce que vous comptez faire ?

Jérémy : On a prévu de rester 40 minutes à 20 mètres.

DP : Et vos paliers ?



*Qu'est-ce qu'un palier ?*

## Le palier

En plongée, lors de la remontée, il est parfois nécessaire de marquer des arrêts et de se maintenir quelques minutes à une certaine profondeur. On appelle ces arrêts des paliers. **L'objectif de ces arrêts est de laisser le temps à l'organisme d'éliminer l'azote dissous dans les tissus lors de la plongée.** On désigne cette assimilation de l'azote par le terme de saturation.



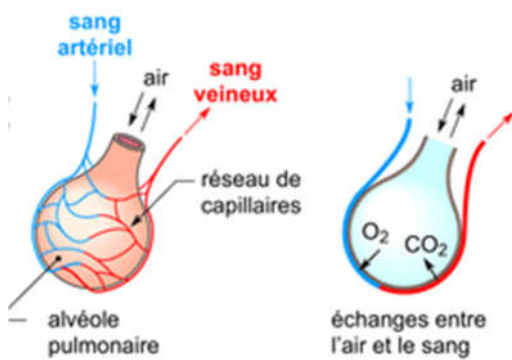


*Qu'est-ce que la saturation ?*



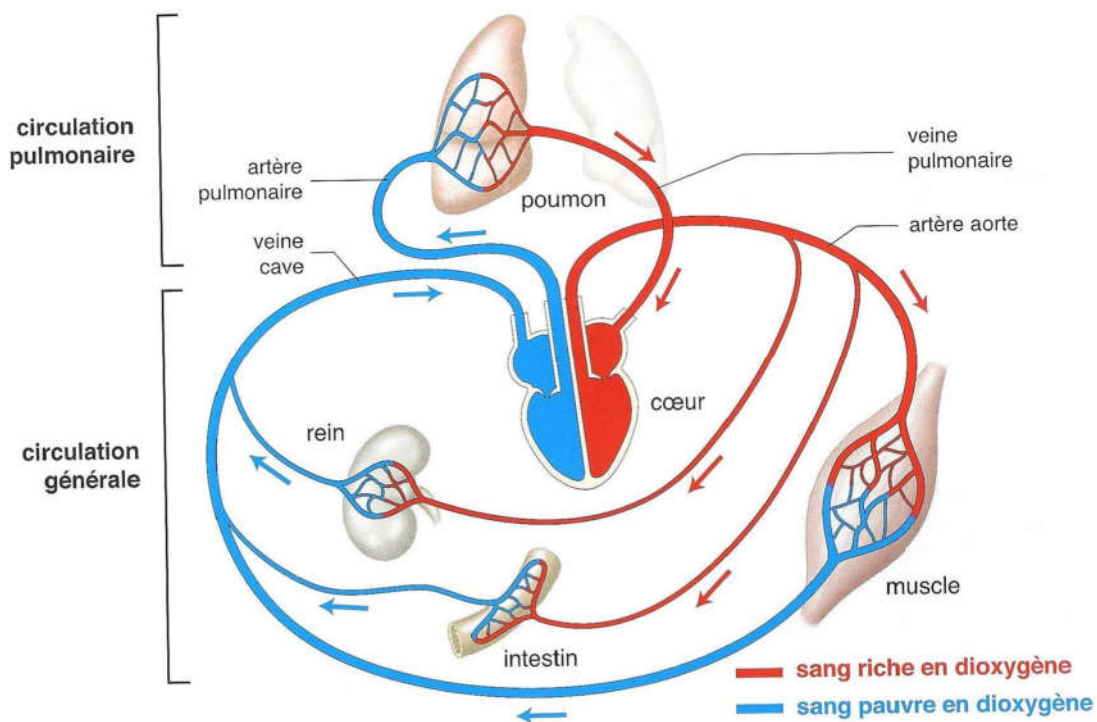
## Circulation des gaz dans l'organisme

Pour bien comprendre la saturation, reprenons le parcours des gaz dans l'organisme lors de la respiration.



L'air inspiré est composé à 21% d'oxygène et à 79% d'azote. Il traverse la trachée, les bronches et envahit les poumons pour venir remplir les alvéoles pulmonaires. Les parois des alvéoles, comme celles des capillaires qui les irriguent, sont fines et laissent passer les molécules de gaz de l'alvéole vers les capillaires et des capillaires vers les alvéoles. L'oxygène et l'azote passent ainsi d'un milieu gazeux à un milieu liquide. **Ce phénomène s'appelle la saturation**, mais nous verrons qu'il ne s'applique en réalité qu'à l'azote.

Une fois dans le sang des capillaires alvéolaires, les gaz sont transportés jusqu'au cœur via la veine pulmonaire, puis dans l'ensemble de l'organisme via l'artère aorte. Aux niveaux des organes, le système artériel se ramifie peu à peu en un réseau de capillaires semblables à celui des alvéoles. Les gaz dissous passent alors dans les cellules de ces organes selon le principe de l'osmose<sup>1</sup>. L'oxygène va être utilisé dans les cellules pour la production d'énergie et de dioxyde de carbone. Ce dernier est un déchet toxique. Il est transporté par le sang jusqu'au cœur via les veines, puis du cœur aux poumons via l'artère pulmonaire. Il est alors libéré dans les alvéoles et évacué lors de l'expiration.



<sup>1</sup> L'osmose désigne ici le passage de molécule d'oxygène et d'azote à travers les parois cellulaires, du milieu le plus concentré en ces gaz (le sang) vers le milieu le moins concentré, le liquide cellulaire.



Quelles lois physiques expliquent la saturation ?

## Loi de Dalton

John Dalton est un physicien anglais qui a découvert de manière empirique que **“la pression au sein d’un mélange de gaz parfait (dite pression absolue) est égale à la somme des pressions (dites alors partielles) de ses constituants”**. L’air est constitué principalement de deux gaz parfaits, l’azote à 79% et l’oxygène à 21%.

Pour une pression absolue d’air de 1 bar, nous pouvons donc calculer les pressions partielles :

- $P_{pO_2} = 0,21 \text{ bar} (1 \times 21\%)$
- $P_{pN_2} = 0,79 \text{ bar} (1 \times 79\%)$

Si la pression de l’air est de 3 bar :

- $P_{pO_2} = 0,63 \text{ bar} (3 \times 21\%)$
- $P_{pN_2} = 2,37 \text{ bar} (1 \times 79\%)$

Ex : La limite de profondeur de la plongée à l’air est fixée par le code du sport à 65 mètres. Calculer la pression partielle d’oxygène à cette profondeur.

$$\text{A } 65 \text{ m } P_{\text{abs}} = 7,5 \text{ bar}$$

$$P_{pO_2} = 1,575 \text{ bar} (7,5 \times 21\%)$$

L’oxygène est toxique à partir d’une pression partielle de 1.6 bar. C’est l’oxygène qui limite la profondeur de la plongée à l’air à 65 m.





*Quelles lois physiques expliquent la saturation ?*



## Loi de Henry-

William Henry, physicien et chimiste anglais, énonce en 1803 la loi qui porte son nom :

*"À température constante et à l'équilibre, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide."*



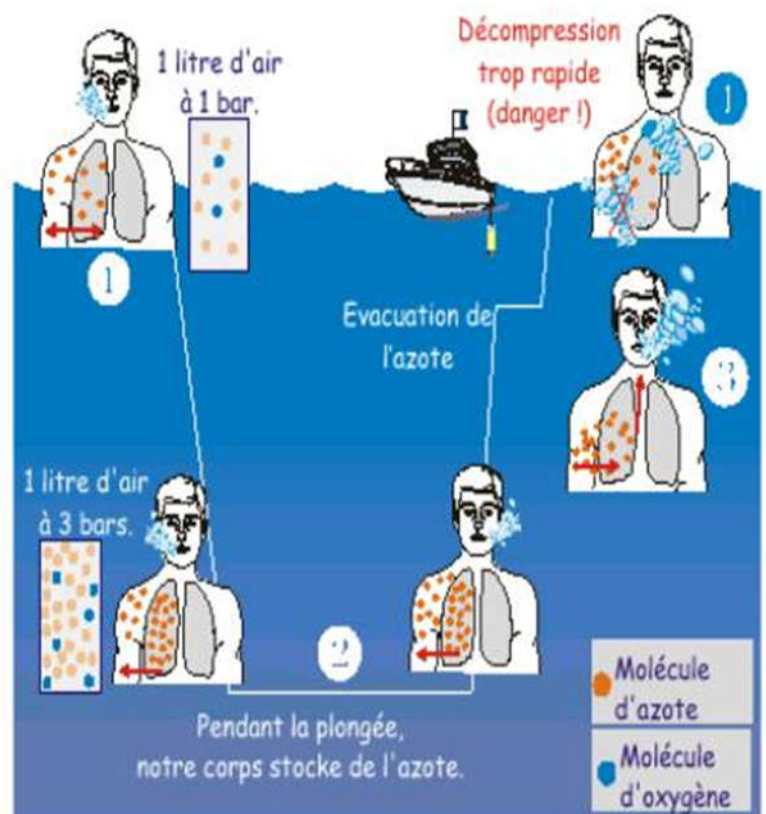
Plus la pression partielle d'un gaz à la surface d'un liquide est forte, plus ce gaz va se dissoudre dans le liquide jusqu'à atteindre un équilibre ou sa concentration dans le liquide ne changera plus. Cet équilibre est atteint plus ou moins rapidement selon la nature du gaz et du liquide, et selon la température.

Le passage des gaz de l'alvéole vers le sang suit cette règle.

A 20 m, le plongeur respire de l'air à la pression de 3 bar. Les pressions partielles d'oxygène et d'azote sont donc respectivement de 0,63 et 2,37 bar. La concentration de ces gaz dans les tissus est donc théoriquement plus forte à 3 bar.

L'oxygène ne reste pas à l'état dissout mais est fixé à l'hémoglobine dans les globules rouges et transporté jusque dans les cellules ou il est utilisé pour la production d'énergie. La loi de Henry ne s'applique donc pas à l'oxygène.

L'azote, quant à lui, est simplement dissous dans le sang, qui le transporte passivement dans tout l'organisme. On dit que l'azote est un **gaz neutre** pour la respiration. Suivant la loi de Henry, il passe dans le sang en plus grande quantité que lorsque le plongeur est en surface. Par osmose, il est ensuite dissous dans tous les tissus, dans des proportions plus ou moins grandes et à une vitesse variable selon les tissus.





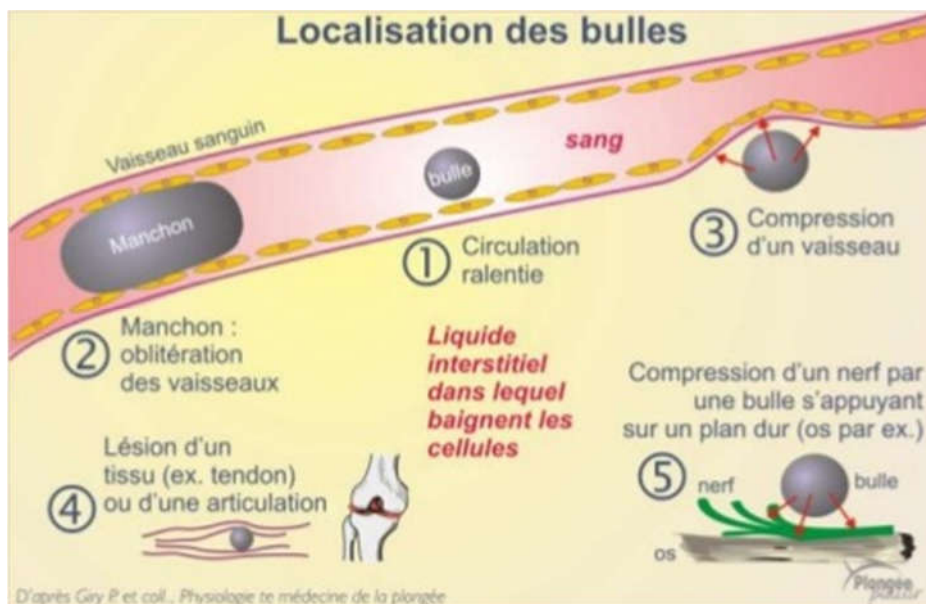
*Quels gaz sont impliqués dans le phénomène de saturation ?  
Quels problèmes cela pose-t-il ?*



## La désaturation

Les gaz de l'air deviennent toxique bien au-delà de la profondeur de 20 m. Ce cours n'aborde donc pas ce point. Jusqu'à 20 m, la saturation du sang par l'oxygène et l'azote n'a pas, en soit, d'incidence sur l'organisme.

Par contre, lors de la remontée, le phénomène inverse à la saturation, la désaturation, pose des contraintes sévères au plongeur. En effet, lorsque la pression ambiante diminue, l'azote dissous dans l'organisme a tendance à retrouver sa forme gazeuse. Des bulles minuscules se forment alors dans tous les tissus et en particulier dans le sang. Ces bulles sont transportées par le sang jusqu'aux alvéoles, puis sont expulsées dans les poumons et rejetées lors de l'expiration. Tant que les bulles restent de taille réduite, la désaturation ne pose pas de problème. Mais si les bulles s'assemblent entre elles et forment des bulles plus grosses, elles peuvent empêcher la circulation sanguine et endommager des tissus. C'est l'accident de désaturation.



Ce cas se présente si la pression ambiante diminue trop rapidement, c'est-à-dire si la remontée est trop rapide. **Paul Bert**, médecin français (1833 - 1886) est le premier à décrire ce phénomène de manière scientifique. Il préconise alors des remontées très lentes, à 0,5 m/min. Les tissus ne sont pas tous saturés en azote à la même vitesse. Plus la vitesse de saturation d'un tissu est élevée, plus rapide sera sa désaturation. Pour les tissus les plus longs à saturer en azote, cette saturation n'est pas forcément atteinte au cours d'une plongée. Ils contiennent cependant plus d'azote qu'en surface et ne sont donc pas à l'abri d'un accident de décompression.

Les militaires de plusieurs pays se sont intéressés de près à ces recherches. Ainsi, John Scott **Haldane**, physiologiste anglais (1860-1936), se voit confier par la Royal Navy la mise au point de procédure de remontée plus précises qui aboutira aux premières **tables de plongée**. En 1907, il s'appuie sur les travaux de Henry et sur l'expérimentation animale pour mettre au point la formule de décompression qui porte son nom. Pour simplifier le calcul des paliers, les militaires appliquent cette équation à des plongées type et rassemblent ses résultats sous forme de table. Beaucoup d'ordinateurs de plongée utilisent encore cette formule pour établir en temps réel les procédures de désaturation, même si des travaux récents ont abouti à des algorithmes plus performants.



Comment calculer les paliers (plongée unique) ?





## Les tables de plongée

Deux méthodes nous permettent de calculer les paliers d'une plongée, les tables et l'ordinateur.

Prof.	Durée	Palier	GPS	Prof.	Durée	Palier	GPS	Prof.	Durée	Palier	GPS
10 m	30		C	18 m	25		E	22 m	20		E
	45		D		30		F		30		G
	60		F		40		G		35		H
	75		G		50		H		40	2	I
	105		H		55	1	I		45	7	I
	120		I		60	5	J		50	12	J
	180		L		65	8	J		55	16	K
12 m	30		D		70	11	K	60	20	K	
	45		E		75	14	K	65	25	L	
	60		G		80	17	L	70	29	L	
	75		H		85	21	L	25 m	20		E
	105		J		90	23	M		25	1	F
	120		K		95	26	M		30	2	H
	135		L		100	28	M		35	5	I
140	2	L	105	31	N	40	10		J		
			110	34	N	45	16		J		
						50	21		K		
15 m	30		E	20 m	20		D	55	27	L	
	45		G		30		F	60	32	L	
	60		H		40		H	28 m	15		E
	75		J		45	1	I		20	1	F
	80	2	J		50	4	I		25	2	G
	85	4	K		55	9	J		30	6	H
	90	6	K		60	13	K		35	12	I
	95	8	L		65	16	K		40	19	J
	100	11	L		70	20	L		45	25	K
	105	13	L		75	24	L	50	32	L	
	110	15	M		80	27	M				
120	16	M									

Cette table est applicable à une plongée unitaire (séparée d'au moins 12 heures de la précédente). Elle a été établie initialement pour une vitesse de remontée de 15 m/min, mais le code du sport préconise désormais une vitesse de remontée de 10 m/min. Les paliers sont donnés sans tenir compte du palier de sécurité de 3 minutes à 3 mètres préconisé par le code du sport. Il faut donc ajouter 3 minutes à chaque palier. Pour connaître la durée du palier nécessaire à la fin d'une plongée de 50 minutes à 20 m, il suffit de chercher la colonne indiquant la profondeur de 20 mètres, puis le bloc trouvé, la colonne "durée" 50 minutes, et la colonne "palier" indique la durée du palier, ici 4 minutes. Nous aborderons la colonne GPS au prochain cours. Si la plongée est à une profondeur non indiquée, il faut prendre la profondeur immédiatement supérieure. De même, si la durée de la plongée n'est pas dans la table pour la profondeur recherchée, il faut prendre la durée immédiatement supérieure. En procédant ainsi, les paliers prévus vont être surestimés et placer le plongeur dans les conditions de désaturation les plus sûres.

Ex : Une palanquée s'apprête à effectuer une plongée à 19 mètres, pour une durée de 50 minutes. La table ne comporte pas de colonne pour cette profondeur. La première profondeur trouvée supérieure à 19 m et la colonne 20 M. Nous allons donc chercher le palier d'une plongée de 50 minutes à 20 mètres, soit 4 minutes. La profondeur maxi atteinte au cours de la plongée est finalement de 18 mètres, mais la durée



de la plongée a augmenté à 57 minutes. Cette durée n'est pas indiquée dans la table pour une plongée à 18 mètres. Il faut donc prendre une durée de 60 minutes, ce qui nous donne un palier de 5 minutes. En pratique, dans le cadre d'une plongée aux tables, il vaut mieux éviter de recalculer les paliers en cours de plongée, et donc d'augmenter sa durée de plongée. Si la profondeur maximum n'est pas atteinte, la palanquée peut garder les mêmes paliers si la durée de plongée n'a pas changé. Le palier sera alors surestimé.

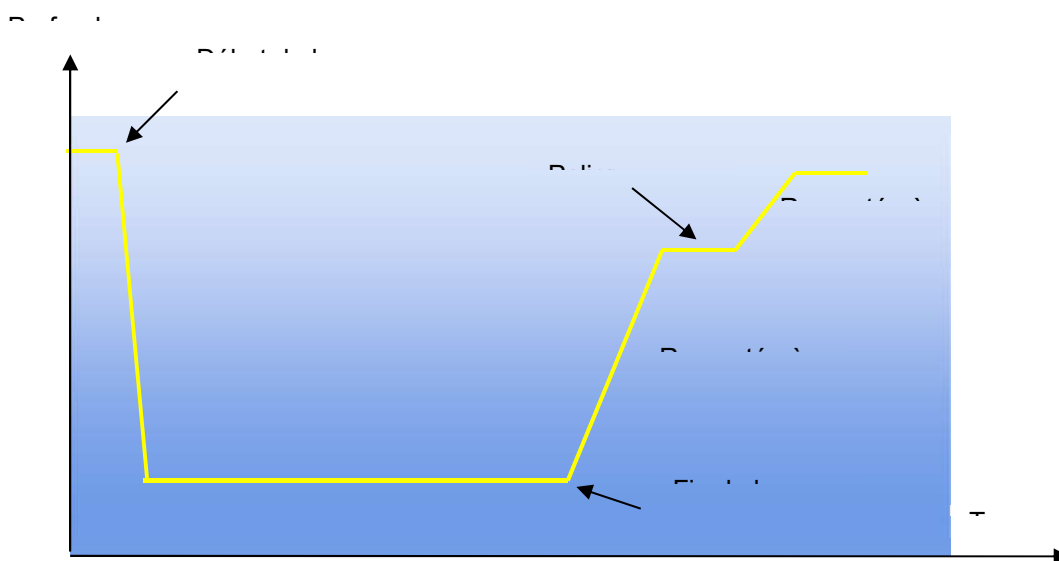


*Quand calculer les paliers ?*

## La planification de la plongée

Avant toute plongée, le directeur de plongée demande à chaque palanquée les paramètres prévus de sa plongée, c'est-à-dire la profondeur que la palanquée s'engage à ne pas dépasser, la durée maximale de la plongée et la durée des paliers. La notion de durée de plongée doit être ici précisée.

Les tables de plongée sont prévues pour des plongées dites "carrées" : la palanquée descend directement et rapidement à la profondeur maximum planifiée, reste à la même profondeur toute la durée prévue, et remonte à la vitesse de **10 m/min** jusqu'au premier palier. Entre chaque palier et du dernier palier jusqu'à la surface, la vitesse de remontée doit être réduite à 6 m/min.



**Le temps total de remontée est la somme des durées de remontée et de paliers.** Pour déterminer ces paramètres, le plongeur doit tenir compte de sa capacité d'air, c'est-à-dire de la quantité d'air dans la bouteille (et donc la taille de la bouteille) et de sa consommation. Par sécurité, tous les plongeurs de la palanquée doivent de plus revenir sur le bateau avec au moins 50 bars.

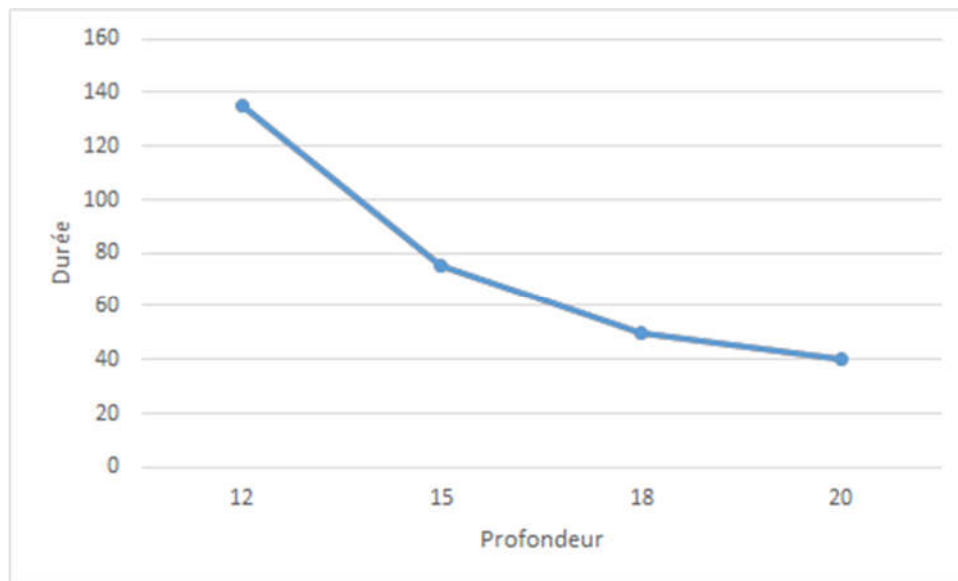




Les paliers sont-ils inévitables ?

## La courbe de sécurité

Les tables MN90 nous indiquent les durées maximums de plongée sans palier pour chaque profondeur. Ces durées ramenées sur un repère graphique forment ce qu'on appelle la courbe de sécurité.



Pour une profondeur et une durée qui place la plongée sous la courbe de sécurité, le plongeur n'aura aucun palier à faire, hormis le palier de sécurité. Au-dessus, il aura un ou plusieurs paliers obligatoires. **Les plongeurs autonomes à 20 mètres doivent plonger dans la courbe de sécurité.** Ils ne doivent pas planifier de plongées avec paliers. Ils doivent cependant être capables de prévoir les aléas qui pourraient retarder la remontée et les obliger à faire des paliers.

Jérémy : On aura juste un palier de sécurité de 3 minutes à 3 mètres à faire.

DP : Vous oubliez la plongée de ce matin.

... la suite au prochain cours

Deux liens vers des animations pour bien comprendre :

La respiration : <https://www.youtube.com/watch?v=GEBFsILSdkg>

La circulation sanguine [https://videos.reseau-canope.fr/corpus/coeur\\_vaisseaux-HD.mp4](https://videos.reseau-canope.fr/corpus/coeur_vaisseaux-HD.mp4)

