

Physiologie

LES COMPARTIMENTS DE L'ORGANISME

PLAN DU COURS

INTRODUCTION :

A- Volume de distribution d'un traceur

- 1/ Le traceur reste dans le volume où on l'injecte
- 2/ Le traceur est régulièrement éliminé du volume où on l'injecte
- 3/ Mesure des compartiments liquidiens

B- Clairance plasmatique

- 1/ Clairance plasmatique rénale et insuffisance rénale
- 2/ Clairance plasmatique et médicaments
- 3/ Clairance et distribution d'oxygène

C- Débit cardiaque

- 1/ Circulation sanguine et cycle cardiaque : définitions
- 2/ Mesure du débit cardiaque par dilution
- 3/ Insuffisance cardiaque et débit sanguin par organe

D- Volumes et débits aériens pulmonaires

- 1/ Relation pression – volume des alvéoles pulmonaires
- 2/ Mesure des paramètres ventilatoires
- 3/ Mesure des paramètres respiratoires

INTRODUCTION

Présentation générale de la physiologie

La **physiologie** est la science du fonctionnement de l'organisme normal et la **base de la médecine**. On ne considère pas l'être humain découpé en tranche sur une lame histologique mais **comme un tout**. On va voir cette année les **concepts principaux** de la physiologie à **plusieurs niveaux**.

→ **Mais comment va-t-on mettre le tout ensemble pour faire fonctionner l'organisme ?**

L'organisme à grande échelle	
<u>Compartmentation de l'organisme :</u> Les milieux liquides Le milieu aérien pulmonaire	<u>Mesures de grandeurs :</u> Force hydrostatique
→ On considère l'organisme comme un ensemble de fluides , liquidiens et aériens, mobilisés par la force hydrostatique .	
L'organisme à moyenne échelle	
<u>Composition des milieux :</u> Substances dissoutes Substances chargées	<u>Mesures de grandeurs :</u> Forces osmotiques et électriques
→ Les forces osmotiques et électriques permettent le déplacement de molécules dissoutes et chargées d'un côté à l'autre de la membrane cellulaire.	
L'organisme à petite échelle	
<u>Dynamique des milieux :</u> Oxydation des nutriments	<u>Mesures de grandeurs :</u> Energie libre
→ Ici se trouve la biochimie avec ses réactions de synthèse et de catabolisme. On parlera simplement d' oxydation .	

Dans ce cours, nous allons étudier **l'organisme à grande échelle** : on prend un individu dans son ensemble pour voir **les grands compartiments**, **les mouvements de fluides aériens et liquidiens** qui sont les manifestations de la vie. Ces mouvements vont faire appel à des **forces hydrostatiques, mécaniques** qui vont mobiliser l'air, le sang, l'urine. Ce sont des **forces de pressions** exercées par la gravité, par les muscles.



Valeurs numériques du cours :

→ Quand on donne des valeurs en physiologie on prend celles d'un **individu standard unisexe** (homme comme femme, jeune comme vieux, gros comme petit...) fictif :

- **Taille** : 1,60m
- **Surface corporelle** : 1,73 m²
- **Poids** : 70kg



👉 Les valeurs à apprendre seront signalées !

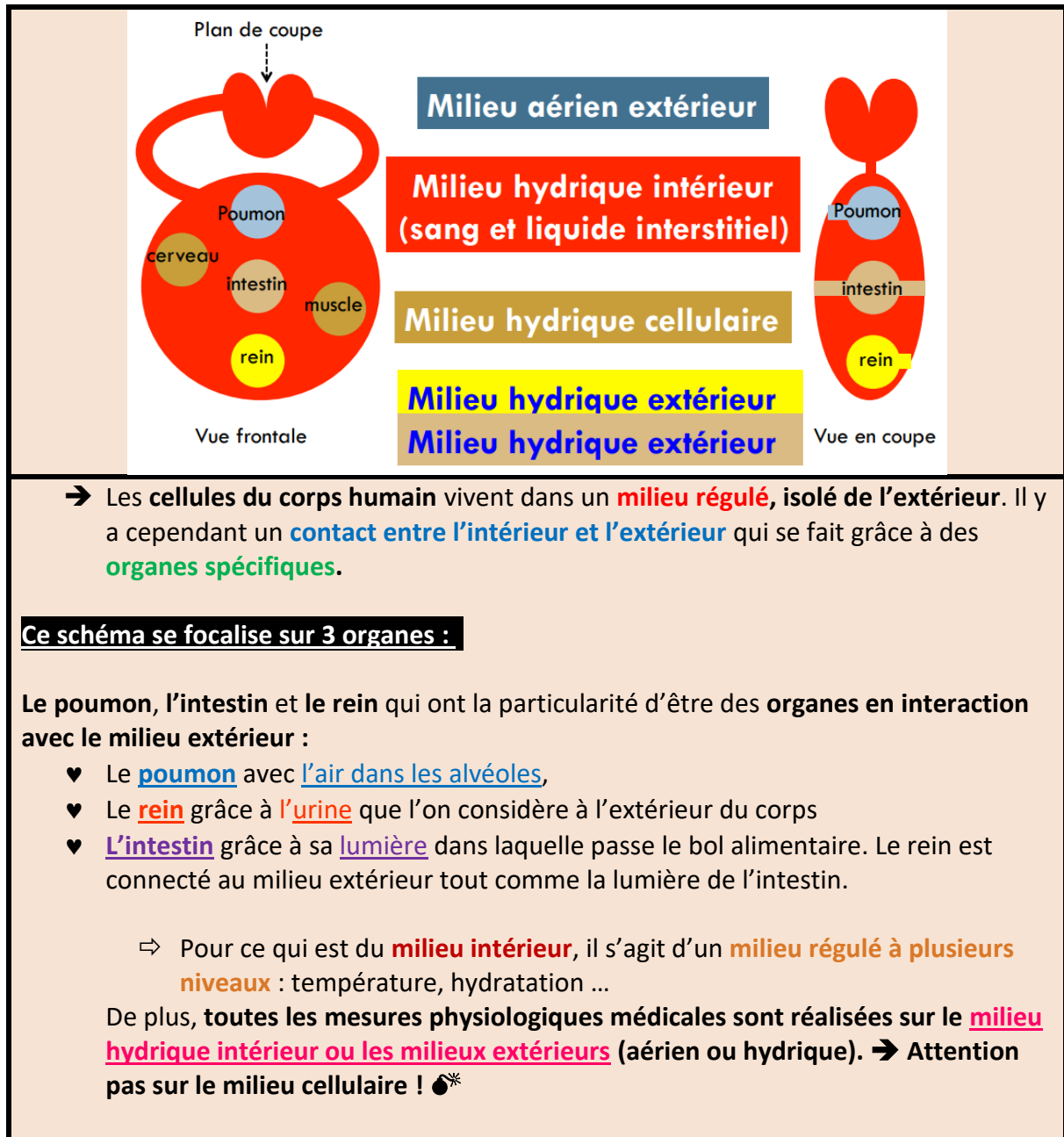
Les compartiments :

On y trouve différents milieux :

- ♥ **Le milieu aérien extérieur** : dans les poumons, ouvert sur l'extérieur.
- ♥ **Le milieu hydrique extérieur** : dans l'intestin et les reins, ouvert sur l'extérieur.
- ♥ **Le milieu hydrique intérieur** : ensemble du sang, du liquide interstitiel (= liquide extracellulaire) qui circule autour des différents organes et dans lequel les cellules baignent et peuvent vivre.
- ♥ **Le milieu hydrique cellulaire** : intérieur des cellules musculaires, cérébrales, hépatiques par exemple.

**ATTENTION PIEGE QCM :**

Le **milieu intérieur** (plasma et liquide interstitiel) est à bien distinguer du **milieu cellulaire** (liquide intracellulaire inaccessible aux mesures) !



L'organisme à grande échelle

- ⇒ L'air et le sang circulent sous l'effet de la **pression hydrostatique**.
- ⇒ **Pression hydrostatique** : pression exercée par la gravité, les muscles et les forces élastiques des tissus. Elle permet la circulation des fluides. ♥

Par exemple :

- **Une inspiration profonde** demande **une force musculaire** (pression hydrostatique liée à une pression musculaire) et une **expiration** nécessite **l'élasticité pulmonaire** pour évacuer l'air (pression hydrostatique liée à une force élastique)
- **Le cœur** qui se contracte en systole diminue son volume et éjecte par **la force de pression** le sang dans les artères.

A. VOLUME DE DISTRIBUTION D'UN TRACEUR



Dans l'organisme on mesure les espaces de distribution de l'eau, du sang, et de l'air grâce à **des traceurs** (*revu plus tard dans le cours*) qui sont **des molécules** qui vont aller remplir ces espaces : ce sont **les traceurs moléculaires dont on va mesurer le trajet, la concentration, la vitesse de disparition**. Les volumes aériens sont ouverts sur l'extérieur et sont mesurables par le déplacement de molécules d'air à l'extérieur de l'organisme.

- ♥ **Principe de la mesure** : On injecte un traceur puis **on mesure sa concentration par rapport à sa quantité injectée** ce qui va nous permettre de déduire le volume.

- ♥ **2 Situations** : le traceur peut être

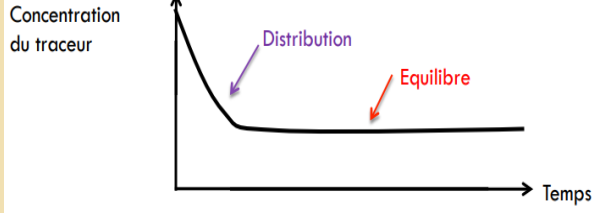
- ⇒ **Éliminé du volume de distribution (Vd)** (processus physiologique : clairance rénale, clairance hépatique, métabolisme, transformation...)
- ⇒ **Séquestré dans le Vd** (il est distribué puis reste dans le Vd)

- ❖ **Le volume de distribution d'un traceur permet de mesurer les volumes suivants :**

- **Volume extracellulaire (=Milieu intérieur+++)**
- **Volume d'eau total** (Quantité d'eau contenue à la fois dans le milieu intra et extra cellulaire)
- **Volume pulmonaire**
- **Volume plasmatique**

- ➔ **Le plasma et le sang font partie du milieu extracellulaire tout comme le liquide de soutien interstitiel.** ♥

1. LE TRACEUR RESTE DANS LE VOLUME OU ON L'INJECTE



Concentration du traceur

Temps

Distribution

Equilibre

Ici, **le traceur est séquestré dans le volume de distribution ♥** (il n'est pas éliminé). On a à **t0** la **concentration maximale** puis au fur et à mesure le traceur est dilué dans le volume en question.

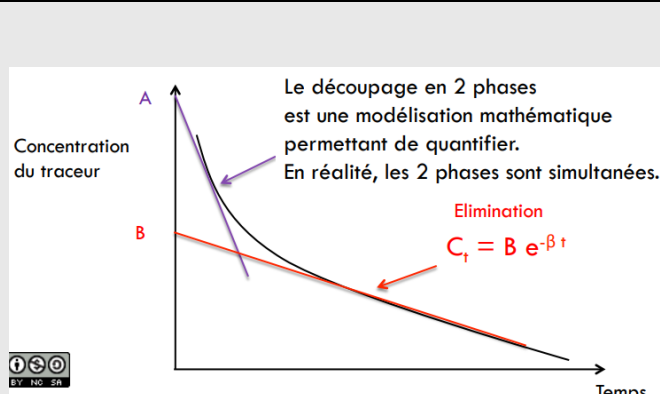
Le volume de distribution suit donc la formule suivante :

$$\text{Volume de distribution (Litre)} = \frac{\text{Quantité injectée (mole ou béquerel)}}{\text{Concentration mesurée à l'équilibre (mol/L ou Bq/L)}}$$

➔ On utilise cette formule pour **mesurer le volume d'eau totale** de l'organisme par exemple.

- *Petite précision pour la formule : on mesure en Becquerel pour les éléments radioactifs et en moles pour les éléments que l'on peut doser.*

2. LE TRACEUR EST REGULIEREMENT ELIMINE DU VOLUME OU ON L'INJECTE



Concentration du traceur

Temps

A

B

Le découpage en 2 phases est une modélisation mathématique permettant de quantifier. En réalité, les 2 phases sont simultanées.

Elimination

$C_t = B e^{-\beta t}$

BY NC SA

Ici, **le traceur est éliminé du volume de distribution à vitesse constante**, par fonctionnement normal de l'émonctoire. Comme on se base sur la **droite d'élimination** pour calculer le Vd on **le sous-estime toujours** un petit peu car on néglige l'élimination qui a eu lieu pendant la distribution.

$$\text{Volume de distribution (litres)} = \frac{\text{Quantité injectée (mol)}}{B \text{ (mol/L)}}$$

LES TRACEURS

Il faut considérer **2 phases de la vie de ce traceur** : (qui en réalité sont simultanées)

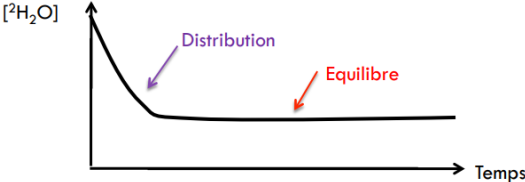
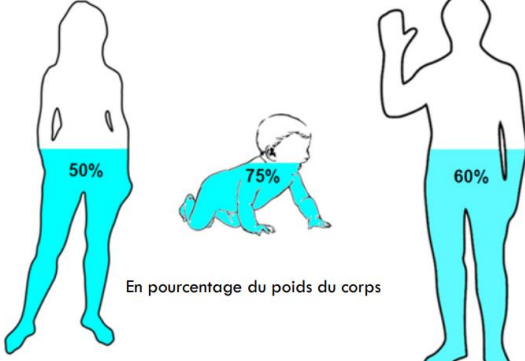
- ♥ **Phase de distribution** : démarre avec le pic de concentration (au moment de l'administration du traceur).
- ♥ **Phase d'élimination** : démarre immédiatement après l'administration +++ **(ET NON PAS APRES LA PHASE DE DISTRIBUTION ♥♥♥)**

On utilise différents traceurs selon le volume qu'on veut mesurer : ♥

Volumes mesurés	Volume d'eau totale	Volume plasmatique	Volume extracellulaire	Volume pulmonaire
Traceurs	$^2\text{H}_2\text{O}$ $^3\text{H}_2\text{O}$	^{125}I -albumine	^{51}Cr -EDTA Inuline	Hélium

3. MESURE DES COMPARTIMENTS LIQUIDIENS

a. Mesure du volume d'eau totale :

 <p>[$^2\text{H}_2\text{O}$] : Temps</p> <p>Distribution Equilibre</p>	<p>L'eau ne se renouvelle pas rapidement dans l'organisme donc sur le temps court de la mesure <u>on considère que l'eau n'est pas éliminée</u> : on atteint un équilibre de concentration rapidement.</p> $\text{Volume de distribution (litres)} = \frac{\text{Activité injectée (Bq)}}{[^2\text{H}_2\text{O}] \text{ à l'équilibre (Bq/L)}}$
 <p>En pourcentage du poids du corps</p>	<p>En faisant cette mesure, on s'aperçoit <u>que le volume d'eau totale n'est pas le même chez tout le monde</u> : il diffère en fonction de l'âge et du sexe.</p> <p>Rapporté au volume d'eau totale et au poids corporel, l'eau représente : 💧</p> <ul style="list-style-type: none"> ♥ 50% du poids d'une femme ♥ 75% du poids d'un nourrisson ♥ 60% du poids d'un homme

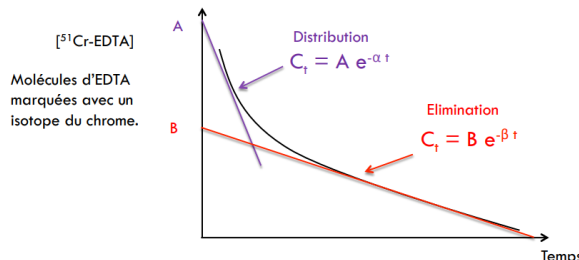


Précisions :

- C'est la composition corporelle qui explique cette différence entre les individus :
- La femme a **plus de tissu adipeux** que l'homme, à âge et poids égal, mais moins de tissu musculaire. Or le **tissu adipeux comporte moins d'eau** donc la femme aura moins d'eau dans son corps que l'homme.
 - Le **nourrisson contient une grande quantité d'eau**, cela permet de comprendre la **gravité des troubles digestifs chez ces nouveau-nés**. Ils vont par **la diarrhée et les vomissements perdre une quantité importante d'eau qui leur est vital**. En pratique, cela va permettre de déterminer la quantité de volume à administrer en cas de déshydratation.

b. Mesure du volume extracellulaire (=milieu intérieur) :

→ C'est différent de l'eau totale : **c'est l'eau qui est accessible à des mesures.**



Pour mesurer le volume extracellulaire on utilise **l'EDTA**. L'EDTA est **une molécule exogène qui est éliminée uniquement par les reins**. Elle est en permanence filtrée et donc éliminée. **Ainsi on tient compte de la droite d'élimination+++.**
On obtient :

$$\text{Volume de distribution (litres)} = \frac{\text{Activité injectée (Bq)}}{B \text{ (Bq/L)}}$$

Calcul du volume cellulaire et extracellulaire

Volume cellulaire	Volume extracellulaire
28 litres (2/3 du volume d'eau totale)	14 litres (1/3 du volume d'eau totale)

Le **volume extracellulaire** constitue seulement environ **1/3 du volume d'eau totale**. Les **2/3** restants constituent **le volume intracellulaire** qui n'est pas mesurable en temps réel : **on le calcule**.

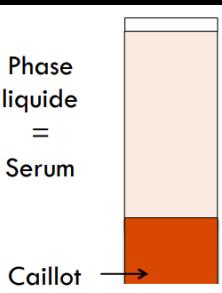
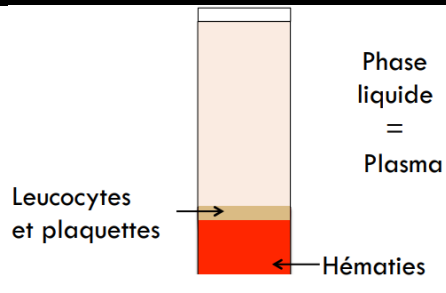
Ces ratios (2/3, 1/3) sont relativement fixes : **ils ne dépendent ni de l'âge ni du sexe**.

♥ **Volume cellulaire = volume d'eau totale – volume extracellulaire** ♥

Ainsi en prenant comme exemple un individu standard masculin de 70 kg on obtient :

- ♥ Un volume d'eau totale de 42L → 60% de son poids vu qu'il s'agit d'un homme
- ♥ Un volume cellulaire de 28 L → 2/3 du volume d'eau totale
- ♥ Un volume extracellulaire de 14 L → 1/3 du volume d'eau totale

Le sang et sa composition

Tube « sec » dans lequel le sang coagule.	Tube contenant un inhibiteur de la coagulation dans lequel les cellules sédimentent.
 <p>Le liquide qui surnage est le sérum.</p>	 <p>Le liquide qui surnage est le plasma</p>



Attention : Le plasma est à bien différencier du sérum. ⚡

Les protéines sont encore présentes à l'état soluble dans le plasma contrairement au sérum. ♥

L'hématocrite

L'hématocrite est un reflet de la quantité de cellules présentes dans le sang.

$$\text{Hématocrite} = \frac{\text{Vol globulaire}}{\text{Vol sanguin}} = 0,45$$

L'hématocrite se mesure sur le tube contenant un anticoagulant.



Le calcul d'hématocrite permet de déterminer **le degré d'anémie**. L'anémie est une pathologie causée par un nombre trop faible de globules rouges. Les globules rouges constituant la majorité des cellules sanguines, **l'hématocrite permet de faire une bonne estimation de l'anémie**.

c. Mesure du volume plasmatique

$$\text{Volume plasmatique (L)} = \frac{{}^{125}\text{Ialbumine (Bq)}}{[{}^{125}\text{Ialbumine}] \text{ (Bq/L)}}$$

Le traceur utilisé pour mesurer le volume plasmatique est la **125 I-albumine**. ♥

L'albumine est une protéine plasmatique synthétisée par le foie. Elle est rendue détectable par **couplage avec un isotope de l'iode**.

L'albumine est une protéine qui n'est pas renouvelée très rapidement. Elle est dégradée mais, sur un temps de mesure court on peut négliger le temps d'élimination.

Rappel : le volume plasmatique se trouve dans le secteur extracellulaire ! 💧*

♥ Volume plasmatique = 50 ml/kg de poids corporel ♥

Exemple :

Pour un individu (peu importe le sexe) de 60 kg le volume plasmatique est de :

50 ml x 60 kg = 3000 ml = 3 L de plasma.



Calcul du volume sanguin

$$\frac{\text{Vol globulaire}}{\text{Vol sanguin}} + \frac{\text{Vol plasmatique}}{\text{Vol sanguin}} = 1$$

$$\text{Hématocrite} + \frac{\text{Vol plasmatique}}{\text{Vol sanguin}} = 1$$

$$\text{Vol sanguin} = \frac{\text{Vol plasmatique}}{[1 - \text{Hématocrite}]}$$

Dans la mesure où on peut mesurer le volume plasmatique avec de l'albumine on va pouvoir mesurer le volume sanguin avec des calculs très simples.

→ On peut **calculer le volume sanguin à partir de l'hématocrite et du volume plasmatique.**

♥ Vol sanguin total = Vol globulaire + Vol plasmatique = vol plasmatique / (1- hématocrite) ♥

→ Ces calculs de volume extracellulaire et de volume sanguin sont utiles pour savoir combien injecter de liquide lors d'hémorragies.

B. CLAIRANCE PLASMATIQUE



⇒ La clairance découle de la mesure des volumes.

🔴***Définition :** La **clairance plasmatique** est le volume de plasma totalement épuré d'une substance par unité de temps. ♥ Il s'agit d'un **débit (ml/min)** +++🔴*

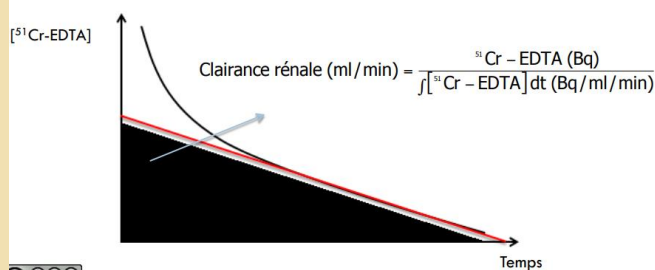
1. CLAIRANCE PLASMATIQUE RENALE ET INSUFFISANCE RENALE



Précision :

La **diurèse** représente la **quantité d'urine par 24h**. C'est aussi un **débit**. C'est un paramètre qui permet **d'apprécier la fonction des reins, de calculer la posologie des médicaments à administrer** (dépend de sa vitesse d'élimination) et **d'apprécier la consommation d'oxygène des différents organes**.

Mesure de la clairance plasmatique rénale :



L'EDTA est une molécule éliminée exclusivement par filtration rénale. Le volume de plasma épuré d'EDTA par minute est une mesure de la clairance plasmatique rénale qui permet de donner une idée de la fonction rénale.

Les reins comportent chacun 1 million de petites unités fonctionnelles : **les néphrons**. Ceux-ci rentrent en contact avec les artères par l'intermédiaire des **glomérules**.

♥ On définit la clairance rénale comme la quantité de traceur (EDTA) injecté divisée par l'aire sous la courbe d'élimination (et non l'aire sous la courbe globale !). ♥

Intérêt de la mesure de la clairance plasmatique rénale

➔ Pour l'individu standard, la clairance plasmatique rénale est de : 120 ml/min = 172,8 litres/jour

➔ C'est le débit de filtration glomérulaire (DFG).

➔ Or le **volume plasmatique est de 3,5 L**. On peut alors calculer l'intensité du travail des reins : $172,8/3,5 = 49,4 \Rightarrow$ DONC les reins filtrent le plasma environ 50 fois par jour. → les reins sont des organes très actifs.

Cela donne une idée du fonctionnement intense de l'organe qui est là pour épurer le sang et assurer l'homéostasie.

➤ Pourtant, le volume urinaire par jour est de 2 litres en moyenne. ♥ **Les reins filtrent le plasma MAIS en réabsorbent la majeure partie**. ♥ Cela permet d'équilibrer la composition du plasma et donc de tout le milieu intérieur...

RECAP :

- ♥ Clairance rénale = quantité de traceur injectée / aire sous la courbe = **120mL/min = 172.8L/j**
- ♥ Le plasma est filtré **50 fois par jour**.
- ♥ **2L de diurèse** seulement car les reins réabsorbent la majeure partie.



- ✍ Mesurer la fonction rénale est essentiel pour soigner les gens. Cependant cette injection de produit n'est pas idéale ! Il est plus simple d'utiliser un produit endogène → la créatine. ♥

Clairance de la créatinine et débit de filtration glomérulaire (DFG)

La créatinine est endogène (pas besoin d'injection) et éliminée seulement par filtration rénale. ♥

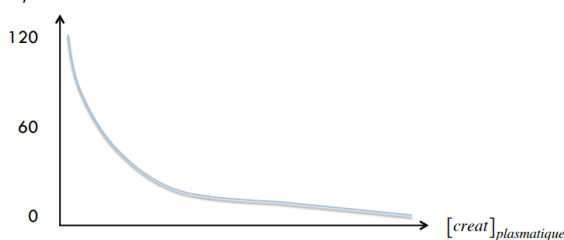
La créatinine est une molécule venant du métabolisme musculaire. Chez un individu avec une masse musculaire constante (individu sain), le débit de créatinine est le reflet de sa masse musculaire → sa production est proportionnelle à la masse musculaire. Le débit de créatinine urinaire est constant chez un individu en bonne santé. La clairance de la créatine est donc proportionnelle à la diurèse et à la masse musculaire. On aboutit à cette équation :

$$[creat]_{urinaire} \times \text{débit urinaire} = [creat]_{plasmatique} \times \text{Clairance plasmatique}_{creat}$$

Cela permet de déduire la clairance plasmatique de la créatinine. On doit faire ce dosage chez un individu sain puisqu'il faut que **la masse musculaire soit constante** (alors qu'en situation pathologique, le métabolisme va utiliser les cellules musculaires). Chez un adulte en bonne santé le débit de créatinine urinaire et la masse musculaire sont constants (car reflet de la masse musculaire). La clairance plasmatique peut donc s'écrire : +++

$$\text{Clairance plasmatique}_{creat} = \frac{[creat]_{urinaire} \times \text{débit urinaire}}{[creat]_{plasmatique}}$$

Débit de filtration glomérulaire (ml/min)



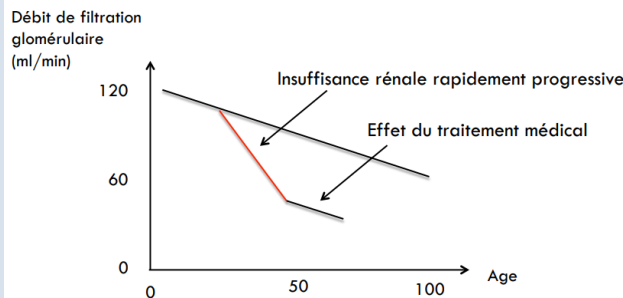
Les variations de concentration plasmatique de créatinine indiquent des variations inverses de clairance plasmatique de la créatinine et donnent une idée du débit de filtration glomérulaire.

Les variations de concentration plasmatique de créatinine dépendent du débit de filtration glomérulaire. Ainsi, la clairance plasmatique de la créatinine est inversement proportionnelle à la créatinine plasmatique ♥. Cela permet d'appréhender la fonction rénale par simple prise de sang. Ce n'est pas une relation linéaire : il s'agit d'une exponentielle. Ainsi, à gauche : Une toute petite variation de créatinine aboutit à des grandes variations de débit de filtration. Alors qu'à droite : des grandes variations de créatinine donne des petites variations de DFG. Lorsque vous avez **un DFG de 120 ml/min**, vous avez une concentration de créatinine plasmatique très basse.

☹♥ La créatinine est inversement proportionnelle au DFG : **plus le rein filtre correctement, moins il y a de créatinine dans le sang puisque celle-ci est éliminée**

! +++ ♥☹

L'insuffisance rénale → diminution du débit de filtration glomérulaire



Avec l'âge on voit une baisse progressive du DFG. Les reins perdent de leur capacité fonctionnelle selon un processus linéaire. Si on part d'une fonction rénale normale, lorsque vous serez centenaire, vous aurez perdu la moitié de votre fonction rénale d'adulte jeune mais cela suffit largement pour vivre.



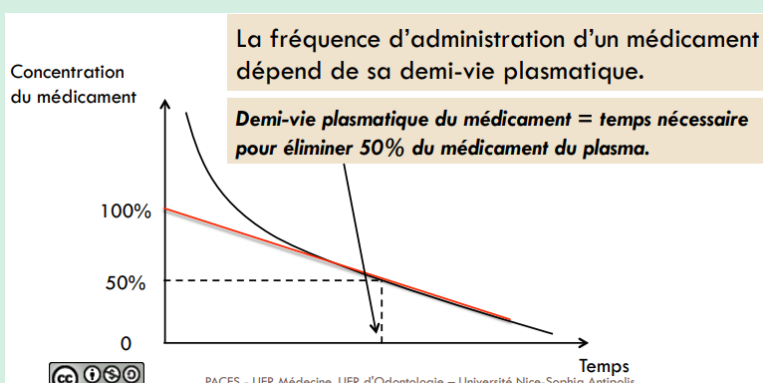
⇒ Une maladie rénale est une perte rapide de DFG, devant une situation pathologique : on parle d'insuffisance rénale. Toute perte de fonction rénale est irréversible : même après traitement, un patient ne retrouvera jamais son débit de filtration initial !

↳ Les soins de cette insuffisance rénale consistent à arriver à arrêter cette perte de fonction pour restaurer une perte physiologique (le traitement permet de rétablir la pente comme à l'état physiologique → attention il y a quand même perte de fonction). Heureusement tous les organes vitaux ont une réserve fonctionnelle qui permet à l'individu de vivre quasi normalement même s'il a perdu une partie importante de sa fonction organique.

2. CLAIRANCE PLASMATIQUE ET MEDICAMENTS

Lorsque le médicament se distribue dans le secteur extra cellulaire, puis est éliminé par les reins, on arrive à connaître la clairance de ce médicament de la même manière qu'on a pu mesurer la clairance rénale. Sur le graphique concentration du médicament en fonction du temps (voir ci-dessous) on peut connaître le temps nécessaire pour que l'organisme élimine la moitié du médicament.

→ C'est la demi-vie du médicament qui est utile pour connaître sa posologie (fréquence et dose) +++ ♥



En réalité, les droites sont beaucoup plus compliquées car le médicament va être capté par les cellules, disparaître du plasma et on aura l'impression que le volume de distribution est très important alors que c'est celui d'un individu normal. Le médicament se fixe et va être absorbé par les tissus.

IMPORTANT

- ♥ **La clairance plasmatique d'un médicament est le volume de plasma épuré du médicament par unité de temps.** ♥♥♥
- ♥ **Demi-vie d'un médicament → temps nécessaire pour éliminer 50% du médicament du plasma.** ♥

3. CLAIRANCE ET DISTRIBUTION D'OXYGENE

Le **concept de clairance** nous permet aussi de **connaître l'activité des tissus** puisqu'on peut mesurer la clairance de l'oxygène dans le cœur, les reins etc ... **Pour cela on mesure la quantité d'O₂ qui arrive dans l'artère, puis celle qui sort au niveau de la veine.**

💣♥ **Clairance sanguine de l'oxygène = volume de SANG totalement épuré d'O₂ par un organe et par unité de temps** +++♥💣

En conditions basales	Clairance de l'oxygène (cm ³ /min/100 g de tissu)
Cœur	7
Cerveau	3,2
Reins	5,5
Intestin et appareil digestif	3
Muscle et peau	0,15
Poumons	- 39

On considère le sang plutôt que le plasma car l'O₂ est dans les globules rouges en majeure partie. C'est une mesure de la consommation d'O₂ par les tissus (pour produire de l'ATP).

Ce sont les **organes de petite taille** (comme le cœur et les reins) **qui consomment beaucoup d'oxygène par rapport à d'autres organes massifs** (muscles). Au repos, les muscles et la peau ont une clairance très faible. **En cas d'exercice musculaire, la clairance musculaire augmente beaucoup pour le métabolisme énergétique.** La clairance de la peau augmente aussi beaucoup pour la thermorégulation.

♥💣 **Les poumons sont les organes qui apportent l'oxygène et dont la clairance est exprimée négativement : apport des poumons vers le sang et non du sang à l'organe.**

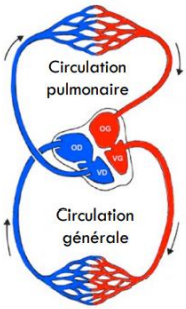


C. DEBIT CARDIAQUE

1. CIRCULATION SANGUINE ET CYCLE CARDIAQUE : DEFINITIONS

➔ Le cœur est une pompe qui propulse le sang dans l'organisme.

- ♥ La systole désigne la contraction des fibres musculaires cardiaques.
- ♥ La diastole désigne le relâchement des fibres musculaires cardiaques.



$$\text{Débit cardiaque} = \frac{\text{pression VD} - \text{pression OG}}{\text{Résistance}_{\text{circ pulmonaire}}}$$

↕

$$\text{Débit cardiaque} = \frac{\text{pression VG} - \text{pression OD}}{\text{Résistance}_{\text{circ générale}}}$$

Ecoulement laminaire prédominant

Dans la circulation sanguine, les pressions et les résistances ne sont pas les mêmes : Dans la circulation générale la pression vaut 110 mmHg alors qu'elle est 10 fois plus faible dans la circulation pulmonaire. On a donc des conditions rhéologiques très différentes.

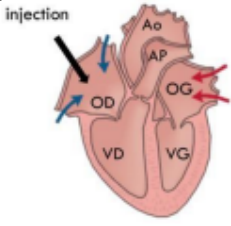
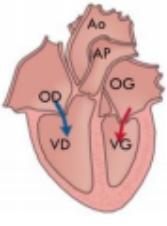
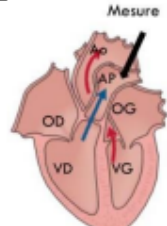
Débit= Pression / Résistance

➔ Le débit est donc le même entre les deux circulations, malgré des résistances et des pressions différentes.

Récap :

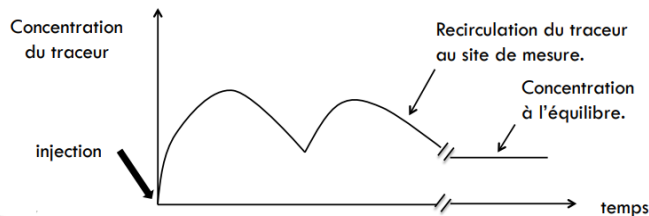
- ♥ Circulation générale : à haute pression
- ♥ Circulation pulmonaire : à basse pression

2. MESURE DU DEBIT CARDIAQUE PAR DILUTION

Débit cardiaque dans la circulation pulmonaire		
Diastole	Systole auriculaire	Systole ventriculaire
 <p>Pas de contraction. Le sang de l'organisme rentre dans les oreillettes.</p> <p>Le sang est riche en O2 dans l'OG et pauvre en O2 dans l'OD.</p> <p>➔ Injection de traceur.</p>	 <p>Contraction des oreillettes qui éjectent leur contenu dans les ventricules.</p> <p>➔ Dilution du traceur dans le sang de l'OD et du VD.</p>	 <p>Suit immédiatement la systole auriculaire.</p> <p>Ejection du sang par contraction des ventricules dans les artères.</p> <p>➔ Mesure de la concentration du traceur dans le sang de l'artère pulmonaire.</p>

- ⇒ On utilise les cavités droites pour mesurer le débit cardiaque : très accessible à l'aide d'une ponction de la veine jugulaire droite dans le cou qui emmène directement dans l'oreillette droite (OD). On injecte le produit à l'aide de petits cathéters très souples qui prennent des chemins sinueux jusqu'à arriver dans l'artère pulmonaire (AP) ⇒ pour plus de précision par rapport à l'OD.

Distribution du traceur

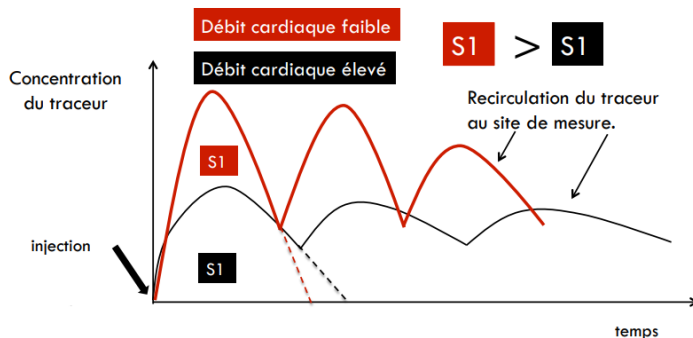


Lorsqu'on injecte le produit, celui-ci se dilue et on peut mesurer sa concentration.

→ Le traceur n'est pas éliminé de la circulation : Il se dilue progressivement dans le sang et la mesure se fait en temps réel. On a donc un maximum juste après l'injection puis la concentration redescend car le contenu du ventricule droit n'est pas le contenu global de sang, donc il faut plusieurs cycles cardiaques pour diluer complètement et obtenir la concentration à l'équilibre. Elle s'obtient longtemps après avoir injecté. On voit des rebonds sur le graphique car le traceur circule dans tout le réseau sanguin en se diluant au fur et à mesure : au début le rebond sera élevé mais il recircule au site de mesure tout en étant dilué jusqu'à notre équilibre.

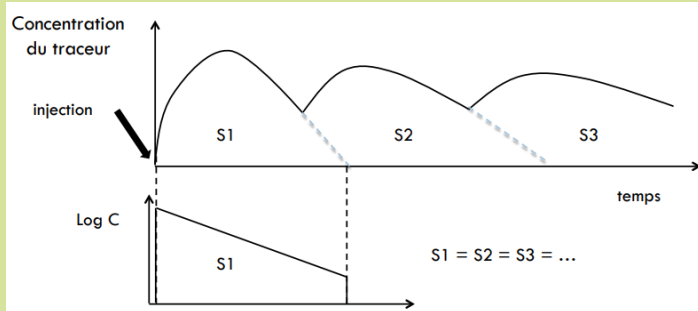
💧♥ La concentration du traceur au site de mesure est inversement proportionnelle au débit cardiaque ! +++ 💧♥

Débit cardiaque élevé et débit cardiaque faible



Un débit cardiaque faible entraîne une forte concentration du traceur puisque le sang circule lentement et le traceur reste très important en quantité : il est peu dilué ! **Un débit cardiaque fort entraîne une faible concentration** (car le sang est beaucoup dilué). Pour un même sujet, la concentration du traceur est d'autant plus élevée que le volume de sang éjecté par le cœur par unité de temps est faible.

Mesure du débit cardiaque



On peut mesurer les aires sous la courbe des différents temps : temps 1, temps 2 etc... Et c'est comme ça qu'on procède pour connaître le débit cardiaque. Il y a une équivalence entre les aires sous la courbe des temps successifs. On utilise la formule :

$$\text{Débit} = \frac{\text{Quantité de traceur injectée}}{\int C \, dt}$$

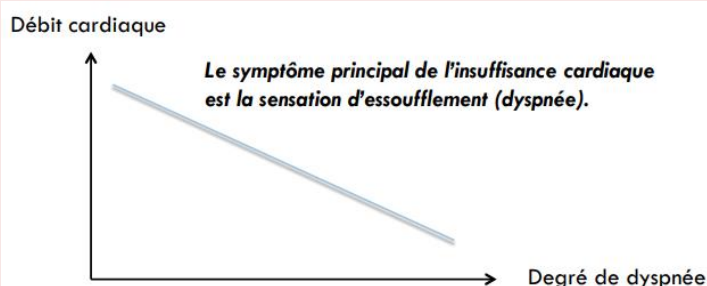
On obtient donc le **débit cardiaque**. Ce calcul peut être obtenu en injectant des substances qu'on peut doser mais on peut aussi le faire en injectant des substances de températures différentes par rapport au sang. Grâce à un capteur thermique dans l'artère pulmonaire, on injecte du froid dans l'oreillette droite et on détecte les variations de température. **On peut le faire en temps réel**. C'est ce qu'on utilise en pratique en réanimation.

3. INSUFFISANCE CARDIAQUE ET DEBIT SANGUIN PAR ORGANE

♥♣* La circulation pulmonaire et la circulation générale reçoivent le **même débit sanguin (5 L/min)**. ♥♣*

Insuffisance cardiaque

L'insuffisance cardiaque est définie par la baisse du débit cardiaque (l'insuffisance cardiaque est inversement proportionnelle au débit cardiaque). C'est l'**incapacité du cœur** à **apporter suffisamment de sang aux tissus pour les oxygéner** et permettre leur fonctionnement normal.



Le symptôme principal de l'insuffisance cardiaque est l'essoufflement. Si vous n'arrivez pas à faire circuler l'oxygène vous aurez **une sensation de manque d'air** : c'est ce qu'on **appelle la dyspnée +++**. Elle est **strictement proportionnelle au degré d'insuffisance cardiaque** : plus vous êtes essoufflé, plus vous êtes insuffisant cardiaque.

Le symptôme principal de l'insuffisance cardiaque est la dyspnée. Les deux sont proportionnelles ! ♥

⇒ Les médecins gradent la dyspnée pour connaître l'état cardiaque des personnes qu'ils soignent.

- Certains organes ont un débit constant : ce sont les organes vitaux (poumons, reins, cerveau). Ils ont une capacité d'autorégulation (surtout cerveau et rein).
- En revanche, d'autres organes ont un débit variable selon l'activité : la digestion (post-prandiale) pour l'appareil digestif, l'exercice pour les muscles... (C'est pour cela qu'il ne faut pas faire d'exercice juste après le repas). Cela se fait à l'aide d'une régulation de débit grâce à : vasoconstriction, vasodilatation, capteurs de gaz carbonique...

Mesure du débit sanguin de chaque organe :

Le débit sanguin est mesurable organe par organe en recueillant du sang en amont et en aval de chaque organe.

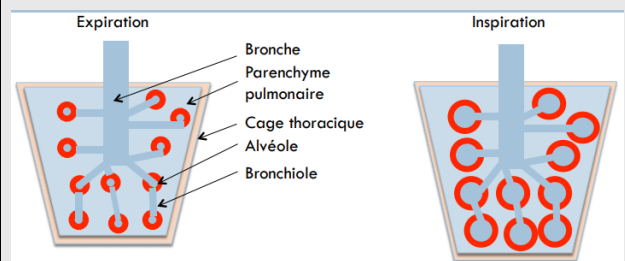
En conditions basales	% débit cardiaque	
Poumons	100%	<u>Débit constant</u>
Cerveau	15 %	
Reins	20 %	
Intestin et appareil digestif	36 %	<u>Débit variable selon l'activité</u>
Muscle et peau	24 %	
Autres	5%	

➔ Tout cela est dirigé par la pression hydrostatique et essentiellement la pompe cardiaque.

D. VOLUME ET DEBIT AERIENS PULMONAIRES

Le milieu aérien pulmonaire :

On peut représenter le poumon de manière schématique comme un pot de fleur, avec un tronc et au bout des racines des sortes de petites boules. On a donc les bronches, la cage thoracique, les alvéoles, les bronchioles et le parenchyme pulmonaire. Quand vous respirez il y a une **traction des muscles de la cage thoracique**. Ce qui va varier c'est un peu le volume de la cage thoracique mais surtout le volume des alvéoles à l'intérieur. En effet quand vous ventilez tranquillement, votre cage thoracique ne double pas de volume : c'est surtout dans les poumons que ça se joue ! On a donc une **traction sur la cage thoracique qui permet l'expansion des alvéoles à l'intérieur**.

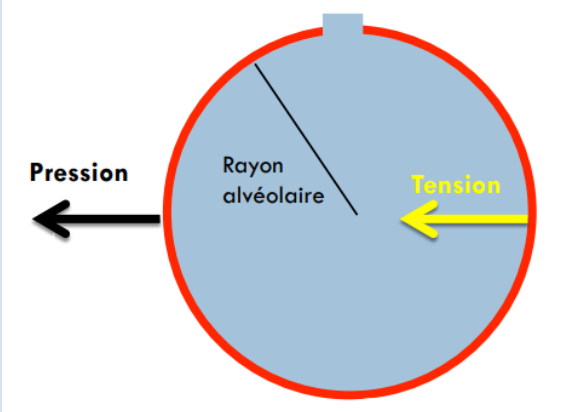
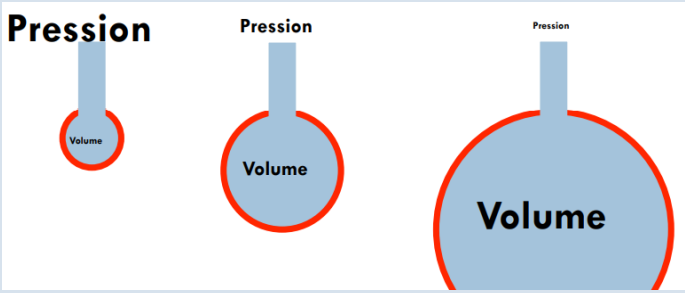


♥🧠* **Les variations du volume de la cage thoracique sont strictement proportionnelles aux variations du volume d'air dans les alvéoles à l'intérieur.** ♥🧠*

→ A pression constante, les volumes de gaz ne bougent pas.

1. RELATION PRESSION - VOLUME DES ALVEOLES PULMONAIRES

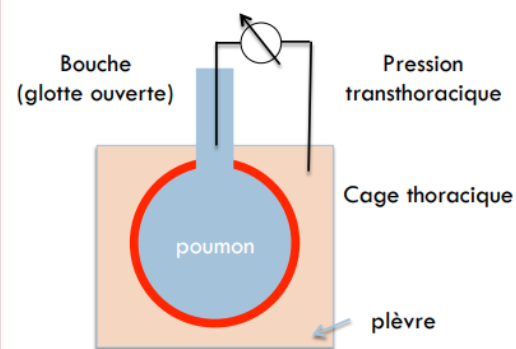
L'air pulmonaire est dans des alvéoles. Ce sont des cavités tissulaires arrondies entourées par le sang.

Loi de Laplace	
<p>La loi de Laplace est une <u>relation tension-volume</u>, qui s'applique par exemple à un ballon. Les alvéoles fonctionnent comme un ballon : on souffle dedans, elles se gonflent, on arrête elles se dégonflent. Il y a une surface de contact entre l'air et le sang qui va augmenter à l'inspiration et diminuer à l'expiration. C'est à cette interface que vont se faire les échanges gazeux correspondant à l'entrée d'oxygène et sortie du gaz carbonique.</p>	
<p>La pression intra-alvéolaire est <u>proportionnelle</u> au rapport de la tension de surface et du rayon : c'est la loi de Laplace.</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p>Loi de Laplace : $P = \frac{2 \times T}{R}$ avec P : pression intra-alvéolaire, T : tension de surface, R : le rayon</p> </div> <p>L'alvéole est représentée avec l'air et le sang. Entre les deux se trouve une fine couche de pneumocytes avec une surface liquidienne. <u>La pression nécessaire pour ouvrir les alvéoles est inversement proportionnelle au rayon alvéolaire.</u></p>	
<p>Quand on modélise : Un petit rayon va demander une très forte pression pour pouvoir grossir et donc on aboutit à la situation suivante : pour passer des petites à des grosses alvéoles il faudrait inspirer « comme des sauvages ». Il faudrait une pression considérable et donc un effort considérable pour arriver à gonfler nos alvéoles. Or ce n'est pas le cas : l'air rentre sans effort</p>	
<p>→ <u>Donc la loi de Laplace ne fonctionne pas dans cette situation..</u> ♥💣*</p>	

↪ La plèvre est un feuillet qui entoure le poumon et permet de glisser sur la surface interne de la cage thoracique.

Mesure expérimentale de la relation pression-volume pulmonaire

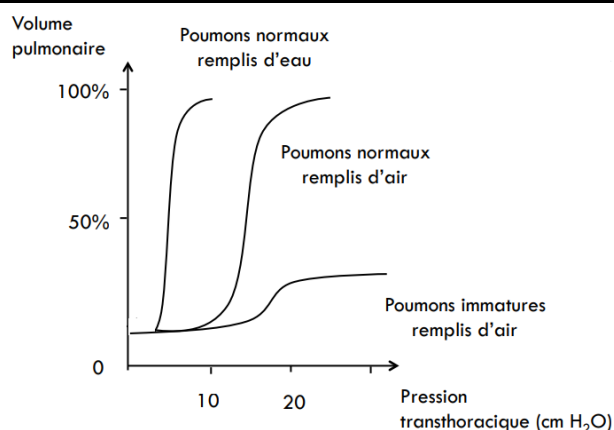
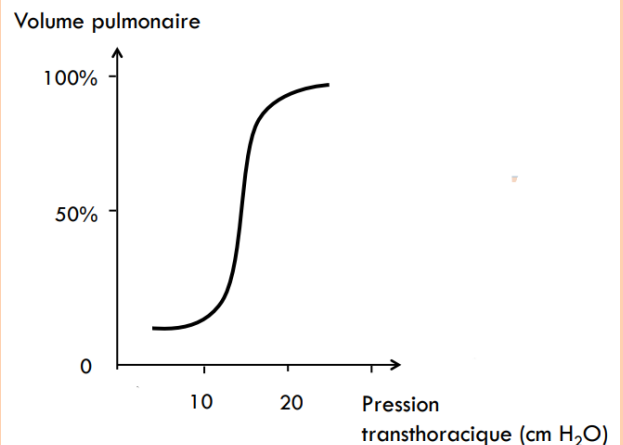
On mesure la **pression dans la cage thoracique** à l'aide d'un **capteur de pression** et la pression dans les bronches. C'est une méthode qui n'est pas trop invasive : on mesure la **pression transthoracique avec un ballonnet** dans l'œsophage et la **pression dans la glotte avec un embout buccal**.



💧♥ La loi de Laplace ne prédit pas la relation pression-volume pulmonaire. 💧♥

Pourquoi la loi de Laplace ne prédit-elle pas cette relation ?

Si on applique la loi de Laplace, cela ne fonctionne pas. Cela a permis de comprendre **comment les alvéoles étaient équipées**. On a eu recours à une démarche expérimentale en **changeant l'interface**. Chez un individu sain, la pression et le volume ont **une relation sigmoïde**. **Pour obtenir un grand volume il faut très peu de variation de pression**. On a même dans une très faible fourchette (entre 10 et 20 cmH₂O) la capacité de passer de 0 à 100% de volume pulmonaire



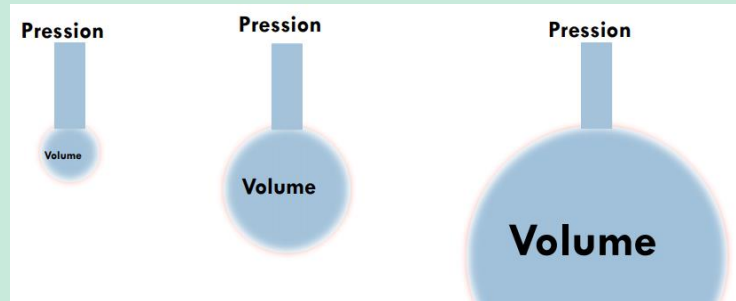
On émet l'hypothèse que cette situation est liée à l'interface air-sang, **on remplace l'interface par de l'eau** pour voir ce que ça donne : on améliore encore plus le système de relation pression-volume. La suppression expérimentale de l'interface air-sang décale la relation pression-volume vers les basses pressions. **La prématurité est caractérisée par une relation pression-volume à fortes pressions (mauvaise)**. Le prématuré **n'a pas encore produit toutes les substances dont il a besoin**, il a **du mal à ouvrir ses alvéoles**. Leur relation pression-volume est complètement décalée vers la droite et effondrée.



Tout cela indique que **l'interface air-sang joue un rôle dans l'incapacité des poumons à appliquer la loi de Laplace**. En revanche, quand le poumon n'est pas équipé normalement on voit que la courbe respecte la loi de Laplace. 💧♥

Interprétation : surfactant

Il y a une **substance tensio-active** à l'intérieur du poumon qui va venir **contrarier cette relation tension-volume** et fait que **la même pression est exercée sur les alvéoles de petit et grand volume**. Cette substance s'appelle **le surfactant**. Ce sont des **petites lipoprotéines** qui à la manière des bulles de savon vont se distribuer à la surface aérienne au contact du sang. Plus l'alvéole grandit, plus la couche de surfactant s'affine et inversement. **Cela va permettre de contrôler la tension superficielle** lorsque le volume alvéolaire augmente.



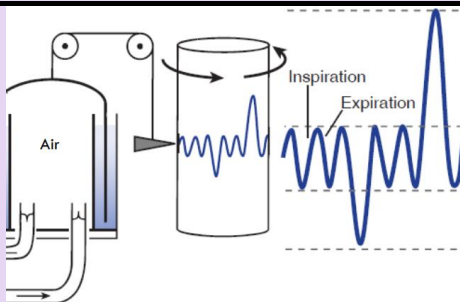
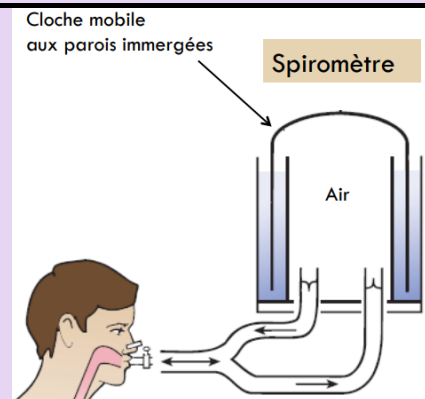
Il y a un **film liquidien important** à l'intérieur de l'alvéole qui va permettre de **modifier cette relation pression-volume** : on a une **grande modification du volume sans modification de pression**. C'est donc **une interface qui contrarie la loi de Laplace**. ♥💥♥

2. MESURE DES PARAMETRES VENTILATOIRES

Ventilation et respiration

Il y a une différence entre **ventilation** (variation de volume = mécanique) et **respiration** (variation de quantité de gaz que vous consommez (oxygène) ou fabriquez (pour le CO₂) = biochimique).

Avec le **spiromètre** : on a un individu qui va **ventiler sous la cloche**. Cet air est confiné car la cloche trempe dans des parois immergées. **Quand on inspire le volume sous la cloche va diminuer et inversement** : tout volume d'air qui change fait monter ou descendre la cloche. Il va y avoir **une variation de la quantité d'air**. On aura une **diminution du volume** qui correspond à la **consommation d'oxygène** qui est compensée par une **exhalation de gaz carbonique**.

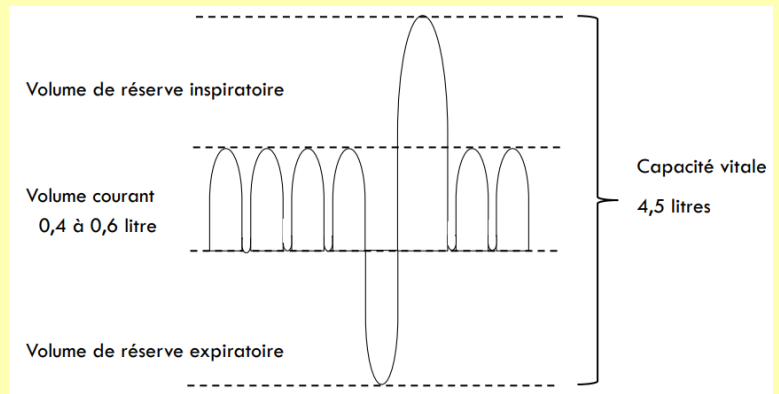


En inspirant et expirant, on fait donc **varier son volume pulmonaire** ce qui est représenté par **une oscillation**. L'oscillation peut augmenter si on fait une expiration forcée ou une inspiration forcée. C'est la base de la définition du volume pulmonaire. Aujourd'hui on n'utilise plus la cloche mais des systèmes électroniques beaucoup plus évolués. Cependant c'est plus parlant de voir mécaniquement.

Spirométrie des volumes pulmonaires

- ♥ La **capacité vitale** est l'ensemble du volume aérien qu'un individu est capable de mobiliser **entre une inspiration maximale et une expiration maximale**.
- ♥ **Capacité vitale = Volume courant + Volume de réserve inspiratoire + Volume de réserve expiratoire.**
- ♥ Le **volume courant** : Volume d'air qu'un individu est capable de mobiliser au repos pour assurer son métabolisme de base. Il vaut environ ½ L.

La **capacité vitale** est déterminée par la capacité d'expansion des alvéoles. En prenant une grande inspiration et en expirant profondément, **on mobilise les volumes de réserve inspiratoire/expiratoire**. Un sportif va avoir une capacité vitale décuplée. Il y a de même des différences entre quelqu'un de petit et de grand par exemple. L'arbre bronchique et trachéal étant immobiles, **cette capacité vitale n'est pas le volume pulmonaire total**.

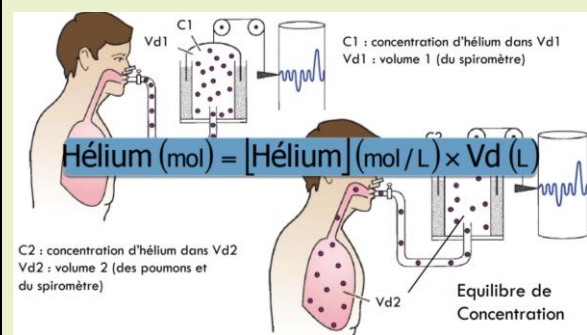


Mesure du volume pulmonaire par dilution d'hélium

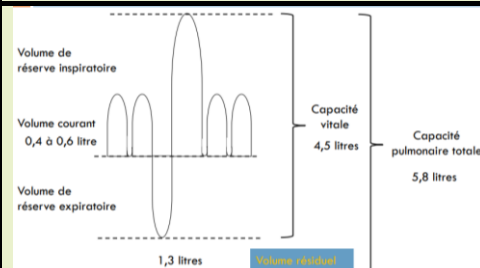
Il y a également **un volume d'air qui est fixe à l'intérieur des poumons** : on va pouvoir le mesurer par la **méthode de dilution**. En effet, les bronches ont un volume fixe et une structure rigide. On a recours à un traceur, **l'hélium**, un **gaz rare**, qu'on peut mesurer **sans avoir besoin de marqueur radioactif**.

- ➔ **Avant ouverture** : **concentration (C1)** de traceur dans un **volume connu (Vd1 = Volume de distribution du spiromètre)**, le patient ne **respire pas** dans le spiromètre.
- ➔ **Ouverture** de la valve sur l'embout buccal.
- ➔ **Après ouverture**, avec la ventilation, **l'hélium se distribue** dans un volume **plus grand (Vd2)**.

Une fois à **l'équilibre de concentration (C2)**, on détermine **Vd2** par un calcul : $Vd2 = (C1 \times Vd1) / C2$



$Vd2 - Vd1 = \text{capacité pulmonaire totale} = 5,8 \text{ L}$ ($4,5 \text{ L} < 5,8 \text{ L}$). Il y a donc 1.3L d'air dans les poumons qui n'est pas mobilisable, que vous inspiriez à fond ou que vous expiriez à fond. C'est un **volume inerte** qu'on appelle le **Volume Résiduel** qui correspond au volume des bronches et des bronchioles, structures élastiques qui **se collabent à l'expiration et ouvrent à l'inspiration**.



♥🌟 **Capacité pulmonaire totale (5.8L) = Capacité vitale (4,5L) + Volume Résiduel (1,3L)** ♥🌟

- ✍ La détermination du volume courant permet aussi de régler un ventilateur mécanique chez un sujet endormi au cours d'une intervention chirurgicale.

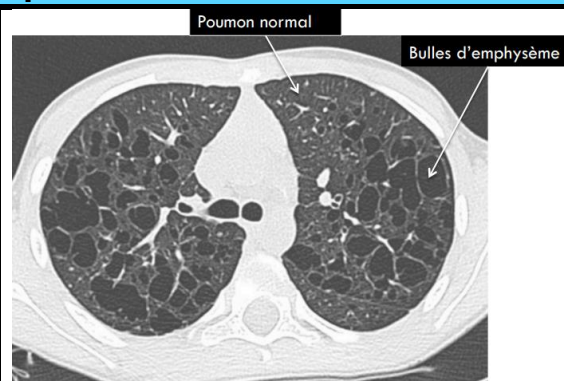
Insuffisance respiratoire



Le **volume résiduel** est un volume d'air qui n'est pas en contact avec le sang. Pour les échanges gazeux, c'est **un espace mort sur le plan fonctionnel**. (En l'absence d'alvéoles vous aurez beau faire rentrer de l'air, s'il n'y pas de contact avec le sang ça ne sert à rien). **L'insuffisance respiratoire** est définie par la **diminution des échanges** gazeux entre le sang et l'air alvéolaire secondaire à une **maladie pulmonaire**. Dans certaines maladies, le volume résiduel augmente et les échanges gazeux diminuent car **la capacité vitale diminue**. Le symptôme principal est **l'essoufflement** : la dyspnée peut donc être un **signe clinique de maladie respiratoire et de maladie cardiaque** !

Augmentation pathologique du volume résiduel

On a ici une **coupe transversale de Scanner** thoracique avec le **médiastin** en blanc au milieu. En haut, le **poumon sain, structure assez dense**. Plus bas, on a un **poumon dilaté avec des bulles à l'intérieur du parenchyme**. On appelle cela de **l'emphysème**. Ce sont **des espaces morts**. Il y a une destruction du parenchyme. La capacité pulmonaire totale n'a pas changé mais **la capacité vitale est diminuée**.



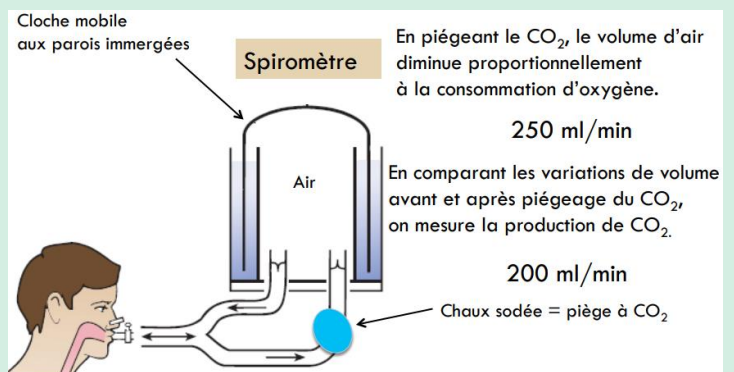
3. MESURE DES PARAMETRES RESPIRATOIRES

Mesure de la consommation d'oxygène

Lorsque vous inspirez vous consommez de l'oxygène, lorsque vous expirez vous rejetez du gaz carbonique.

Grâce à des **pièges à gaz carbonique** comme **la chaux sodée** (qui va réagir avec le CO_2 et le piéger), **on peut dissocier la consommation d'oxygène de l'expiration de CO_2** . **Le volume de la cloche est uniquement proportionnel à la consommation d' O_2** .

250ml/min est le volume d'oxygène que consomme un individu normal pour assurer son **métabolisme de base**. En comparant la quantité de gaz carbonique avant et après piégeage à la chaux sodée on obtient la quantité exhalée par un individu lors de l'expiration : **200ml/min**.



Respiration cellulaire (≠ ventilation +++)

La **respiration cellulaire** désigne l'utilisation de l'O₂ par **les chaînes respiratoires mitochondriales** pour produire de l'**ATP**. **Ce sont les cellules qui respirent et pas les poumons !** Au cours de ce processus, **les molécules organiques** (glucides, lipides, protides) sont **oxydées grâce à l'O₂** et du **CO₂ est produit** en proportion.

Métabolisme de base → C'est la quantité d'atp dont on a besoin pour faire fonctionner l'organisme au repos (équilibre thermique, pas en pleine digestion, pas de travail mécanique ni intellectuel : c'est une situation de vie végétative).

Bilan de la réaction (gaz seulement)

Consommation d'oxygène	Production de gaz carbonique
250 ml/min	200 ml/min

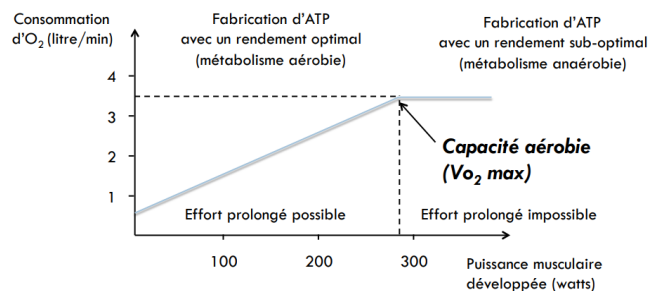
Résultats correspondant au métabolisme de base

Puissance musculaire et consommation d'oxygène

Pour augmenter ses performances physiques, on a besoin d'un muscle efficace qui **va trapper le plus d'O₂ possible**.

♥ **La puissance musculaire est en relation avec la quantité d'oxygène qu'on va pouvoir consommer.** 🏃*

Vous faites un effort prolongé en augmentant la puissance au fur et à mesure. Il arrive un moment où **la quantité d'O₂ ne subvient plus aux besoins du métabolisme**. Vous n'êtes plus en mesure d'oxyder les glucides, les lipides avec suffisamment d'oxygène pour produire de l'ATP à un rendement maximal. Vous passez à une **phase de plateau** où vous continuez à augmenter la puissance musculaire mais l'oxygène n'arrive plus et donc les muscles fonctionnent en **anaérobie** : **on est arrivé à la consommation d'oxygène maximale**. C'est à ce moment que commencent à apparaître les crampes, la fatigue, car on produit des dérivées du métabolisme énergétique comme **l'acide lactique**. Cette relation permet de définir chez chaque individu la VO₂ max.

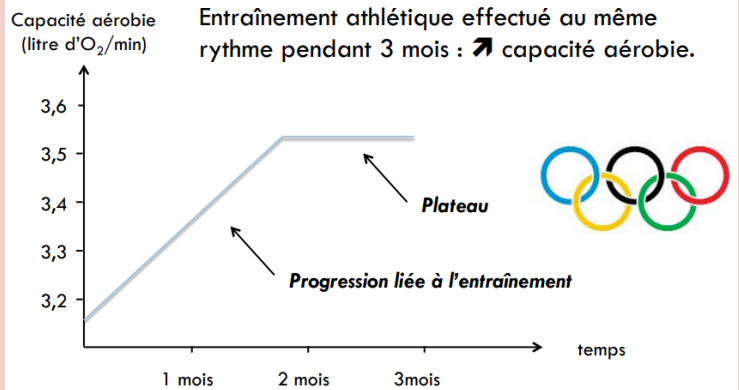


VO₂max ou capacité aérobie = consommation d'O₂ maximale en capacité aérobie qui correspond au point d'inflexion sur la courbe. ♥ ♥

Effet de l'entraînement sur la capacité aérobie des athlètes

Pour augmenter les performances sportives on va vouloir augmenter la capacité aérobie et la capacité des cellules (en améliorant **la qualité d'extraction de l'oxygène** au niveau tissulaire). La **consommation d'O₂ maximale** est mesurée chez **les athlètes** pour évaluer leur **capacité aérobie**.

Un **programme d'entraînement** pour une activité athlétique se déroule généralement **sur 2-3 mois** et a pour objectif l'augmentation de la capacité aérobie. Quand on arrive à la **phase de plateau** les athlètes **démarrent leur compétition**. On accède à la véritable capacité aérobie maximale grâce à cet entraînement intensif. *L'entraînement modifie la capacité aérobie en engendrant une modification de l'intérieur des cellules, de la quantité de mitochondries, d'hémoglobine notamment avec l'entraînement en altitude.*

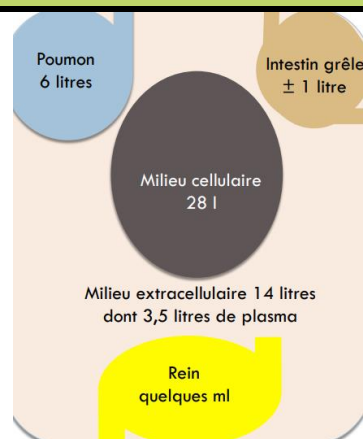


VOLUMES, DEBITS ET SURFACES D'ÉCHANGES

- ➔ Nos trois organes principaux sont : **le poumon, l'intestin et le rein** qui sont en relation avec le milieu extérieur. On a regroupé les autres organes dans le milieu cellulaire. *Les valeurs ici ne sont pas à connaître par cœur ! Il faut juste avoir une idée pour chaque organe.*

Volumes dans différents secteurs

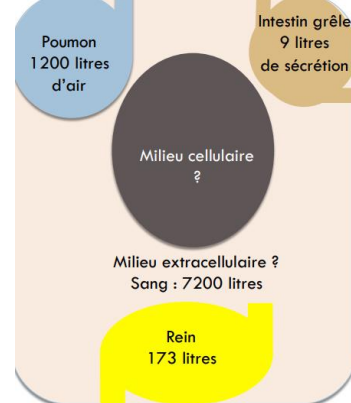
- ⇒ Volume extracellulaire : 14L (dont 3,5L de plasma)
- ⇒ Volume cellulaire : 28L
- ⇒ Poumon : 6 L d'air
- ⇒ Reins : quelques mL
- ⇒ Intestin grêle (fondamental dans les échanges au niveau digestif) : +/- 1 litre.



Débits quotidiens dans différents secteurs

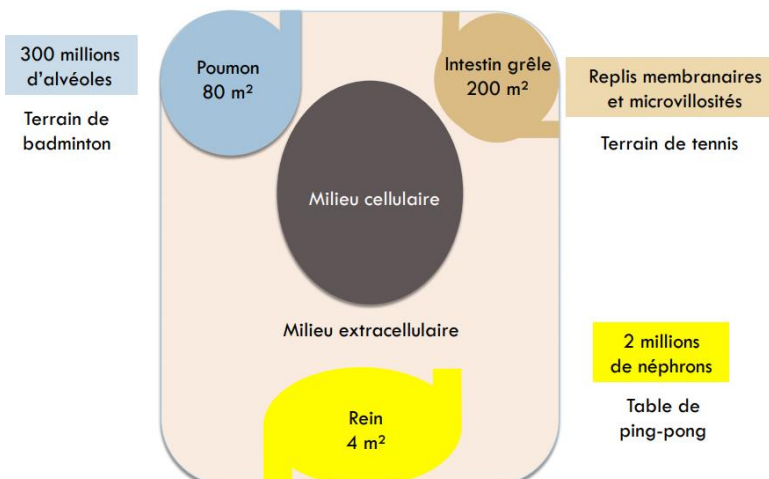
En un jour circulent :

- ⇒ Intestin grêle : 9 L de sécrétion
- ⇒ Poumons : 1200 L d'air
- ⇒ Brassage de 7200L de sang.
- ⇒ Rein : 173 L d'ultrafiltrat



Surface d'échange des différents secteurs avec le sang

- ⇒ **Poumons** : 80 m² (avec 300 millions d'alvéoles) = terrain de badminton.
- ⇒ **Intestin grêle** : 200 m² (membranaires et microvillosités) = terrain de tennis.
- ⇒ **Reins** : 4 m² (2 millions de néphrons) = table de ping-pong.



Plus le débit et plus la surface d'échange sont importants, plus les échanges (effectués selon le principe de diffusion à l'échelle tissulaire) vont être intenses.

On considère maintenant les interactions entre le sang et l'air. Le débit cardiaque et la fréquence ventilatoire peuvent énormément varier.

➔ Les débits sont très modulables selon l'activité physique, lors d'un effort :

♥ **La ventilation peut être multipliée par 15**

♥ **Le débit cardiaque peut être multiplié par 5**

✎ *La capacité aérobie dépend énormément du volume thoracique, il est donc préférable de commencer le sport en période de croissance pour expandre au maximum cette capacité.*

→ La **surface d'échange alvéolo-capillaire** est importante (**80 m²**) avec un débit extrêmement important ⇒ **échanges intenses**.

- **Au repos**, on a la capacité de mettre en contact 7200 L/j de sang et 1200 L/j d'air. A l'effort on passe à 36000 L/j de sang et 18000L/j d'air. **On a une capacité d'échange par diffusion gazeuse qui est absolument énorme.**
- Cette différence entre le repos et l'activité maximale nous donne la **notion de réserve fonctionnelle**. Il y a une capacité d'échanges qui est très grande par rapport à ce qu'on utilise. Un individu non entraîné atteint d'une insuffisance cardiaque reste capable d'effectuer la plupart de ses activités quotidiennes sans trop de problème. **Cette réserve fonctionnelle est donc très importante.**



Cela permet de définir les troubles suivants :

- ♥ **Insuffisance cardiaque : diminution du débit cardiaque (qualité du muscle cardiaque).**
- ♥ **Insuffisance respiratoire : diminution de la surface d'échange air/sang (qualité de la membrane alvéolocapillaire).**

Absorption dans l'intestin grêle et élimination rénale

Il y a autant de neurones dans l'intestin que dans la moelle épinière. L'intestin va absorber tout ce que vous lui donnez. Les nutriments passent l'épithélium intestinal et partent dans le sang. Le seul organe capable d'éliminer et de réguler ce qu'on absorbe c'est le rein.

Le **débit**, le **temps de contact** et la **surface d'échange** sont différents entre l'intestin et le rein.

- **Au niveau du rein on a : un débit élevé, un temps de contact court et une petite surface d'échanges.**
 - **Au niveau de l'intestin on a : un débit faible, un temps de contact élevé et une énorme surface d'échanges.**
- Dans les deux cas, l'intensité des échanges reste adaptée pour maintenir l'équilibre de composition du plasma.

Ces organes ne vont pas fonctionner de la même manière et pourtant ce sont des **milieux d'échanges** entre le milieu intérieur et le milieu extérieur. Ce qui va se passer dans le **rein** est complètement indépendant de votre volonté : **régulation hormonale**.

9 L /jour
Liquide
intestinal

792 L/jour
Plasma

180 L /jour
Ultrafiltrat
urinaire

- **Malabsorption intestinale : accélération du transit (diarrhée), réduction chirurgicale de la surface (cancer, maladies inflammatoires). Cela aboutit à des carences.**
- **Insuffisance rénale : diminution du débit d'ultrafiltration urinaire (perte de néphrons). La composition de votre plasma est compromise.**