

Master BSIS



U.E 7.12

Physiologie pour les techniques biomédicales

Dr. Laurent KOESSLER

Chargé de Recherche CNRS



Plan

Physiologie pour les techniques biomédicales

Chap1. Système Respiratoire

- échelle cellulaire (échanges gazeux, transport O₂, ...)
- échelle organique (anatomie, propriétés mécaniques, ...)
- paramètres mesurables (SpO₂, SaO₂, Volumes respiratoires, ...)
- ventilations artificielles et instrumentation

Chap2. Système Nerveux

- échelle cellulaire (neurone, potentiels membranaires, synapse, ...)
- échelle organique (connectivité cérébrale, électrogénèse, ...)
- paramètres mesurables (EEG, MEG, Potentiels évoqués, IRMf...)

Chap3. Système Musculaire

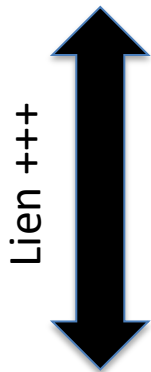
- échelle cellulaire (myocyte, unité motrice, jonction NM, ...)
- échelle organique (types, métabolisme, biomécanique)
- paramètres mesurables (EMG, ENMG, ...)

Rappel

La physiologie (du grec phusis: la nature et logos: l'étude) étudie le **rôle**, le **fonctionnement** et l'**organisation** mécanique, physique et biochimique des organismes vivants et de leurs composants (organes, tissus, cellules et organites cellulaires)

échelle différente

La physiologie étudie le comment et pourquoi ces structures fonctionnent chez l'organisme (vivant)



« Form fits function »



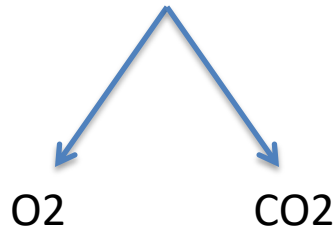
L'anatomie étudie les structures sur un organisme (mort)

Chapitre 1 :

Le système respiratoire

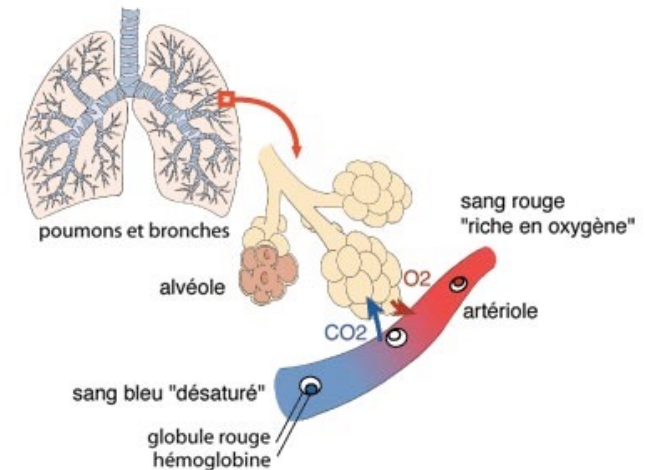
1.1 Echelle cellulaire

Les échanges gazeux se font entre les alvéoles et le sang
entre le sang et les tissus



- Transport de l'oxygène :
97% lié à l'hémoglobine,
3% dissous dans le sang,

- Transport du gaz carbonique :
25% lié à l'hémoglobine,
5% dissous dans le sang,
70% liée au bicarbonate (régulation de l'équilibre acide-base).



Chap 1.1 – Echelle cellulaire

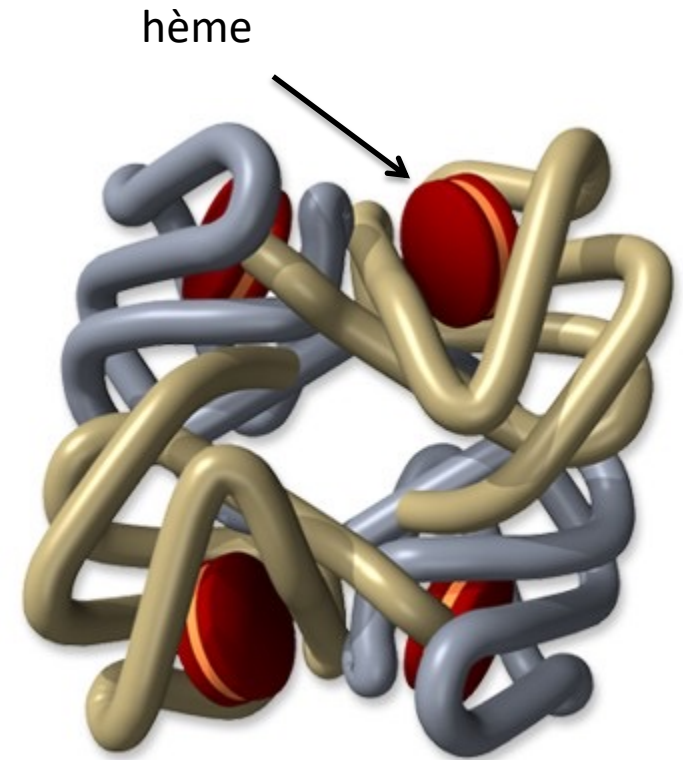
Hémoglobine (Hb):

2 chaînes α et 2 chaînes β

4 hèmes

Chaque hème contient un atome de Fe
pouvant fixer un O_2

Donc, chaque Hb peut fixer 4 O_2

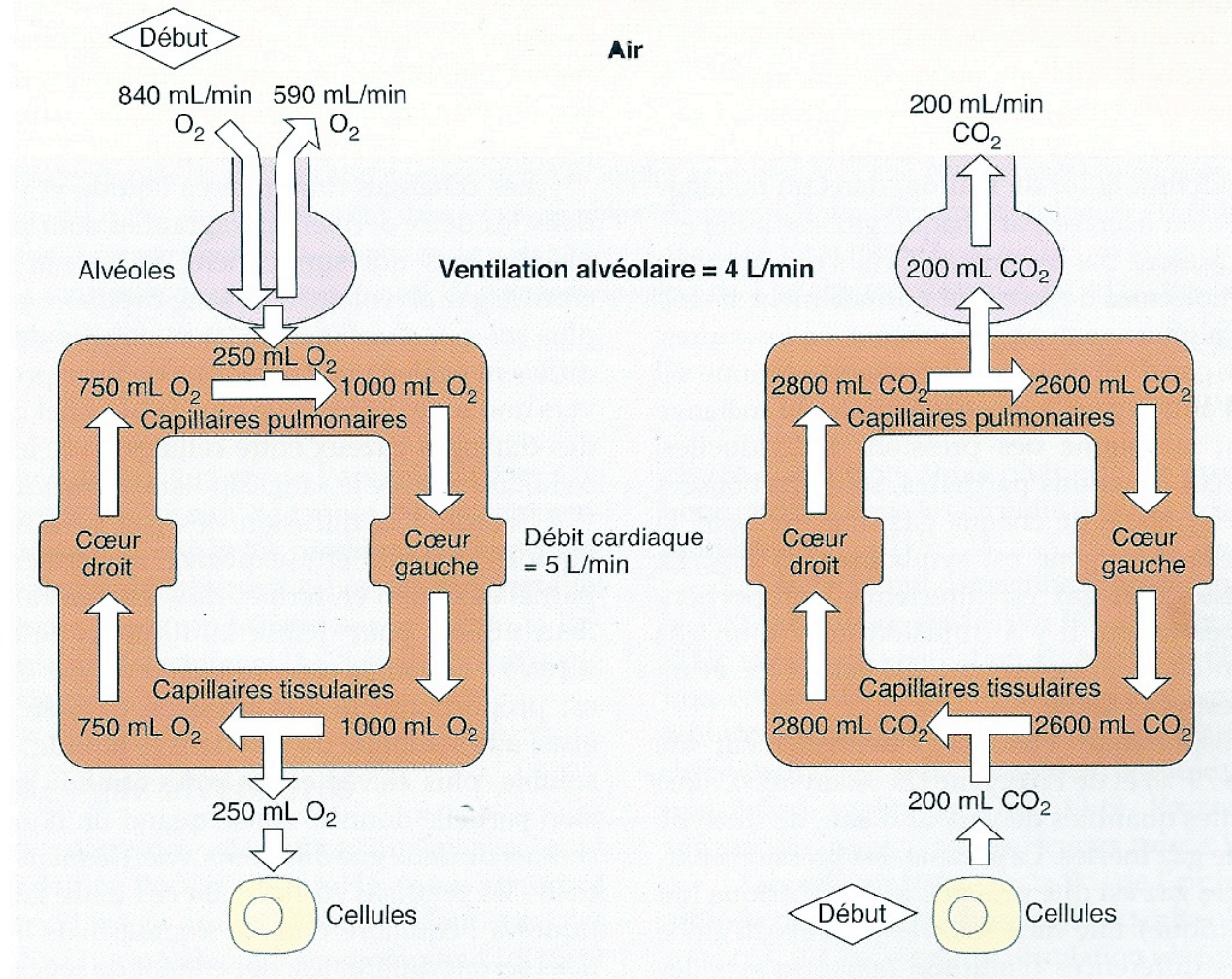


*Représentation schématique
d'une molécule d'Hb*

Dans les muscles, O_2 transporté par une protéine semblable : myoglobine

Chap 1.1 – Echelle cellulaire

**Echanges gazeux
entre alvéoles – sang
entre sang - cellules**



Attention :

Air ne contient que 21% O₂

Donc si 4L d'air inspiré par min alors 840mL O₂ en réalité

Remarque :

circuit O₂ = circuit CO₂ (sens inverse)

Chap 1.1 – Echelle cellulaire

A l'équilibre: volume d'O₂ qui quitte les capillaires tissulaires et est consommé par les cellules des tissus par unité de temps = volume d'O₂ ajouté au sang dans les poumons

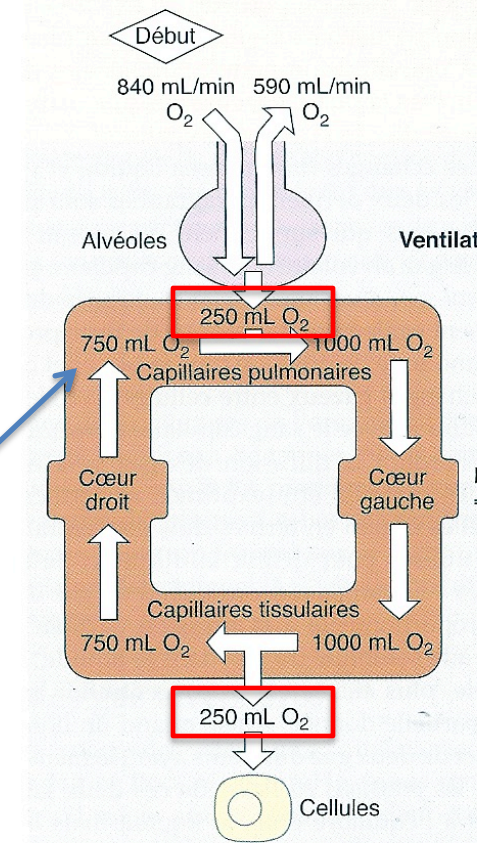
Le quotient respiratoire (QR) est :
(CO₂ produit) / (O₂ consommé)

Lorsque régime alimentaire équilibré : QR = 0,8
8 molécules de CO₂ produites pour 10 molécules d'O₂ consommé

QR = 1 pour hydrates de carbones
 0,7 pour les graisses
 0,8 pour les protéines

Remarque :

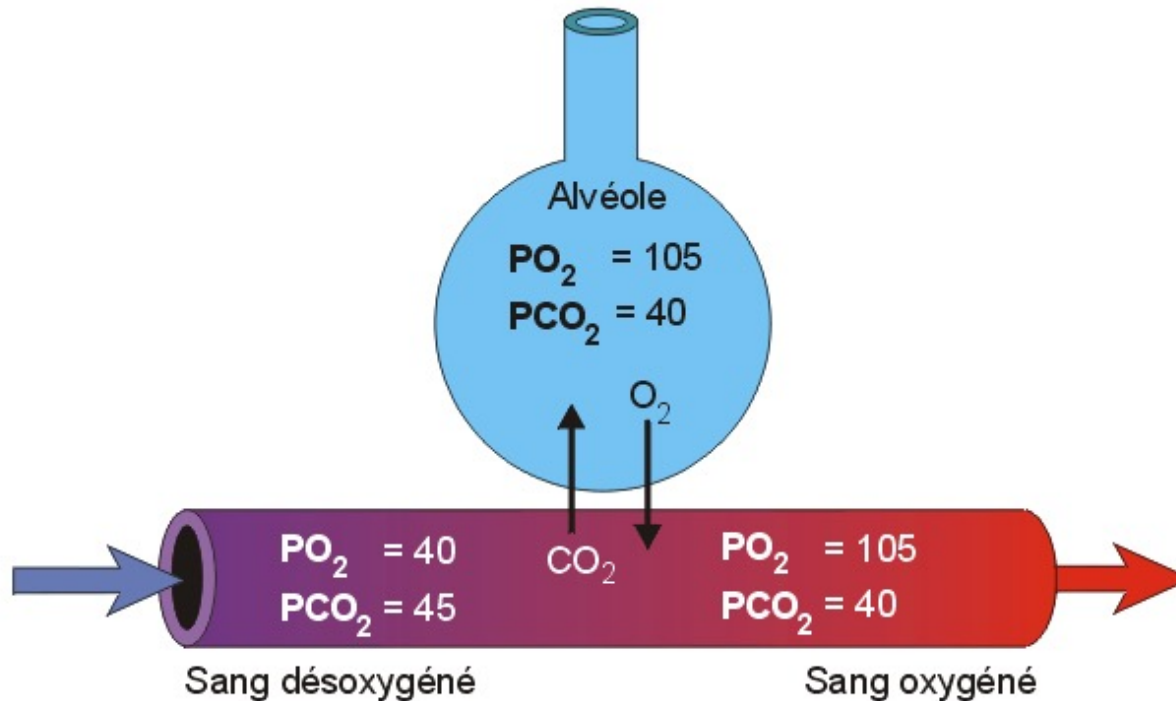
Le sang qui pénètre dans les poumons contient déjà O₂



Chap 1.1 – Echelle cellulaire

Les molécules de gaz sont en mouvement aléatoire permanent. Ces molécules qui se déplacent rapidement, entrent en collision et exercent une pression, dont l'amplitude est augmentée par tout ce qui majore les déplacements.

Échanges au niveau des alvéoles

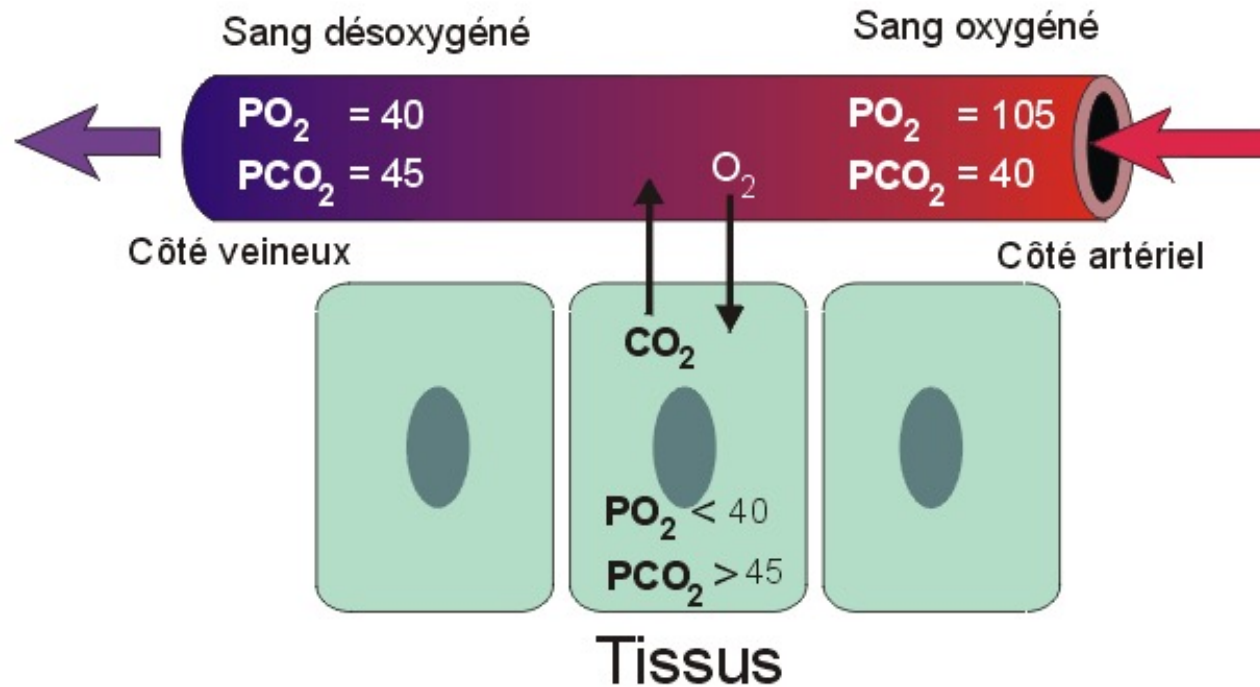


NB : gradients de pression et flux

Chap 1.1 – Echelle cellulaire

Les molécules de gaz sont en mouvement aléatoire permanent. Ces molécules qui se déplacent rapidement, entrent en collision et exercent une pression, dont l'amplitude est augmentée par tout ce qui majore les déplacements.

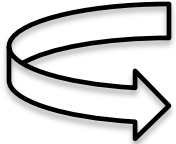
Échanges au niveau des tissus



NB : gradients de pression et flux

Chap 1.1 – Echelle cellulaire

Loi de Henry : *À température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide.*



La quantité d'O₂ dissoute dans le sang est directement proportionnelle à la PO₂ du sang

O₂ relativement insoluble dans l'eau

Sur 200mL de sang : 3mL sont dissous et 197mL (98,5%)



transporté par globules rouges



Désoxyhémoglobine et Oxyhémoglobine

Remarque : utiliser en IRMf car susceptibilité magnétique ≠

Chap 1.1 – Echelle cellulaire

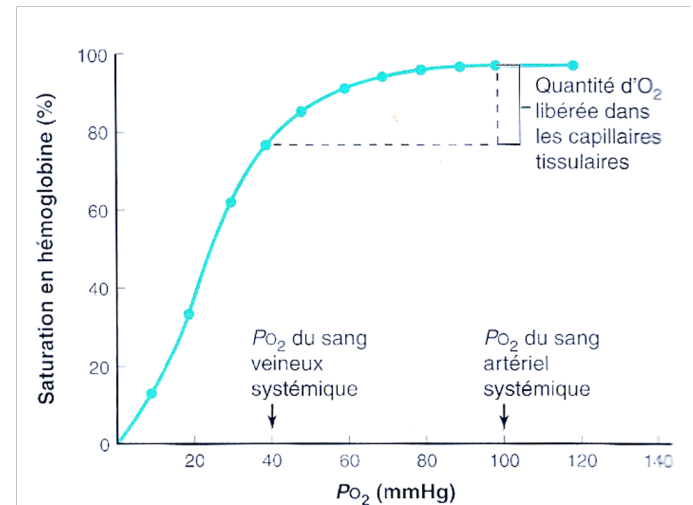
Dans un échantillon de sang contenant de nombreuses molécules d'hémoglobine, la fraction de toute l'hémoglobine sous forme HbO₂ s'exprime **en pourcentage de saturation de l'hémoglobine** :

$$\% \text{ de saturation} = \frac{\text{O}_2 \text{ lié à Hb}}{\text{Capacité max de fixation d'O}_2 \text{ par Hb}}$$

Exemple : si la qntité d'O₂ liée à l'hémoglobine est de 40% de la capacité max de fixation, l'échantillon est dit saturé à 40%.

Le dénominateur de cette équation est également appelée **capacité de transport de l'O₂** du sang

Facteur principal qui détermine le % de saturation :
PO₂ sanguine



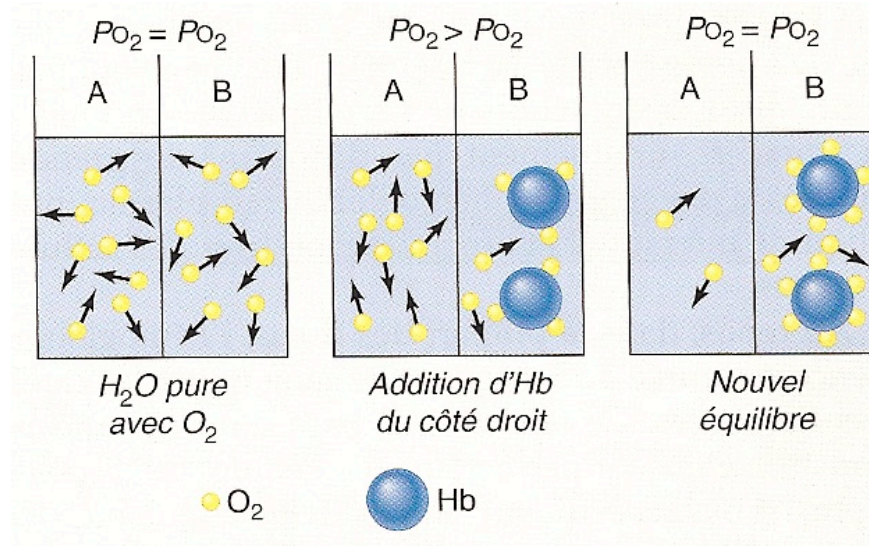
Courbe de dissociation oxygène-hémoglobine. Cette courbe est valable pour le sang à une température de 37 °C et une concentration artérielle normale en ions hydrogène. Pour une concentration donnée d'hémoglobine, l'axe vertical peut également représenter le contenu en oxygène, en millilitre d'oxygène. À une saturation de 100 %, la quantité d'hémoglobine transporte 200 mL d'oxygène dans le sang normal.

Chap 1.1 – Echelle cellulaire

Effet de la PO_2 sur la saturation de l'Hb

NB : l'O₂ lié à Hb ne contribue pas directement à la PO_2 sanguine (seul O₂ dissous le fait)

Existence de l'Hb joue cependant un rôle majeur dans la **q_tité totale** d'O₂ qui va diffuser



L'ajout d'Hb dans B casse l'équilibre car grande partie d'O₂ se combine avec Hb.

Même si la q_tité d'O₂ dans B reste la même, le nbr de molécules d'O₂ **dissous** a diminué donc PO_2 inférieure.

Quand les PO_2 s'égalisent, « tout » O₂ se trouve lié à Hb.

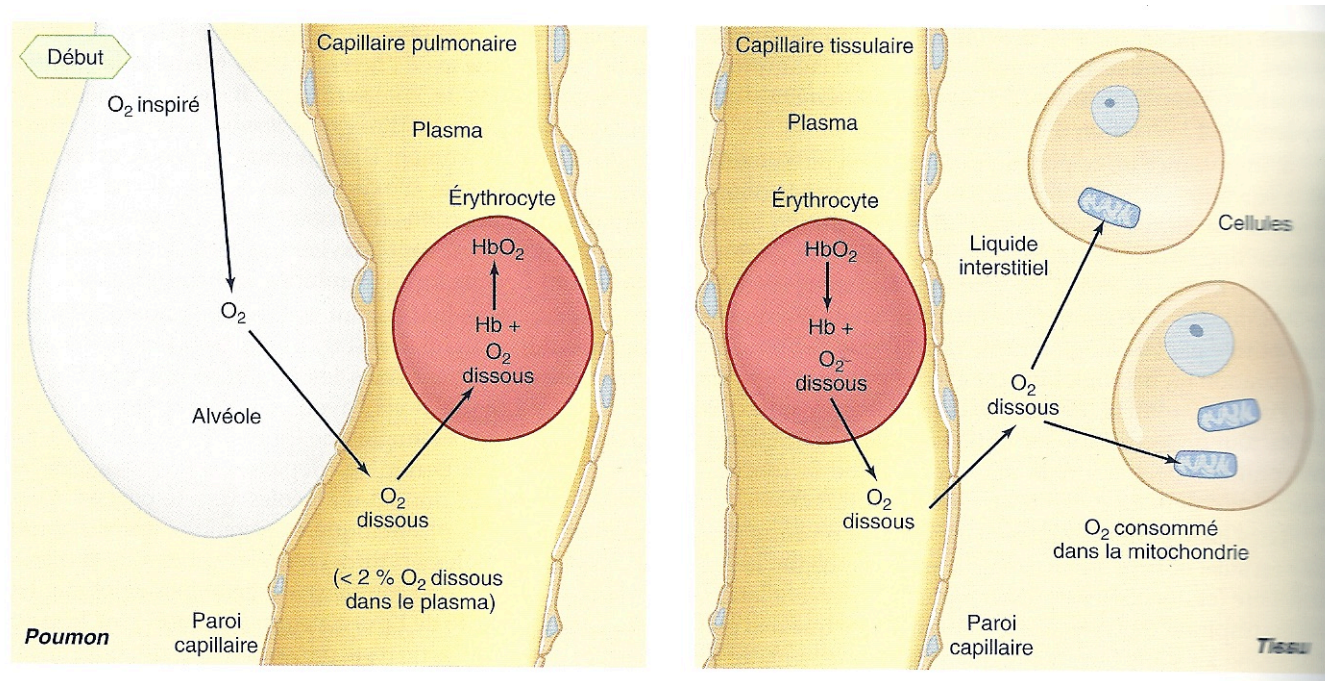
Chap 1.1 – Echelle cellulaire

On sait que saturation Hb = 97%

PO_2 alveoles = 105mmHg

PO_2 sanguine = 40mmHg

O_2 diffuse donc des alveoles vers le plasma



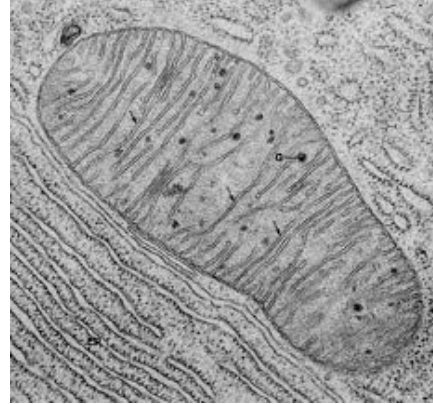
Mouvements O₂ dans les poumons et tissus

Tous les déplacements à travers les membranes se font par **diffusion**

Phénomène inverse dans capillaires tissulaires car
 PO_2 cellulaire < PO_2 sanguine donc O_2 vers mitochondrie

Respiration cellulaire : mitochondrie

Taille : ordre micromètre
1 à 10 μ m long – 0,5 – 1 μ m larg
Organite de la cellule eucaryote
Double membrane

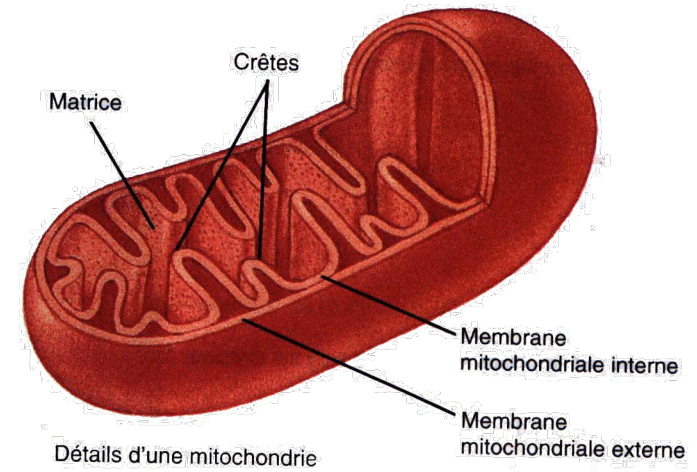


Site de formation de l'ATP

Consommation O₂

Production CO₂

Contient les enzymes du cycles de Krebs



Respiration cellulaire : voies cataboliques génératrices d'énergie

Dégradation de nutriments

(glucose)

Sans O₂

Fermentation

- Dégradation partielle glucose
- Ø chaîne transport des é

Respiration ϕ R anaérobie

- Chaîne transport é

Avec O₂

Respiration ϕ R aérobie

- Combustible = glucose
comburant = O₂
- Chaîne transport é

Chap 1.1 – Echelle cellulaire

Respiration cellulaire aérobie

Équation de base

Sucres + O₂ → déchets + énergie



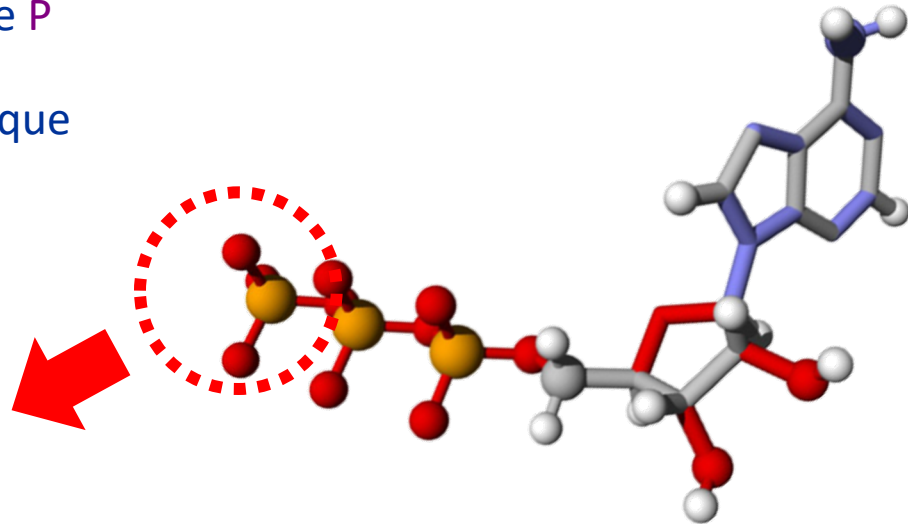
Pour être utilisable, Én. entreposée dans ATP

- adénosine triphosphate
- riche en Én. group. phosphate



Prix du travail CR: perte P

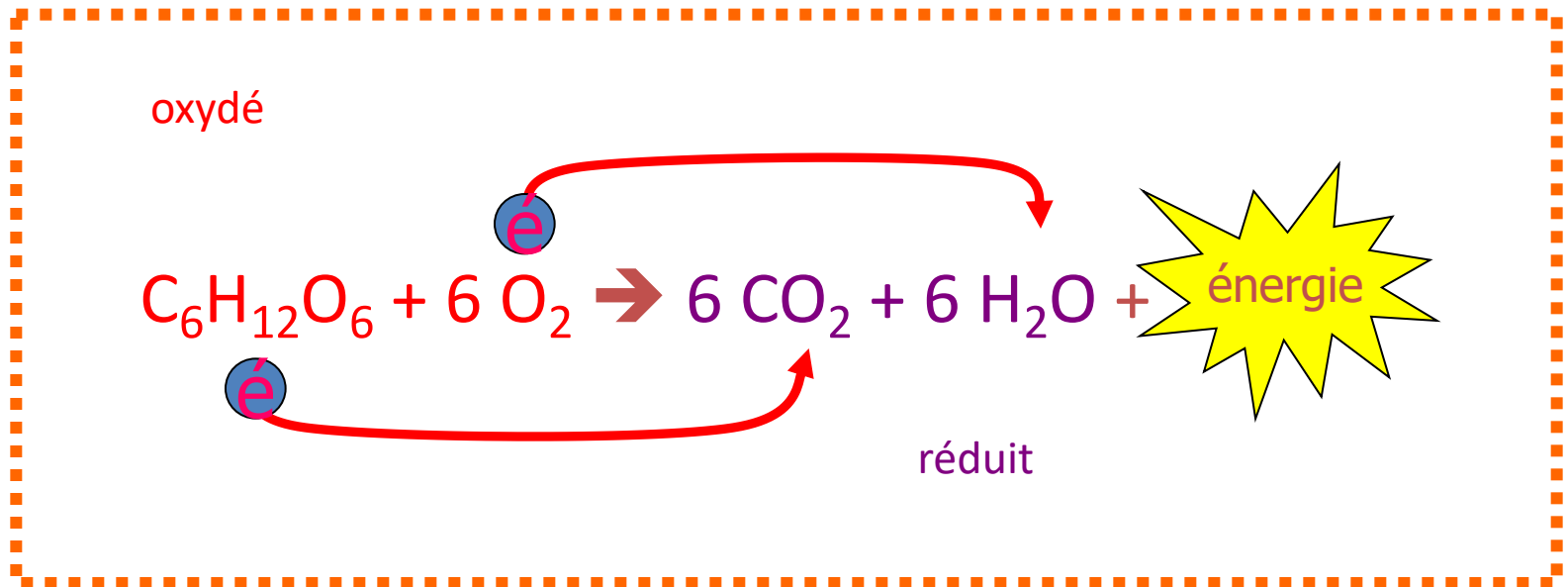
ATP → ADP + P inorganique



Quelques principes

Réaction d'oxydoréduction

- Oxydation: perte d'é
- Réduction: gain d'é



Caractéristiques générales

3 étapes faciles :

① glycolyse

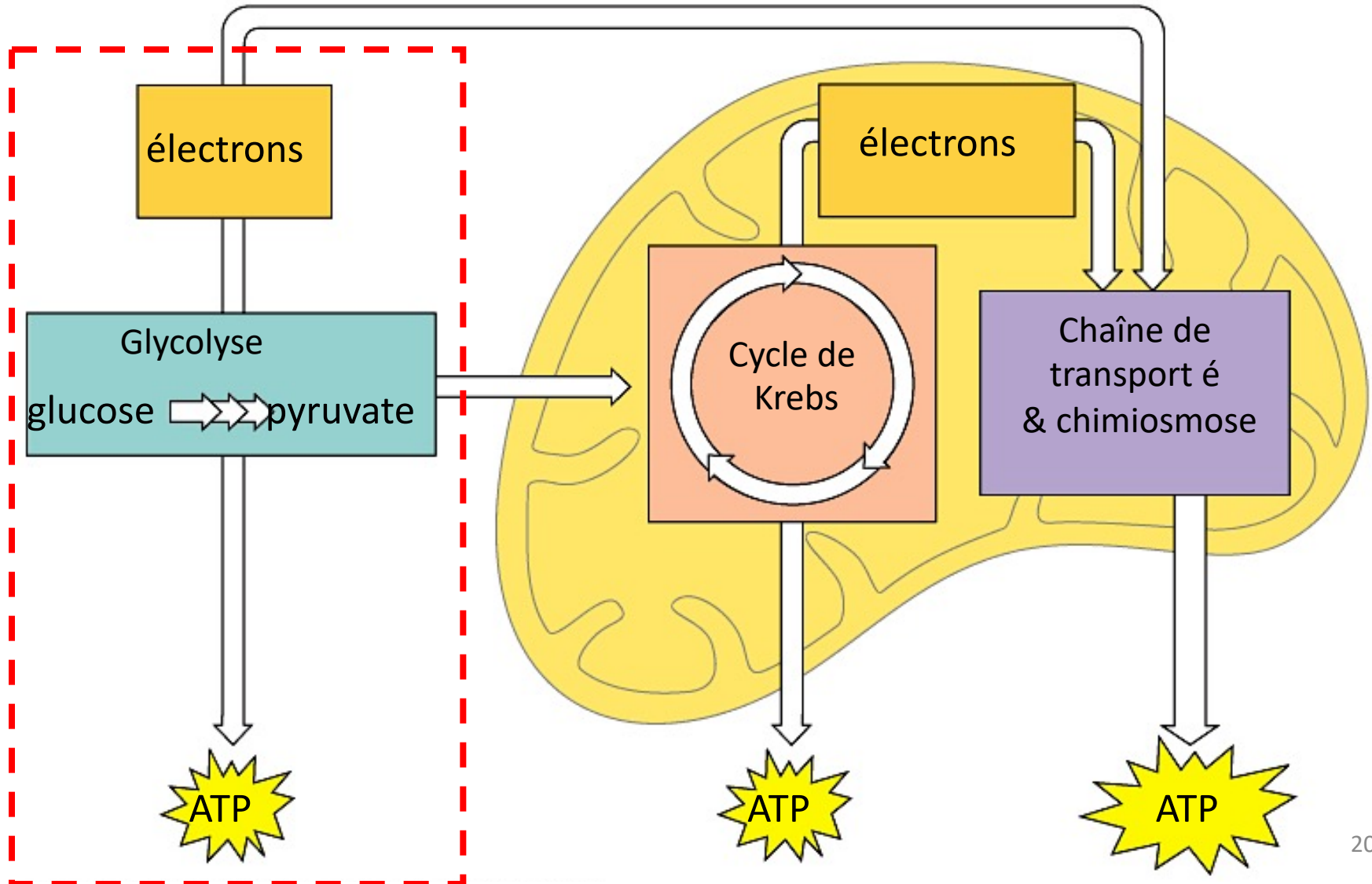
② cycle de Krebs

③ chaîne de transport d'é & chimiosmose

1 mole glucose dégradée produit ...

- 6 moles CO_2
- 36-38 moles ATP

Respiration cellulaire aérobie



1^{ère} partie - Glycolyse

Glycolyse = « dégradation du glucose »

- Au niveau du cytosol
- Se fait en présence ou absence O₂

Résultat

1 mole glucose → 2 moles pyruvate
(6C) (3C)

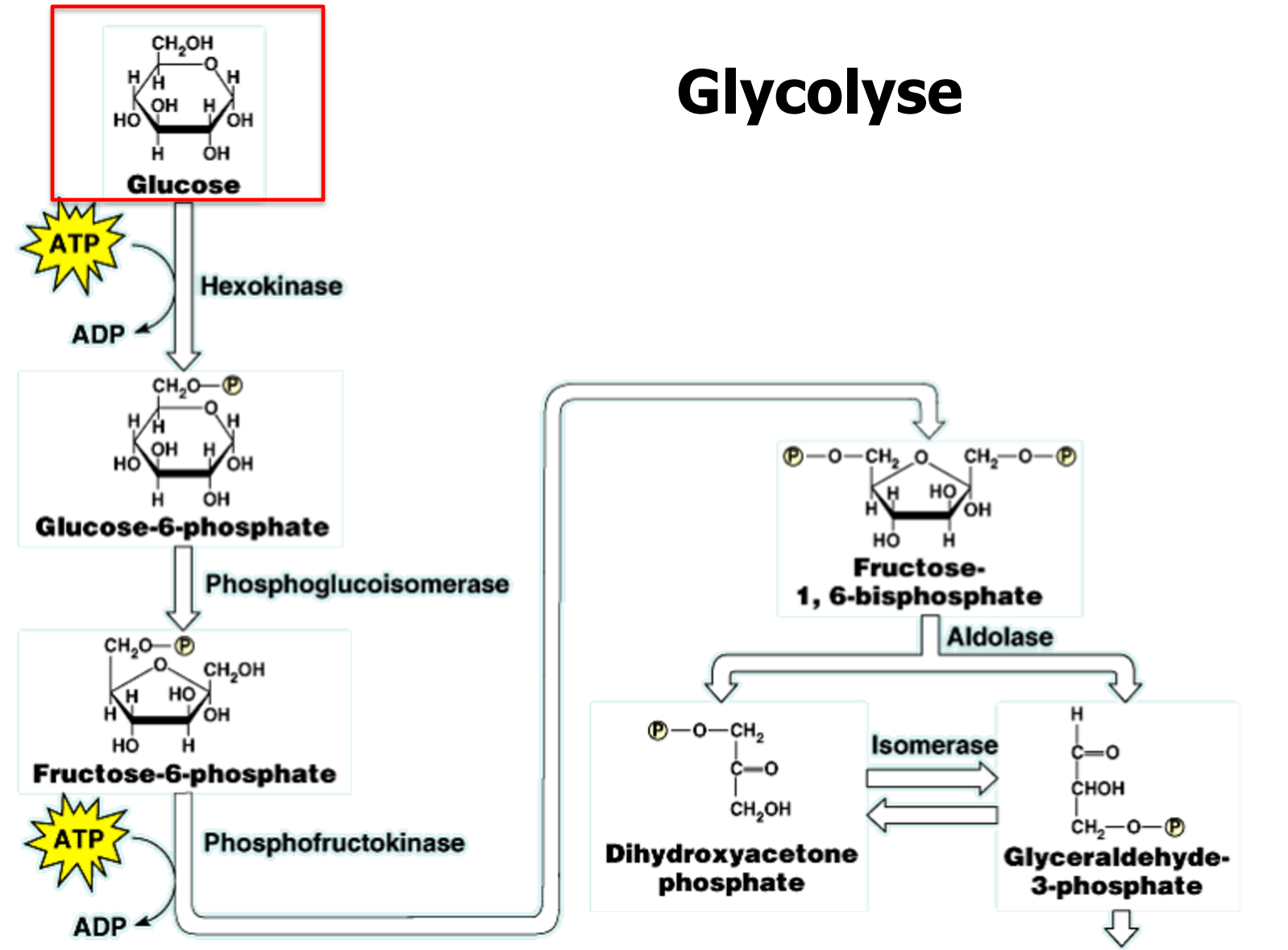
Phase d'investissement

- Phosphoryler la molécule pour l'hydrolyser en deux
- coût 2 ATP

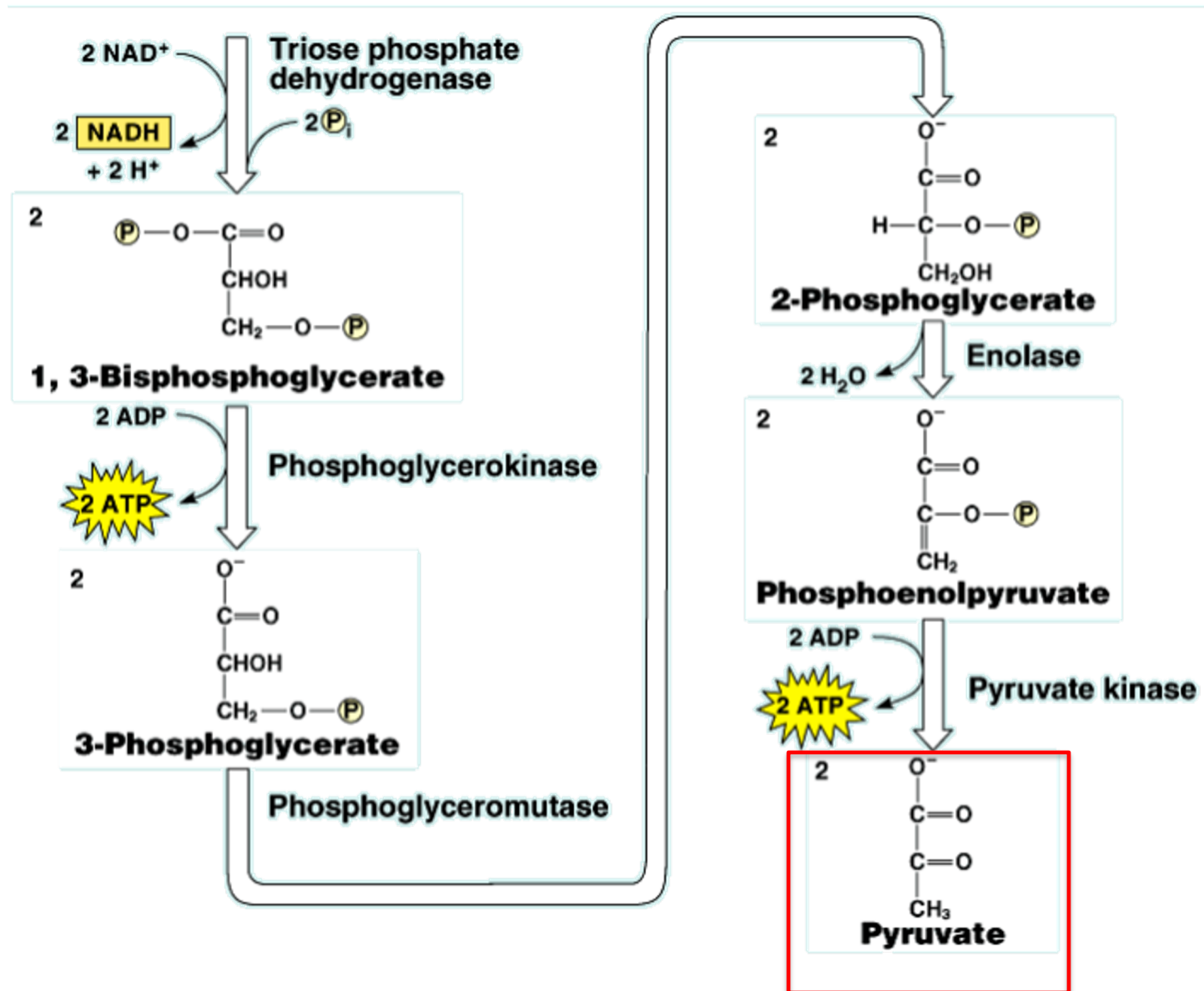
Phase de libération

- Modification de la molécule à 3C
- Libération 4 ATP
- Capteur d'é NAD⁺ (2 NADH + 2H⁺)

Glycolyse

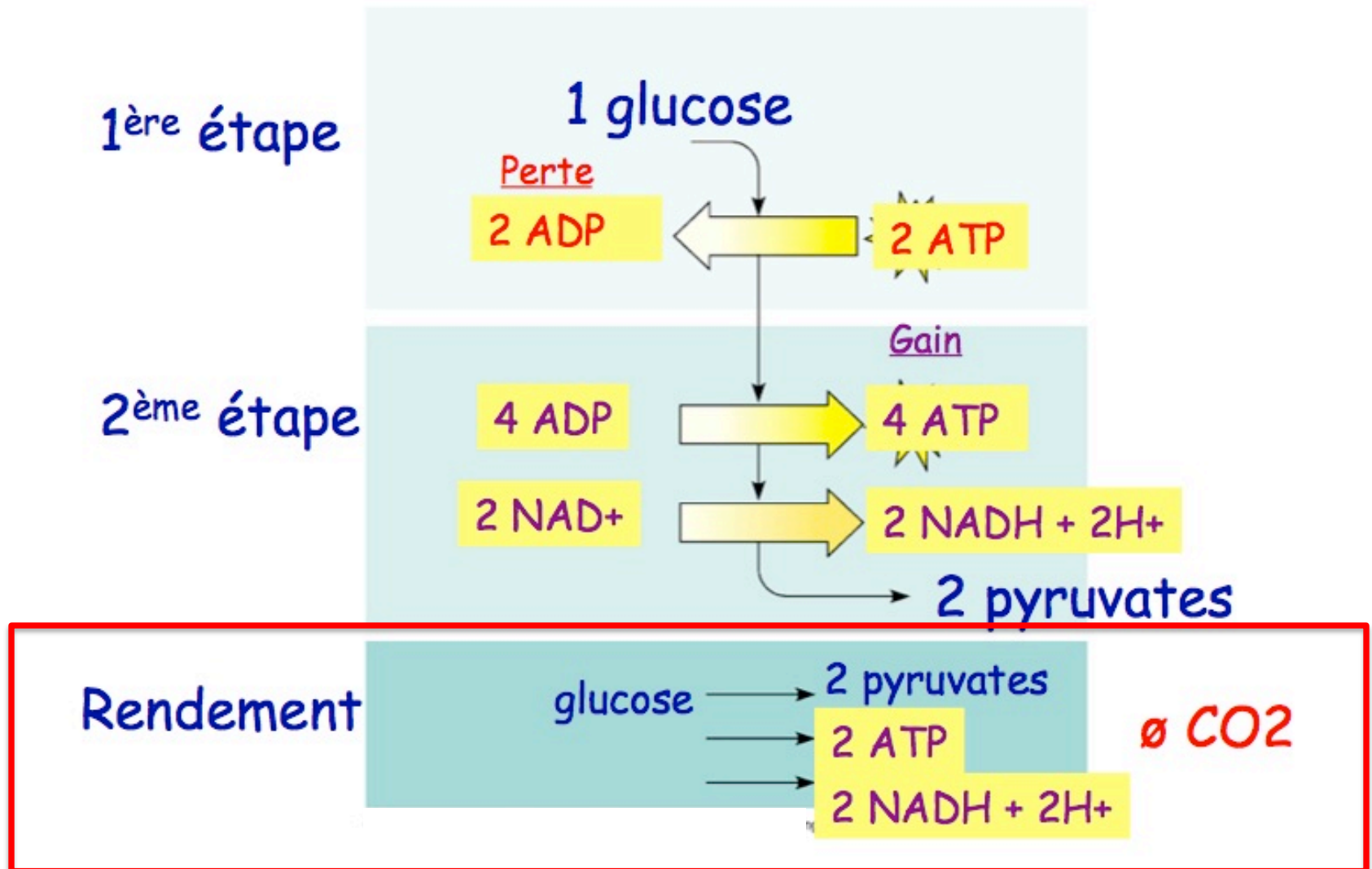


Chap 1.1 – Echelle cellulaire

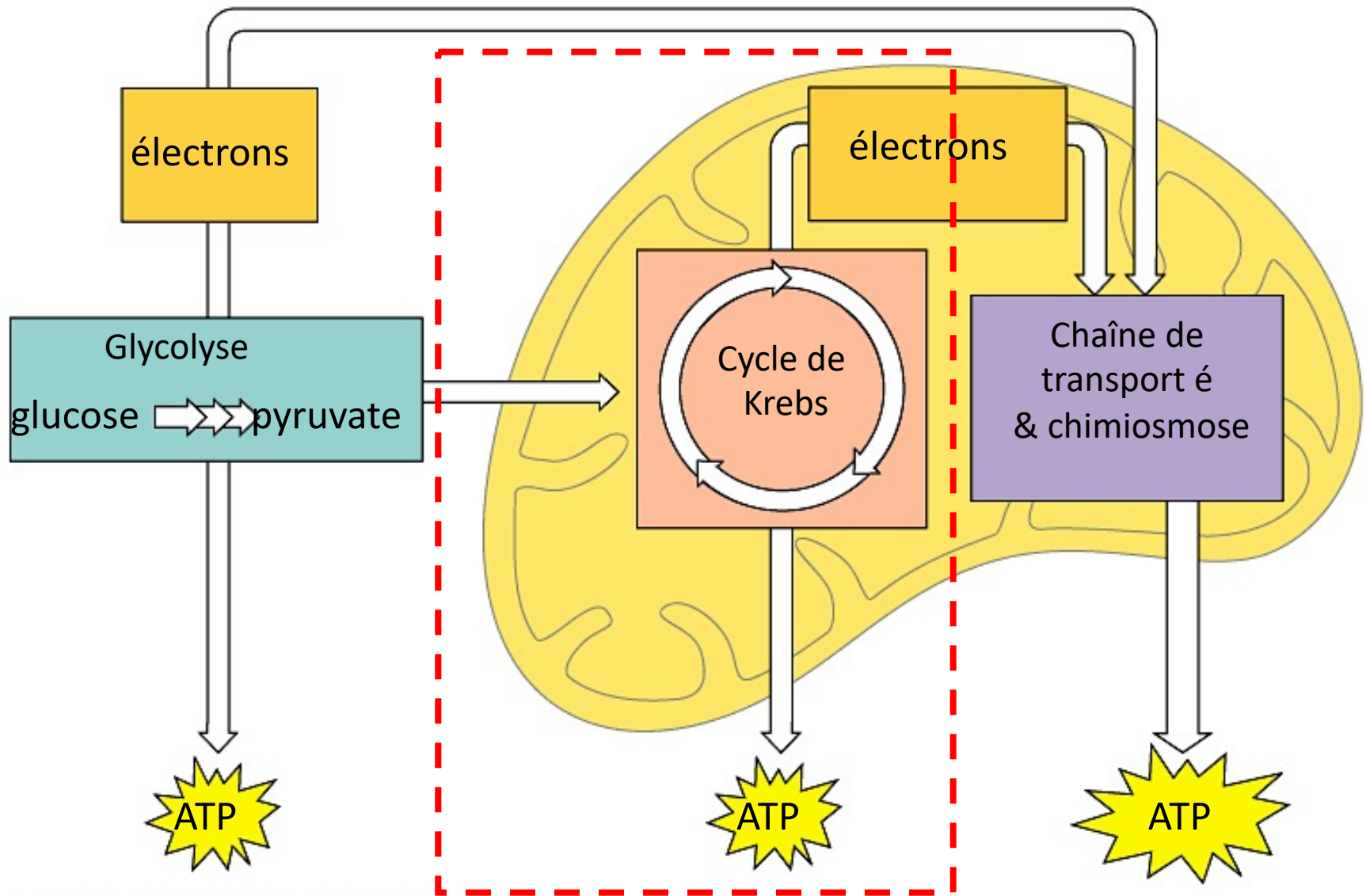


Chap 1.1 – Echelle cellulaire

En résumé



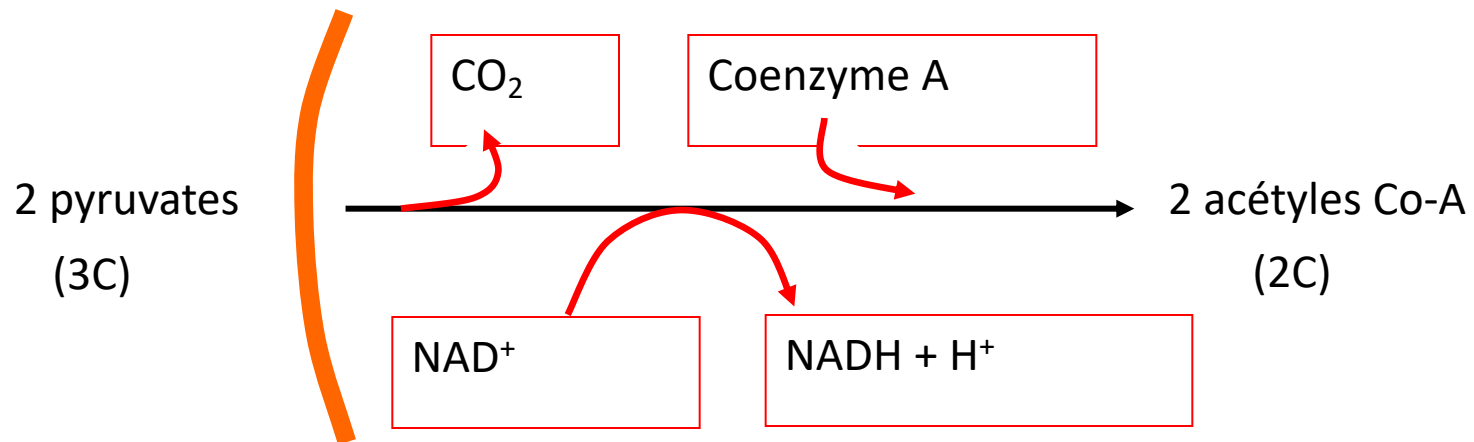
Respiration cellulaire aérobie



Avant le Cycle de Krebs

- Dans la mitochondrie (matrice)
- réaction qui exige O_2

Étape entre glycolyse et cycle de Krebs...



Production CO_2

Pas d'ATP

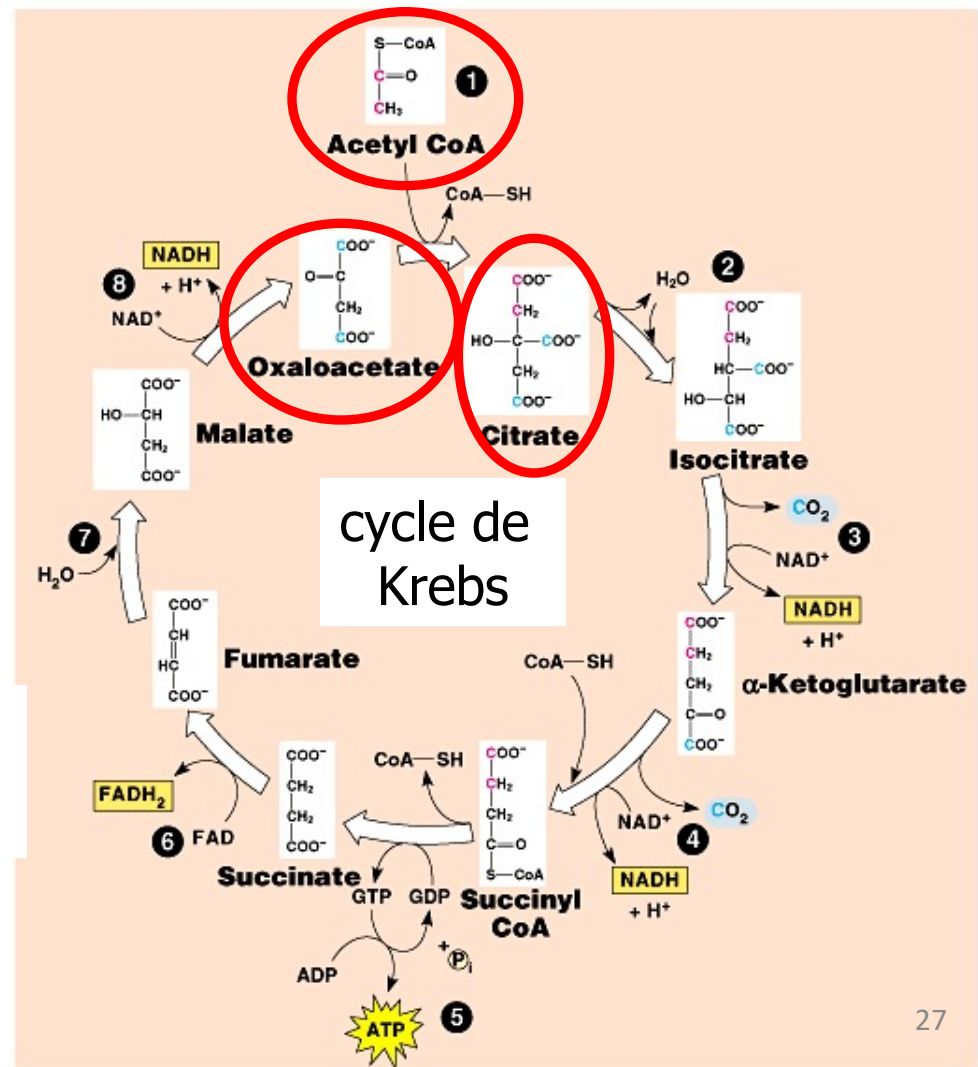
Cycle de Krebs

➤ 1 mole acétyle Co-A (2C)
entre dans le cycle...

acétyle Co-A (2C)
+
oxaloacétate (4C)

citrate (6C)

...et dégradation du citrate en
oxaloacétate



Bilan pour 1 mole Acétyle Co-A

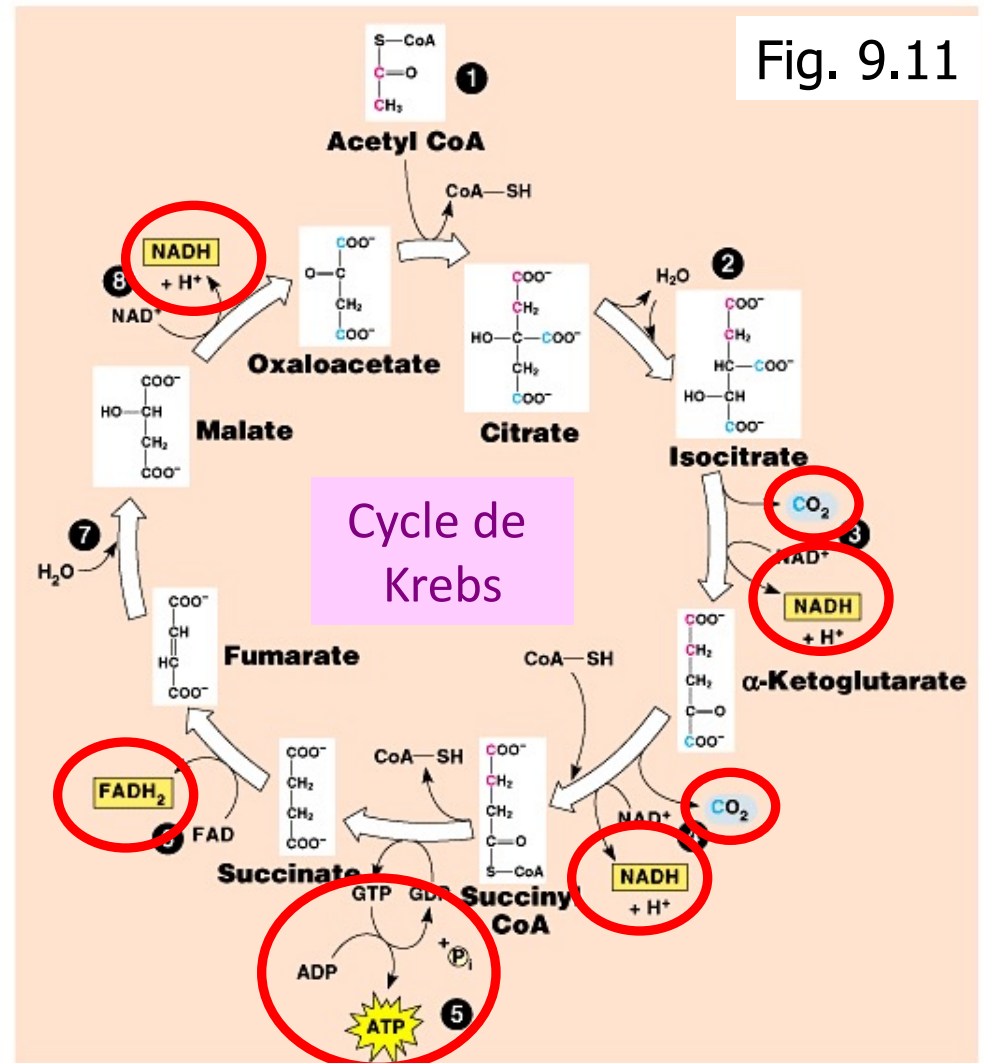
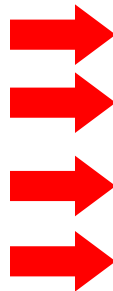
2 CO₂

1 ATP

3 NADH + 3H⁺

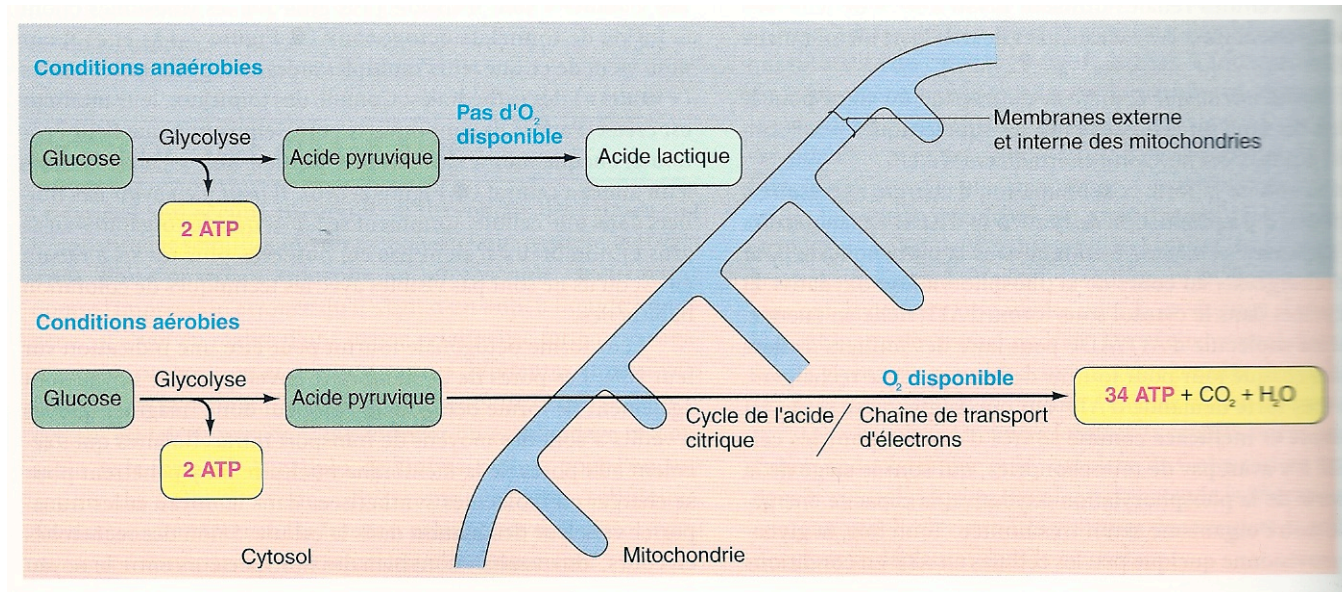
1 FADH₂

accepteurs d'é



Chap 1.1 – Echelle cellulaire

En condition anaérobie (sans O₂), la dégradation du glucose ne va pas au-delà de la glycolyse

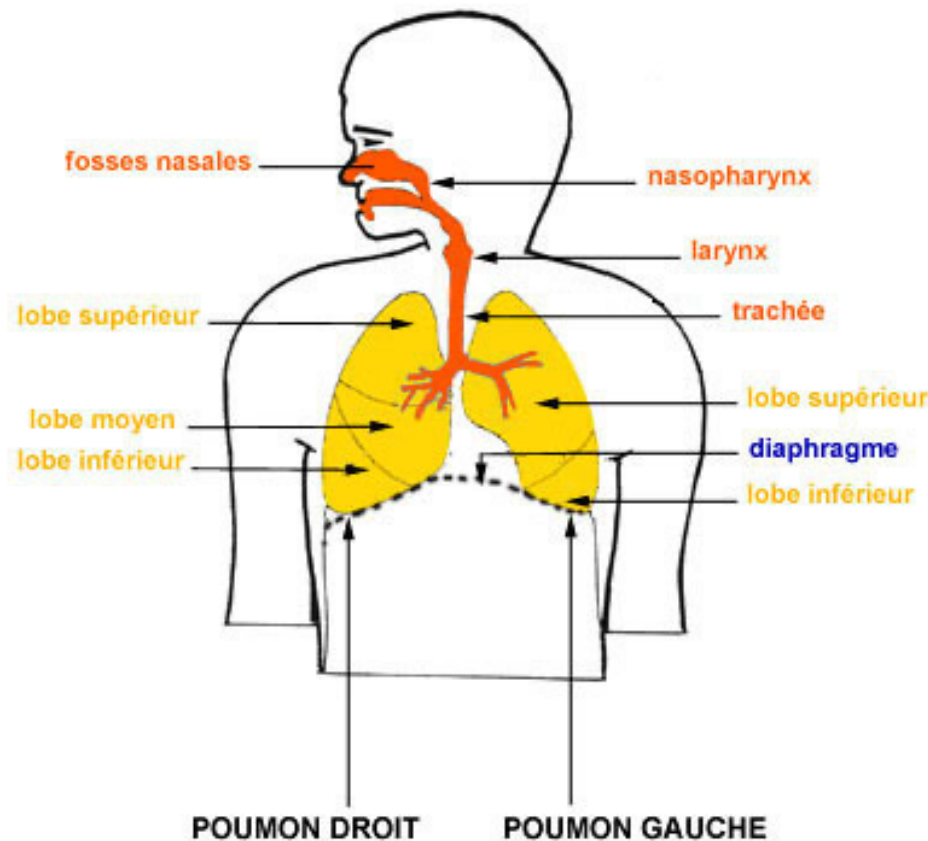


2 ATP contre 34 ATP !

Généralités sur l'appareil respiratoire

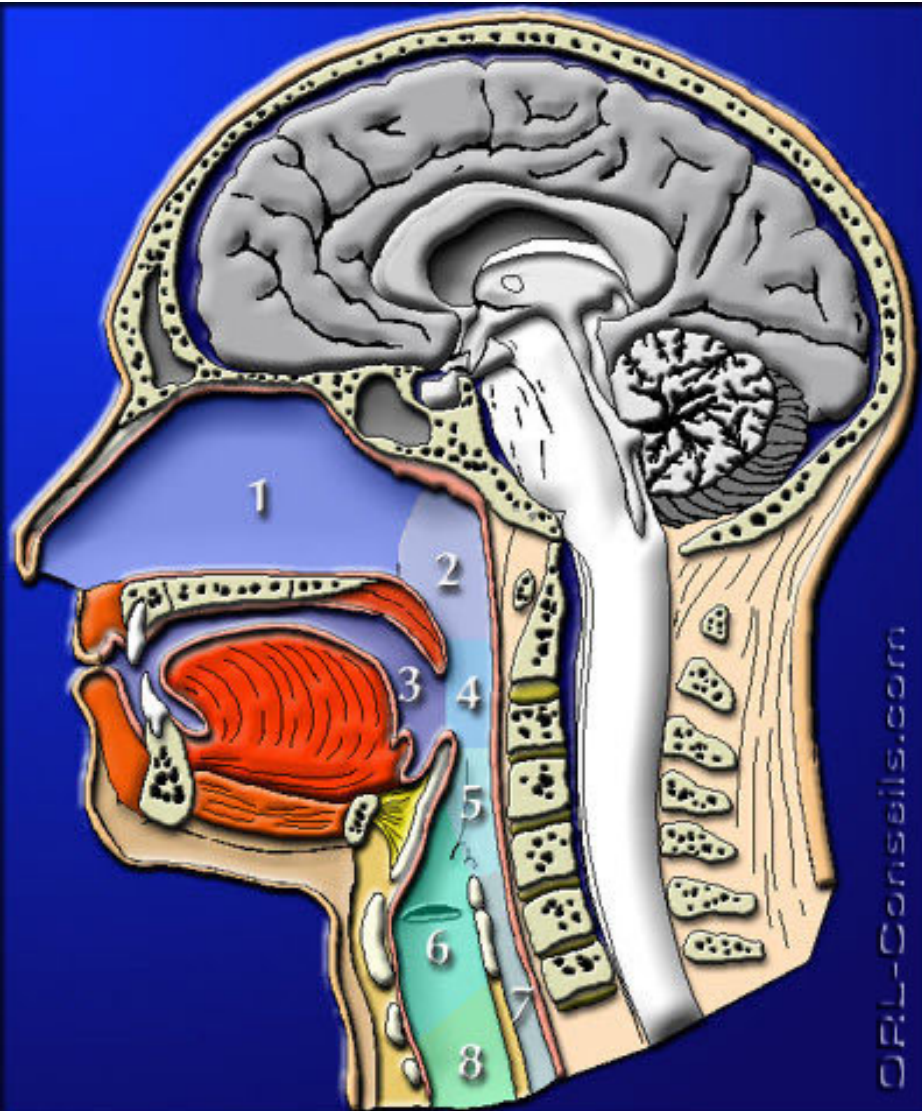
- Il comprend : le tractus respiratoire, les poumons et le diaphragme
- Il a pour fonction l'**hématose** : apporter l'oxygène au sang qui le distribue dans tout l'organisme et rejeter le gaz carbonique
- Il participe à la défense de l'organisme (le MALT : Mucosa-associated lymphoid tissue)
- Il possède des vertus endocriniennes : sérotonine...
- Il intervient dans l'homéostasie de l'équilibre acido-basique

Anatomie de l'arbre respiratoire



- **Voies extra-pulmonaires** : fosses nasales, nasopharynx, larynx, trachée et début des deux bronches,
- **Voies intra-pulmonaires** : des bronches souches jusqu'aux bronchioles terminales,
- **parenchyme respiratoire** : des bronchioles jusqu'au millions d'alvéoles pulmonaires

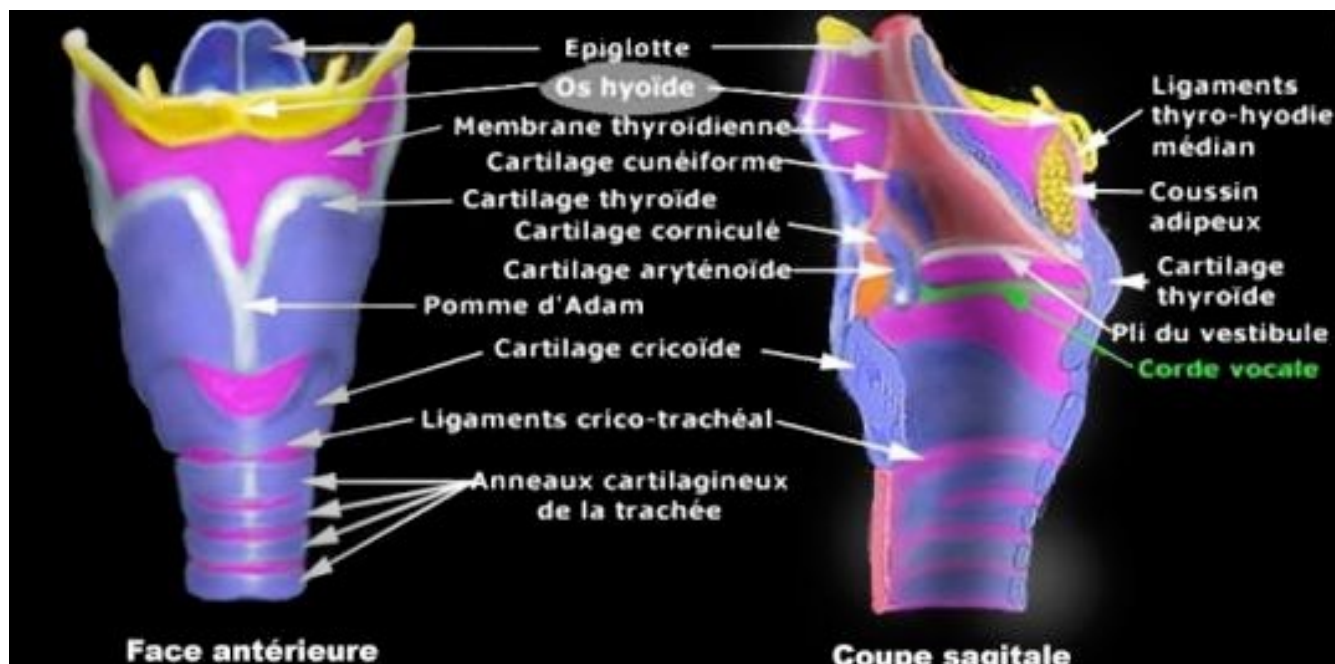
Coupe sagittale de la tête et du cou



- 1 - Fosse nasale
- 2 - Rhinopharynx ("cavum")
- 3 - Cavité buccale
- 4 - Oropharynx
- 5 - Hypopharynx
- 6 - Larynx
- 7 - Oesophage
- 8 - Trachée

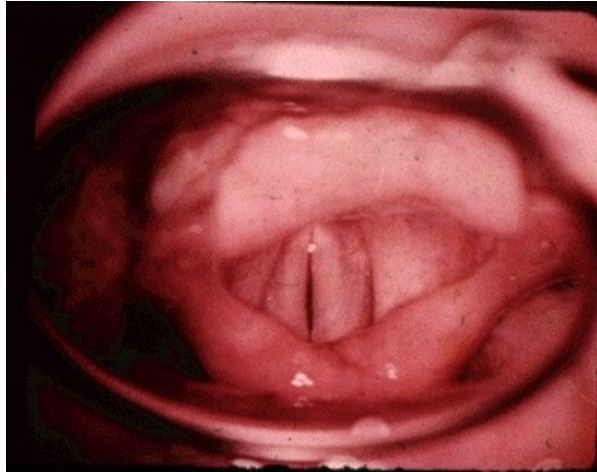
Anatomie du larynx

- Il fait suite au pharynx et devance la trachée
- Structure ostéo-cartilagineuse :
 - Os hyoïde,
 - Cartilages thyroïde, cricoïde, aryténoïdes (cordes vocales).

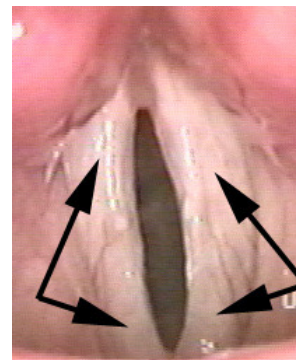
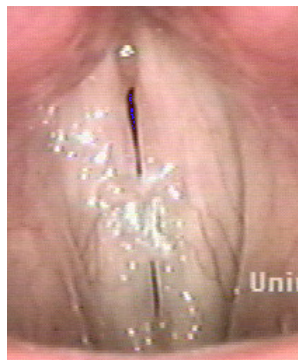


Larynx

Technique d'imagerie :
laryngoscopie



Vue endoscopique du larynx

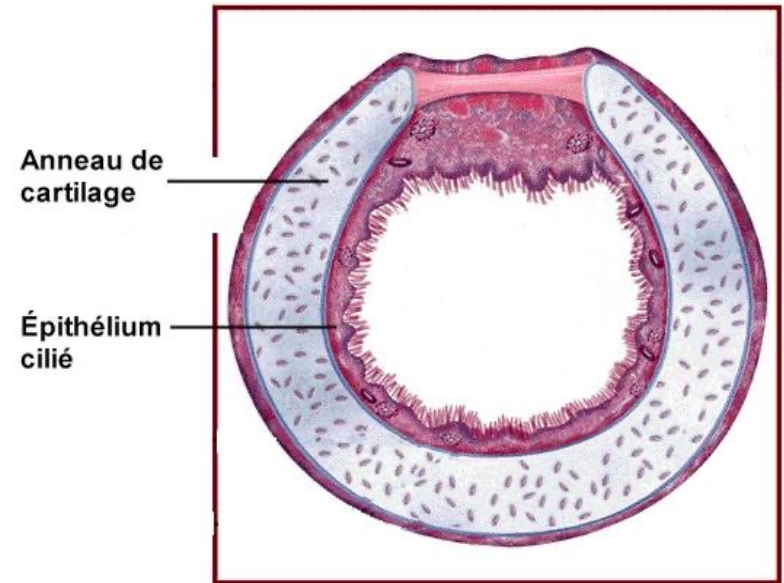
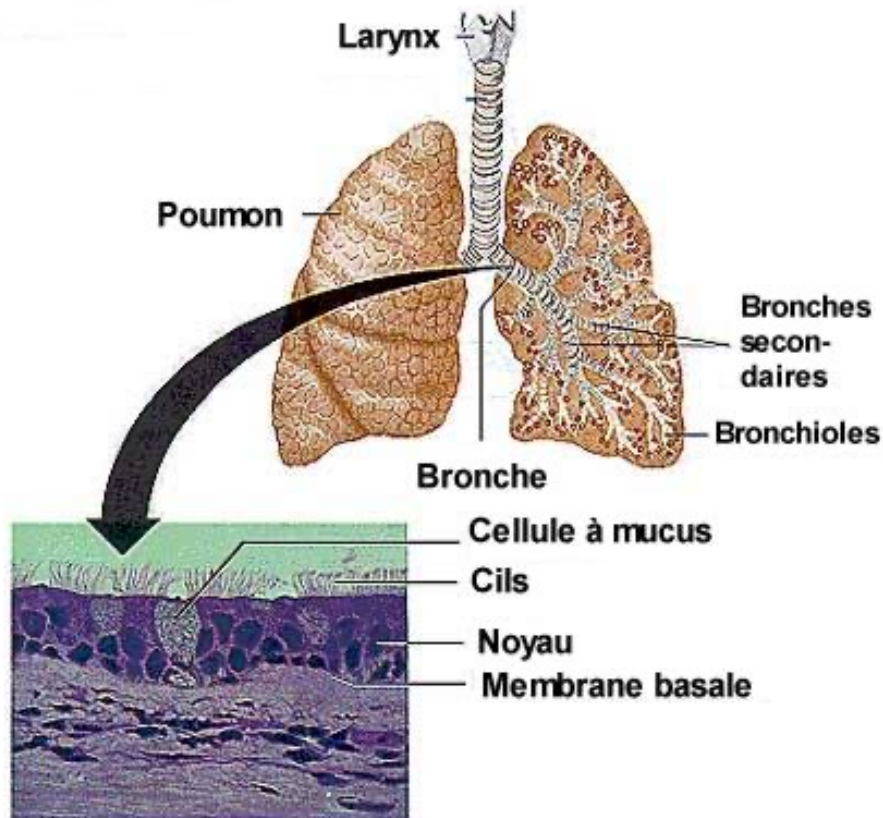


Cordes vocales

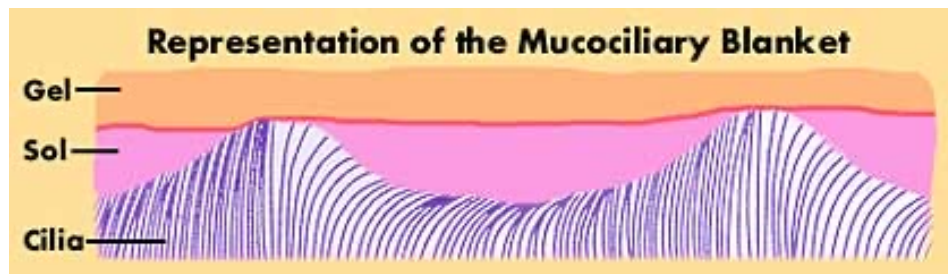
Anatomie de la trachée

- Conduit aérifère de 12 cm de long et 2,5 cm de diamètre.
- Constituée de 15 à 20 anneaux cartilagineux en fer à cheval et fermés par le muscle trachéal.
- Elle se termine dans le thorax par les 2 bronches souches D/G.
- Elle est tapissée par une muqueuse riche en cellules à mucus et en cils vibratiles : épuration de l'air et expectoration des corps étrangers.

Chap 1.2 – Echelle organique



Épithélium cilié des bronches et de la trachée



Bronches et bronchioles entourées de muscles lisses.

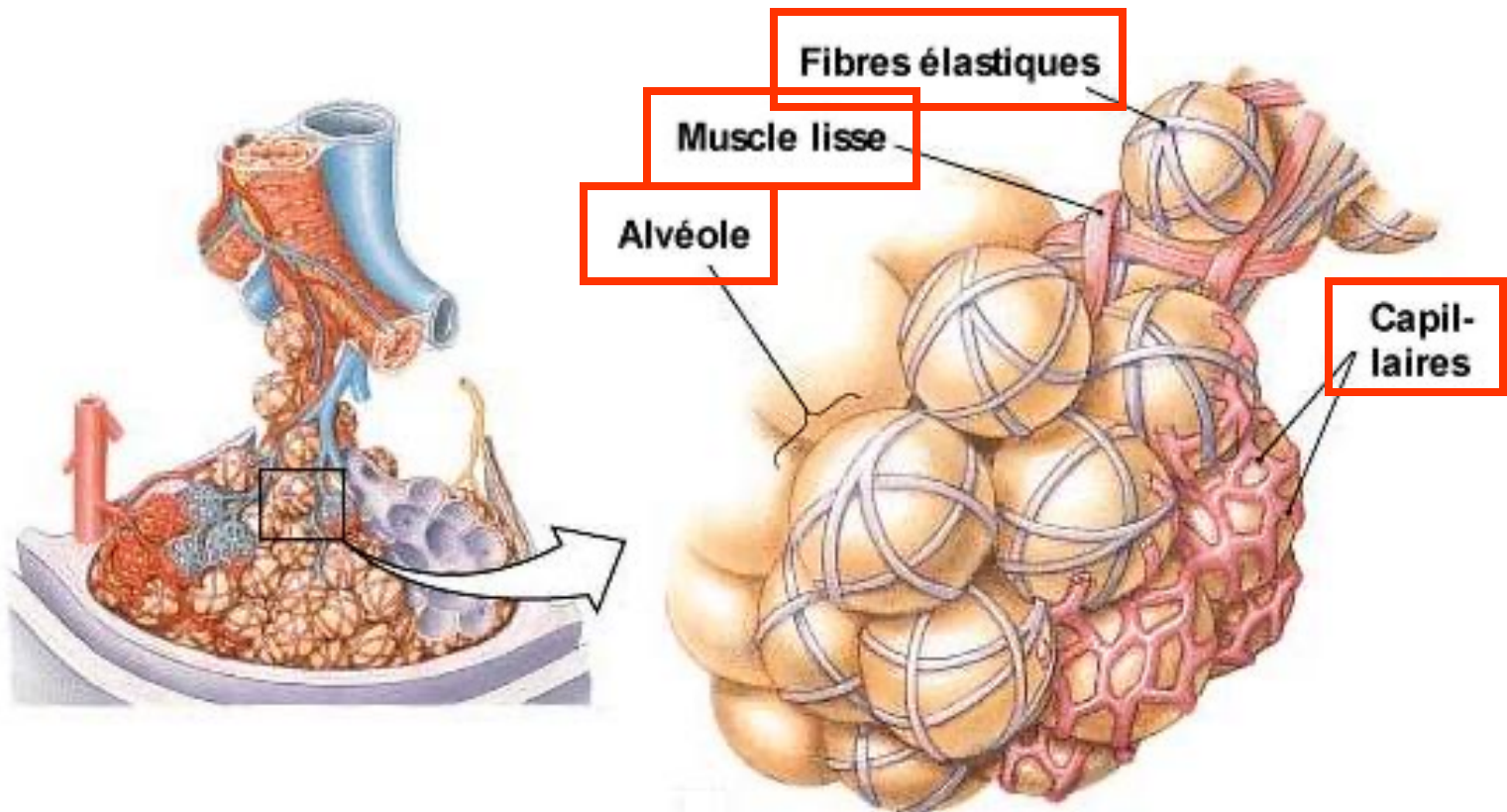
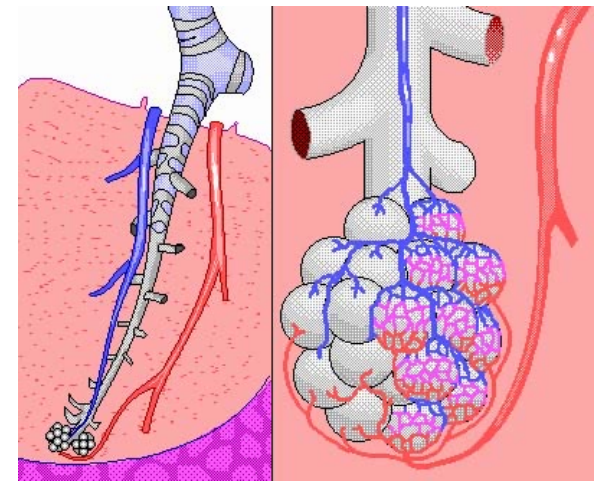
Les bronches

- Chaque bronche souche (D/G) se divise en diminuant de calibre :
 - Bronche lobaire (3 à droite et 2 à gauche),
 - Bronche segmentaire,
 - Bronche lobulaire,
 - Bronchioles.
- Les bronches sont constituées de muscle lisse sous la dépendance du Système Nerveux Végétatif

Chap 1.2 – Echelle organique

Bronchioles se terminent par des sacs alvéolaires = acinus

Surface totale ~ terrain de tennis



Contractilité bronchique

- A la surface du muscle lisse bronchique se trouvent des récepteurs du système sympathique / parasympathique : $\alpha 1$ et $\beta 2$.
- La stimulation des récepteurs $\beta 2$ par l'**adrénaline** (messager du système sympathique) entraîne une **bronchodilatation**.
- La stimulation des récepteurs $\alpha 1$ par l'**acétylcholine** (messager du système parasympathique) entraîne une **bronchoconstriction**.
- ❖ Il existe des médicaments mimant l'action du système sympathique : $\beta 2$ -mimétiques (salbutamol).

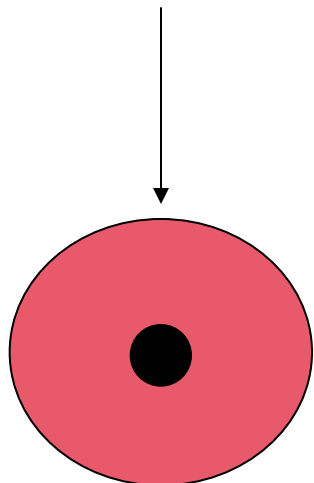
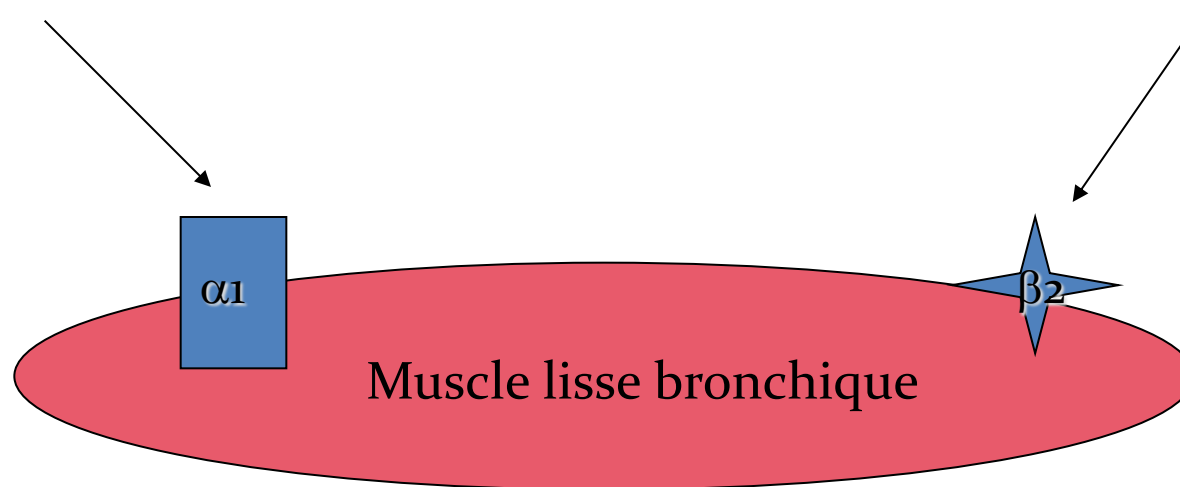
Chap 1.2 – Echelle organique

Système parasympathique

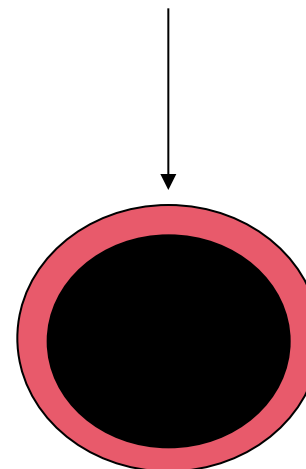
Système sympathique

Acétylcholine

Adrénaline



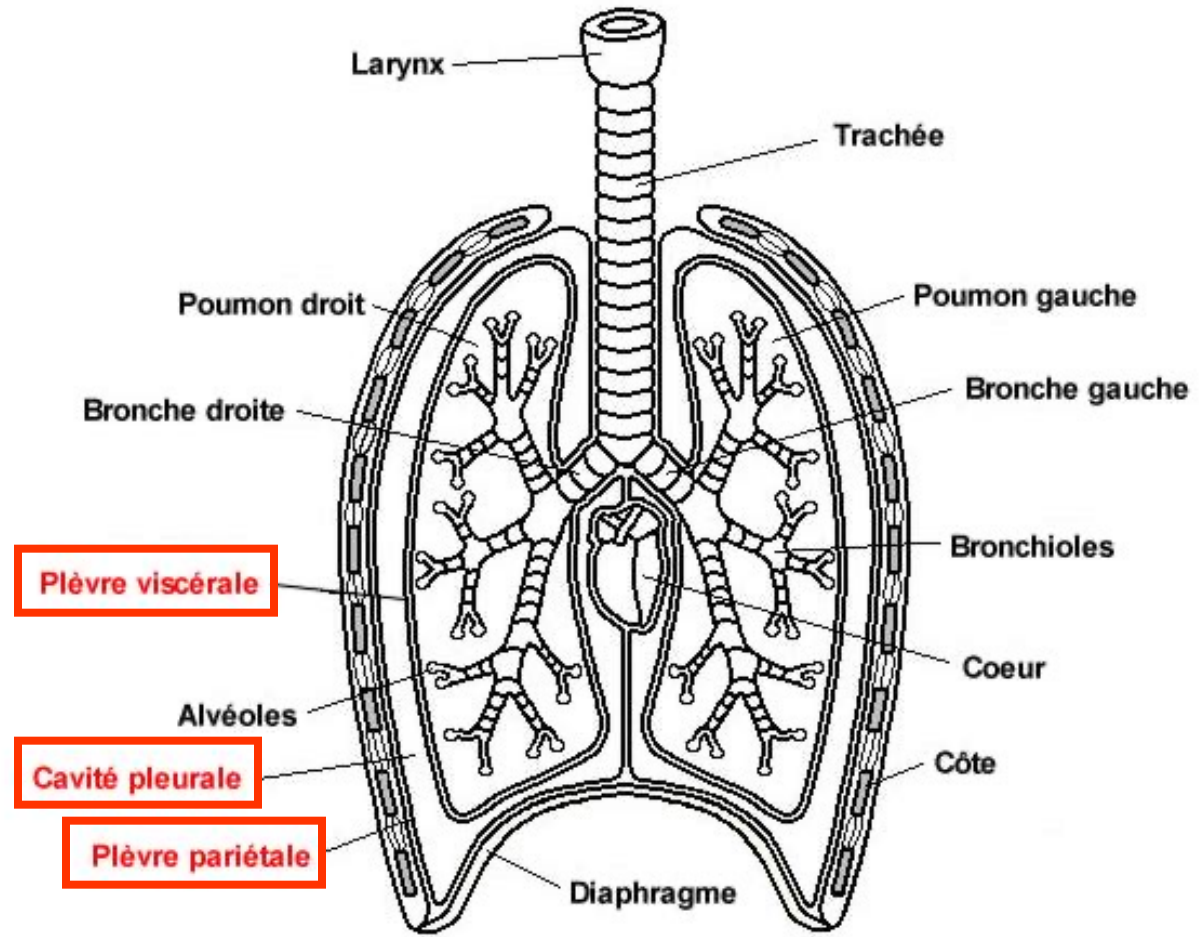
Bronchoconstriction



Bronchodilatation

Les poumons

- Situés dans le thorax (médiastin), de part et d'autre du cœur sous le grill costal
- Entouré par une séreuse :
la plèvre



Poumons

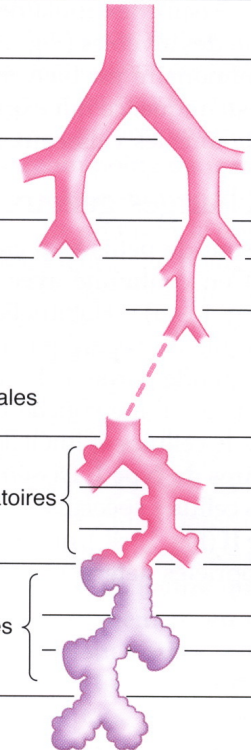
- Poumon D : 3 lobes séparés / 2 scissures
- Poumon G : 2 lobes séparés / 1 scissure
- 2 systèmes circulatoires :
 - Nutritif pulmonaire,
 - Fonctionnel : oxygénation du sang et évacuation du CO₂
- Entourés par une séreuse = la plèvre constituée de 2 feuillets :
 - Pariétal : enveloppant la cavité thoracique,
 - Viscéral : enveloppant le poumon

Entre les 2 = cavité pleurale tapissée par un film liquidien.

➤ Dans la cavité pleurale, règne une pression négative ($< P_{atm}$).

En résumé

	Nom des ramifications	Nombre de conduits par ramification
Zone de conduction	Trachée	1
	Bronches	2
		4
		8
	Bronchioles	16
	Bronchioles terminales	32 ↓ 6×10^4
Zone respiratoire	Bronchioles respiratoires	↓ 5×10^5
	Conduits alvéolaires	↓
	Sacs alvéolaires	8×10^6

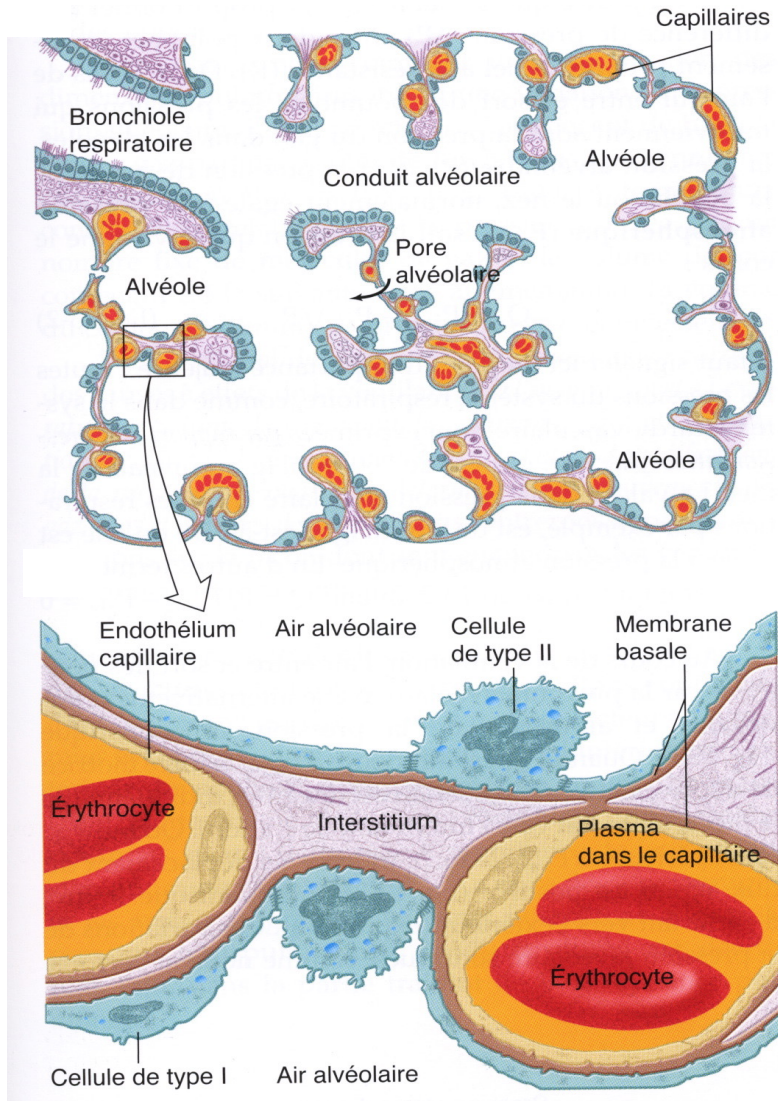


Fonctions de la zone de conduction des voies aériennes

1. Constitue une voie de faible résistance pour l'écoulement de l'air; sa résistance est régulée physiologiquement par des modifications de la contraction du muscle lisse des voies aériennes et par des forces physiques qui agissent sur les voies aériennes.
2. Constitue une barrière contre les microbes, les toxiques chimiques et toute substance ou corps étranger; cette fonction est assurée par les cils, le mucus et les macrophages.
3. Réchauffe et humidifie l'air inspiré.
4. Assure la phonation (cordes vocales).

Ramifications des voies aériennes. On n'a pas fait figurer l'asymétrie qui existe entre arbres bronchiques droit et gauche. Les diamètres des voies aériennes et des alvéoles ne sont pas à l'échelle.

Chap 1.2 – Echelle organique

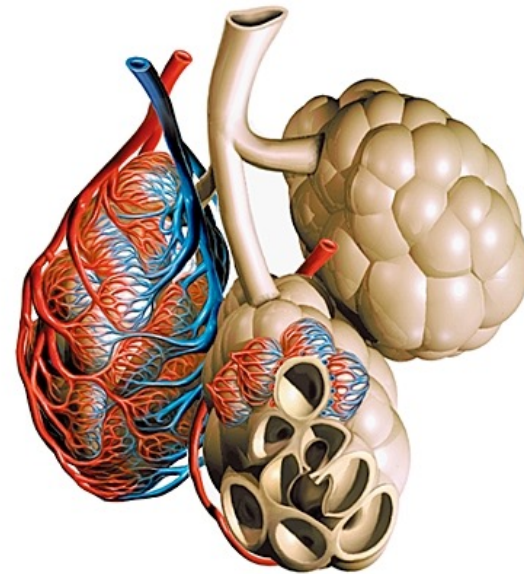


Coupe transversale d'une partie de la zone respiratoire

Site des échanges gazeux : les alvéoles

Ce sont de petits sacs creux dont les extrémités ouvertes sont en continuité avec les lumières des voies aériennes

La plus grande partie exposée à l'air est tapissée d'une couche continue de cellules alvéolaires (ou pneumocytes) de type I



Les alvéoles sont groupées par 5 ou 6 pour former un acinus pulmonaire desservi par une microbronchiole.

Chap 1.2 – Echelle organique

LE SURFACTANT

Disséminée entre les cellules, on trouve des cellules spécialisées appelées cellules alvéolaires de type II. Elles sécrètent une substance : le **surfactant**

Son rôle principal est de réduire la tension superficielle air/liquide créée par la fine couche de liquide se trouvant à la surface des alvéoles pulmonaires.

La réduction de la tension superficielle facilite l'expansion des alvéoles à l'inspiration et les maintient ouvertes pendant l'expiration (voir compliance pulmonaire).

Le surfactant joue en outre un rôle dans la perméabilité alvéolaire (effet anti-œdémateux) et dans les mécanismes de défenses contre les micro-organismes.

Chap 1.2 – Echelle organique

La compliance pulmonaire est la capacité du poumon à modifier son volume en réponse à une variation de pression.

Elle peut entre autre s'exprimer en L/Pa, ml/mmHg, ml/cmH₂O. C'est l'inverse de l'élastance.

Elle caractérise la distensibilité : en effet, la compliance est d'autant plus haute que la pression nécessaire pour amener le poumon à un volume donné est modérée, selon la formule :

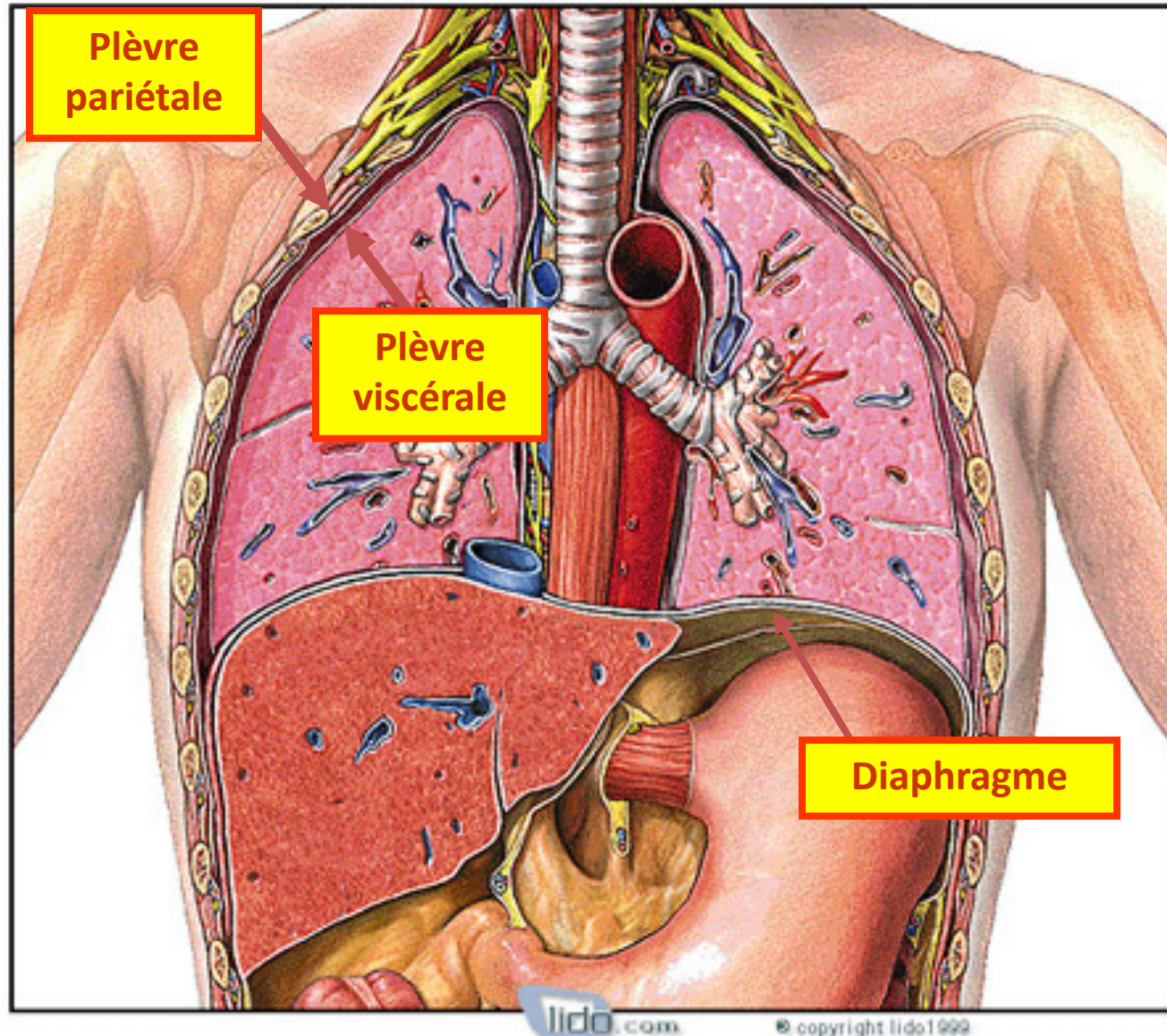
$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

La compliance pulmonaire n'est pas constante mais varie selon une courbe à double point d'inflexion. En effet, elle est faible lorsque le poumon est peu « gonflé » (atélectasie), grande lorsque le poumon est « normalement » gonflé, et de nouveau faible lorsque le poumon est surdistendu.

Rôles de la plèvre

- **Glissement** des 2 feuillets pleuraux grâce au liquide pleural
- **Maintien de la pression négative** dans le poumon de sorte que les alvéoles et les bronches restent ouvertes.
- Participation à la **défense des poumons** contre l'inflammation et les infections.

Chap 1.2 – Echelle organique



Muscles respiratoires

❖ **Muscles inspiratoires :**

- **le diaphragme** : 2 coupoles (D > G) à cause du foie, innervé par le nerf phrénique. Sa contraction entraîne :
 - abaissement des viscères abdominaux.
 - augmentation du volume de la cage thoracique.
 - L'ensemble des deux phénomènes crée une dépression intra-thoracique d'où appel d'air.
- **Muscles intercostaux externes** : en se contractant ils comblent les espaces intercostaux : **SternoCléidoMastoïdes** et **scalènes**.
 - Ces muscles interviennent essentiellement dans l'inspiration forcée.

Muscles respiratoires (suite)

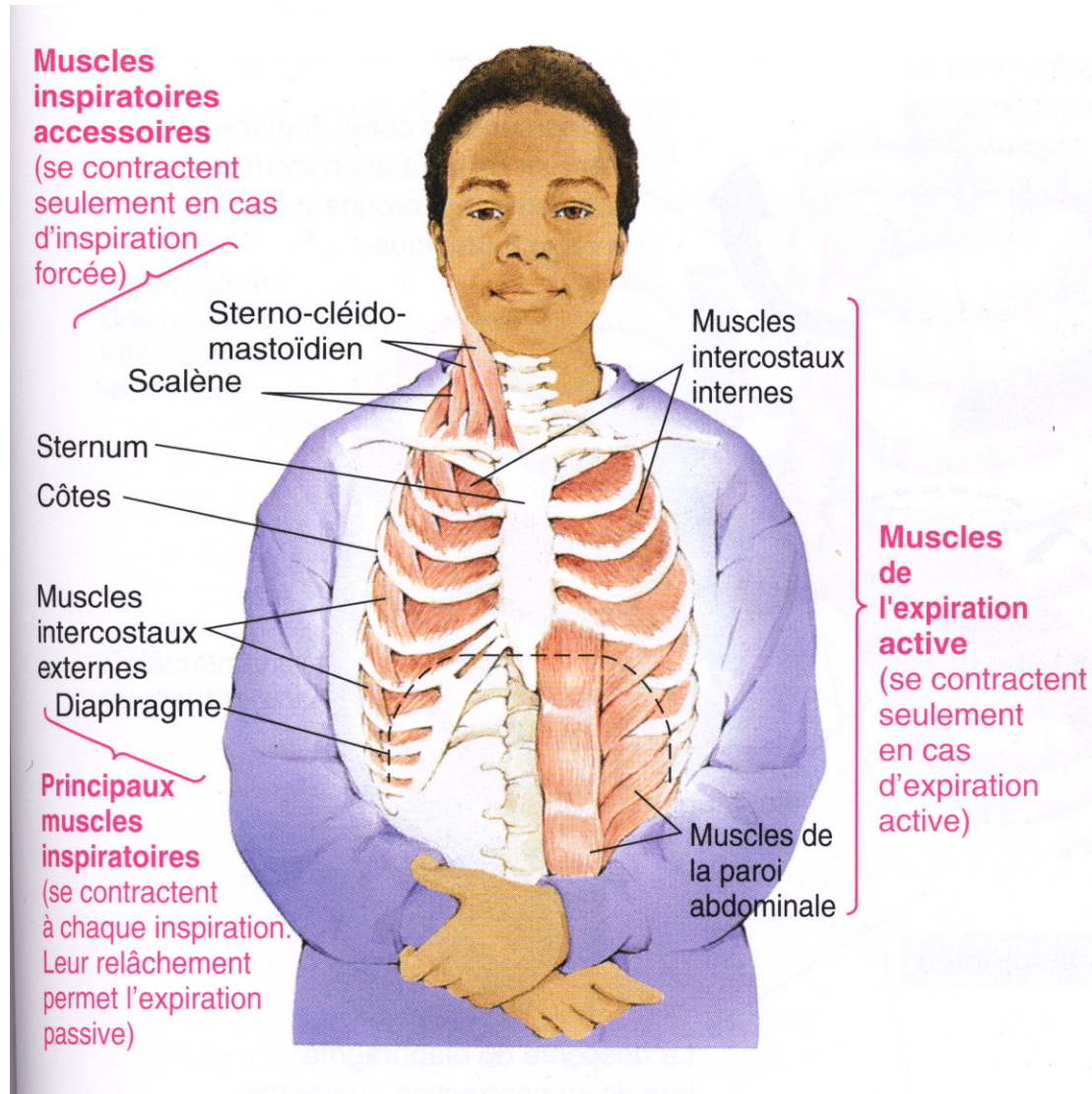
❖ **Muscles expiratoires :**

- Relâchement des muscles inspiratoires,
- Dans l'expiration forcée, contraction des muscles intercostaux externes.

❖ **Quelques constantes :**

- FR = 16/min
- Bradypnée : diminution de la FR
- Tachypnée / polypnée : augmentation de la FR
- Dyspnée : trouble du rythme respiratoire.

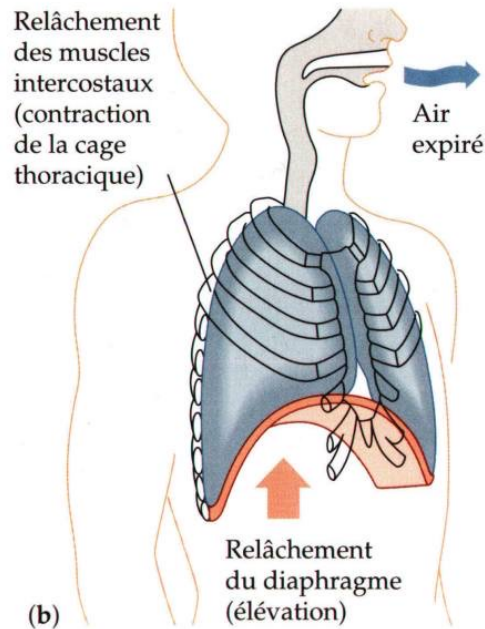
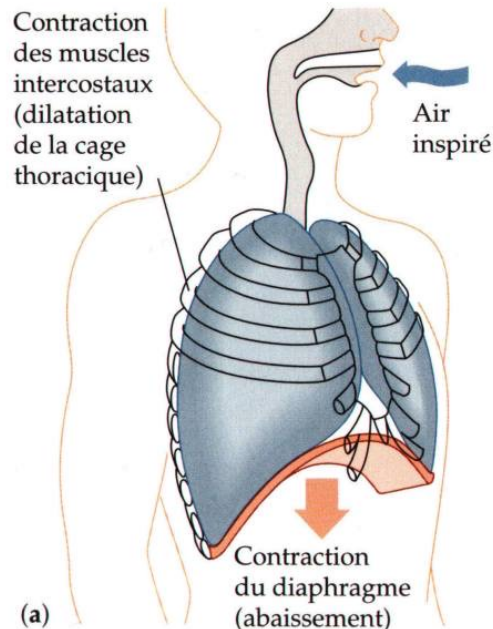
Muscles respiratoires (suite)



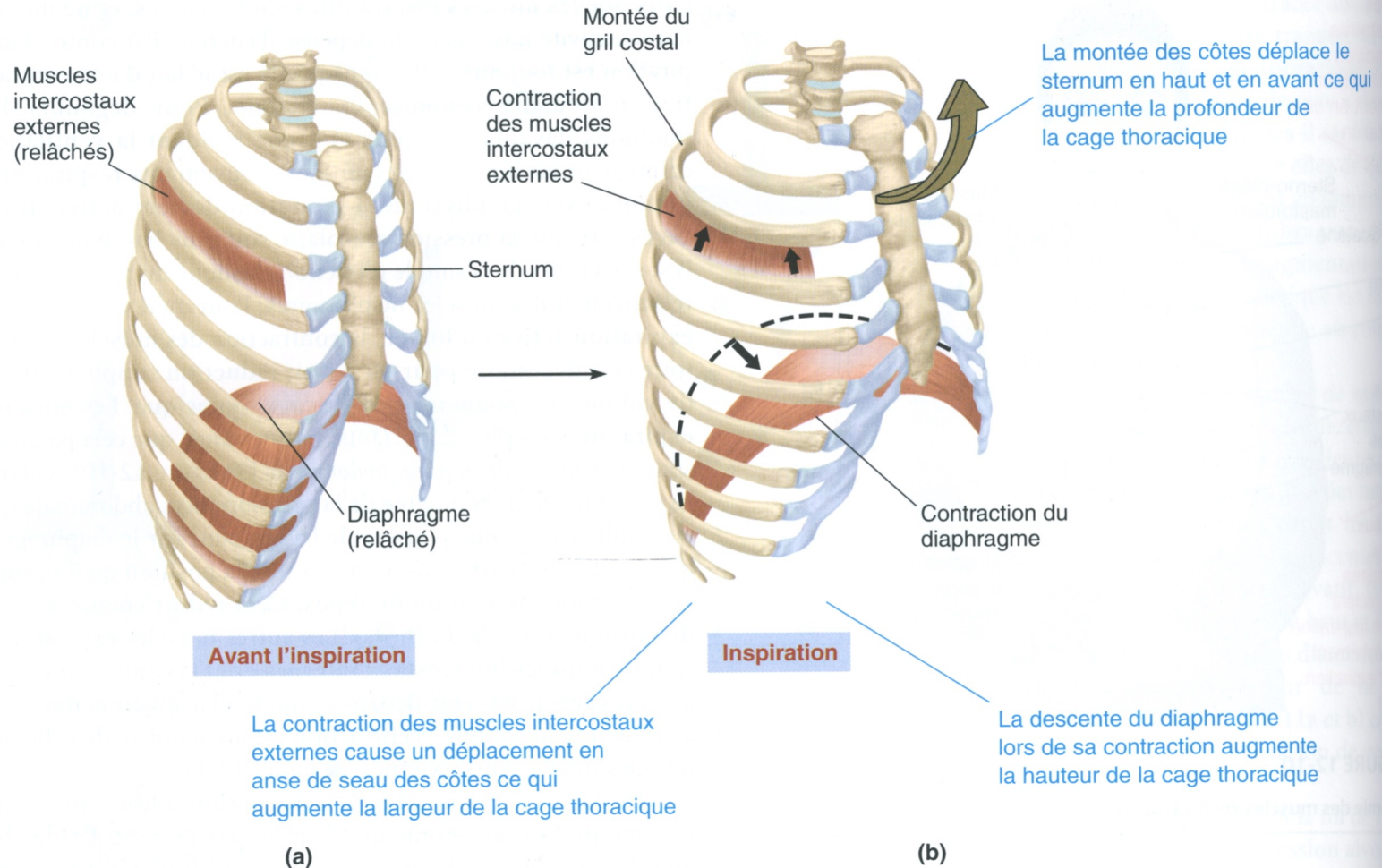
Mécanique ventilatoire

☐ Respiration = 2 temps :

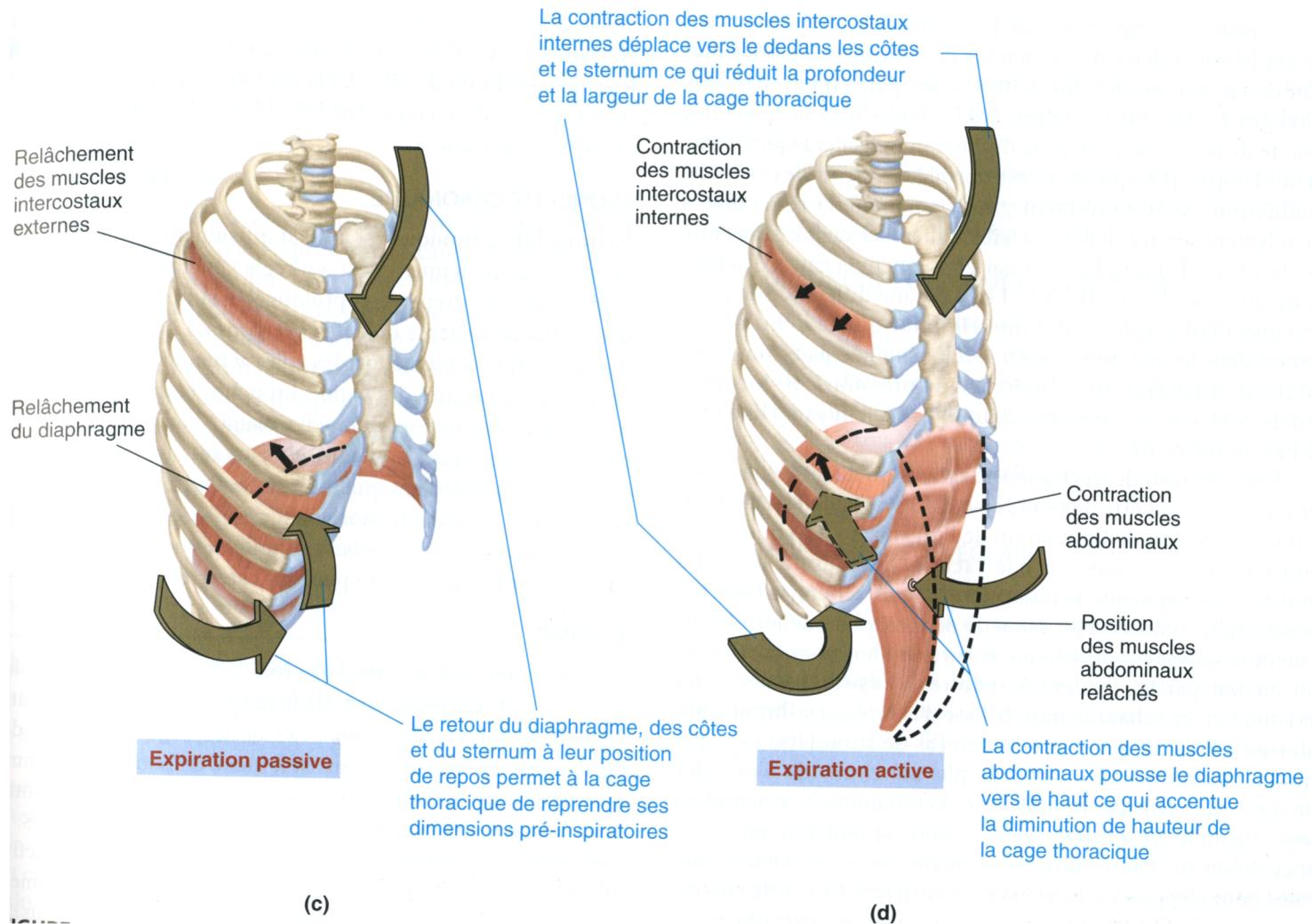
- **Inspiration (active)** : contraction des muscles intercostaux et abaissement du diaphragme,
- **Expiration (passive)** : relâchement des muscles intercostaux et élévation du diaphragme.



Mécanique ventilatoire



Mécanique ventilatoire



Chap 1.2 – Echelle organique

La ventilation est l'échange d'air entre l'atmosphère et les alvéoles.

On peut définir cet écoulement par l'équation suivante :

$$F = \Delta P / R$$
$$F = (P_{\text{atm}} - P_{\text{alv}}) / R$$

F = flux ou débit ($V\bullet$)

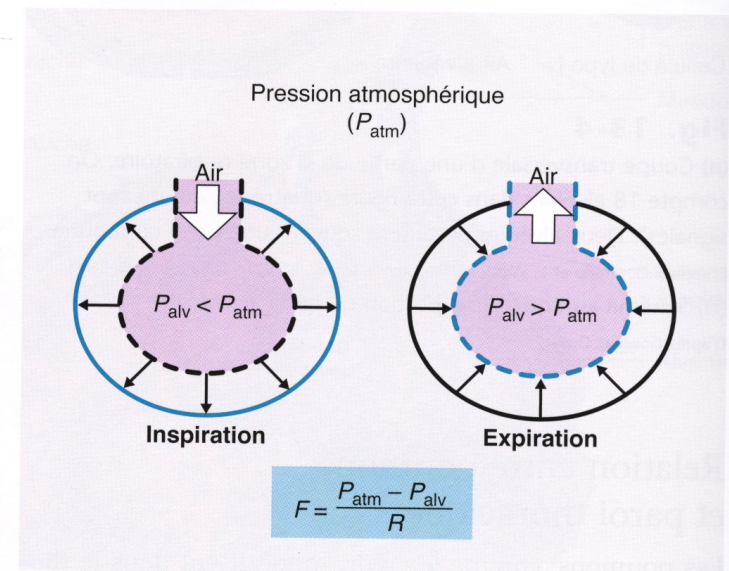
R = résistance des voies aériennes

ATTENTION :

Toutes les pressions du sys respi et cardio-vasc sont exprimées par rapport à la **$P_{\text{atm}} = 760\text{mm Hg}$**

Exemple : entre les respirations, la $P_{\text{alv}} = 0$ donc $= P_{\text{atm}}$

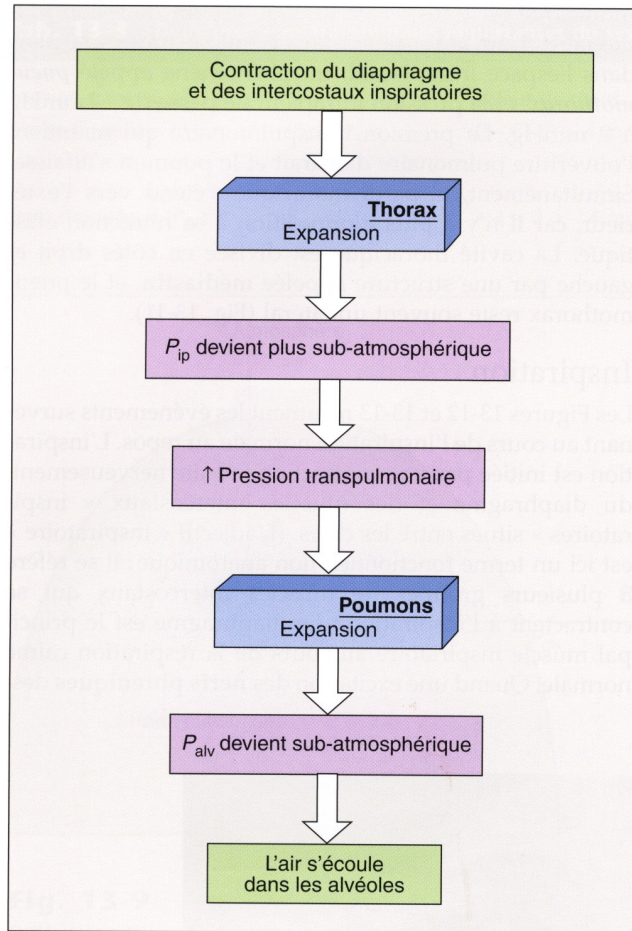
C'est à dire le débit $Q = 0$ car $P_{\text{atm}} = P_{\text{alv}}$



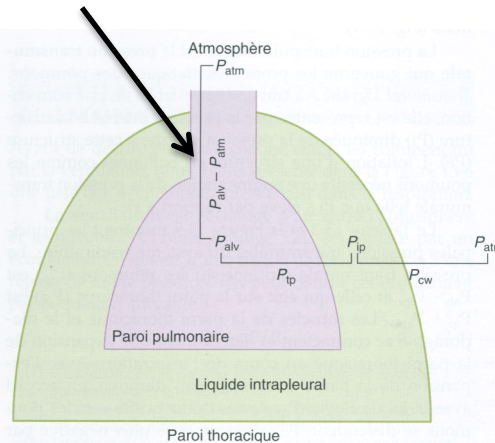
Relations nécessaires à la ventilation. Quand la pression alvéolaire (P_{alv}) est inférieure à la pression atmosphérique (P_{atm}), l'air entre dans les poumons. Le débit (Q) est directement proportionnel à la différence de pression et inversement proportionnel à la résistance des voies aériennes (R). Les lignes noires et bleues montrent la position des poumons respectivement au début et à la fin de l'inspiration ou de l'expiration.

Chap 1.2 – Echelle organique

INSPIRATION



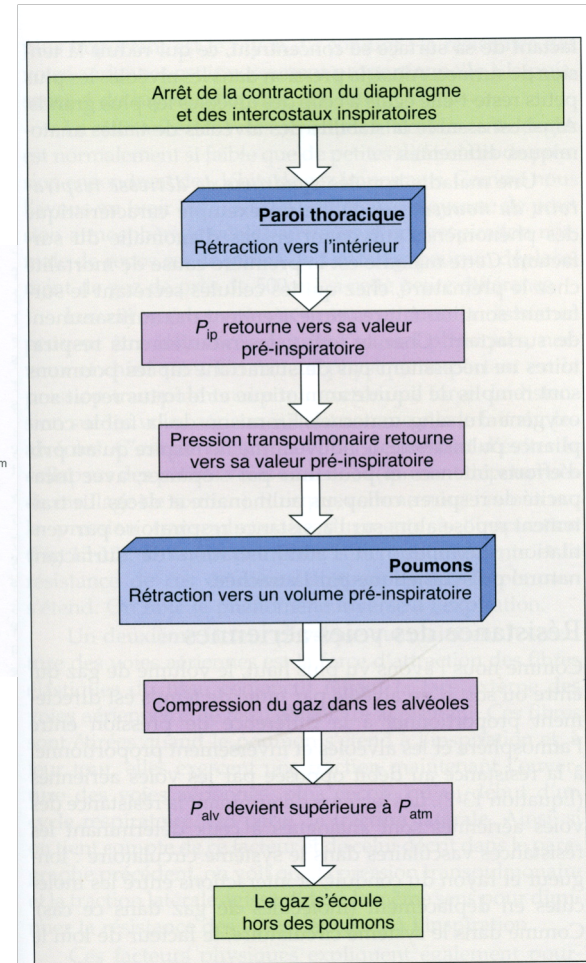
Pression moteur pour l'écoulement



P_{tp} : trans-pulmonaire
 P_{ip} : intra-pleurale

$$P_{tp} = P_{alv} - P_{ip}$$

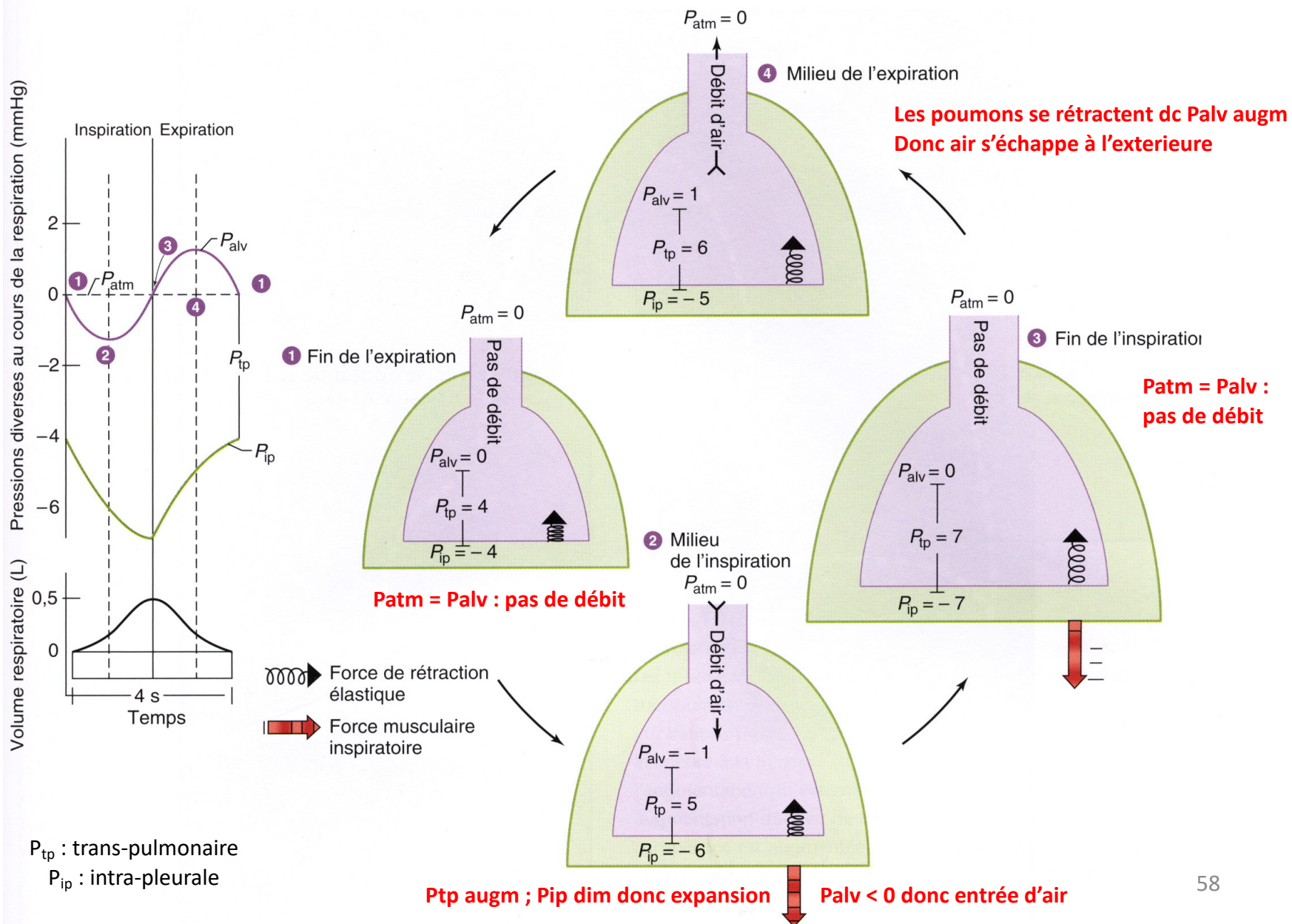
EXPIRATION



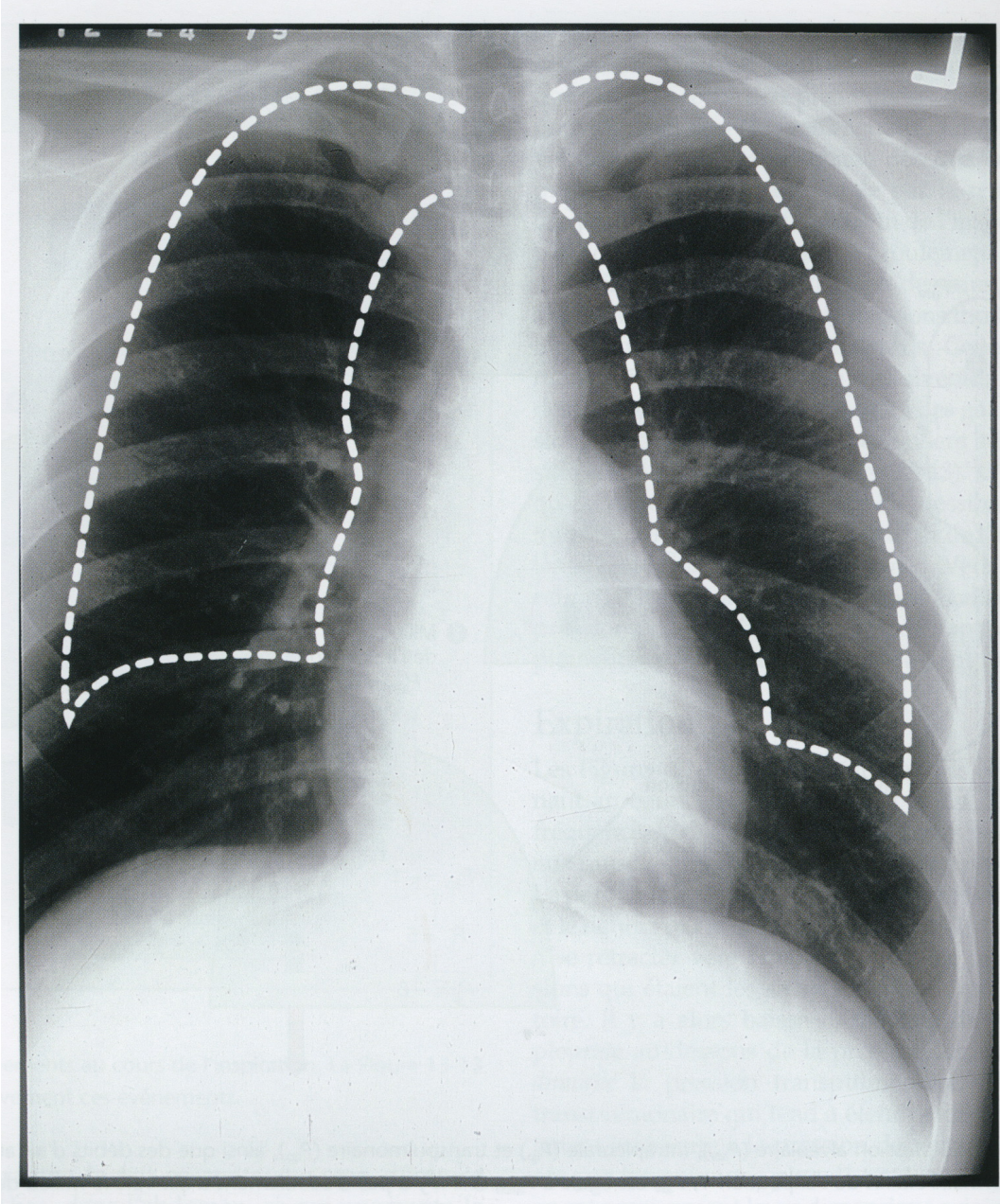
Séquence des événements au cours de l'inspiration et de l'expiration

Chap 1.2 – Echelle organique

Résumé des variations de pression



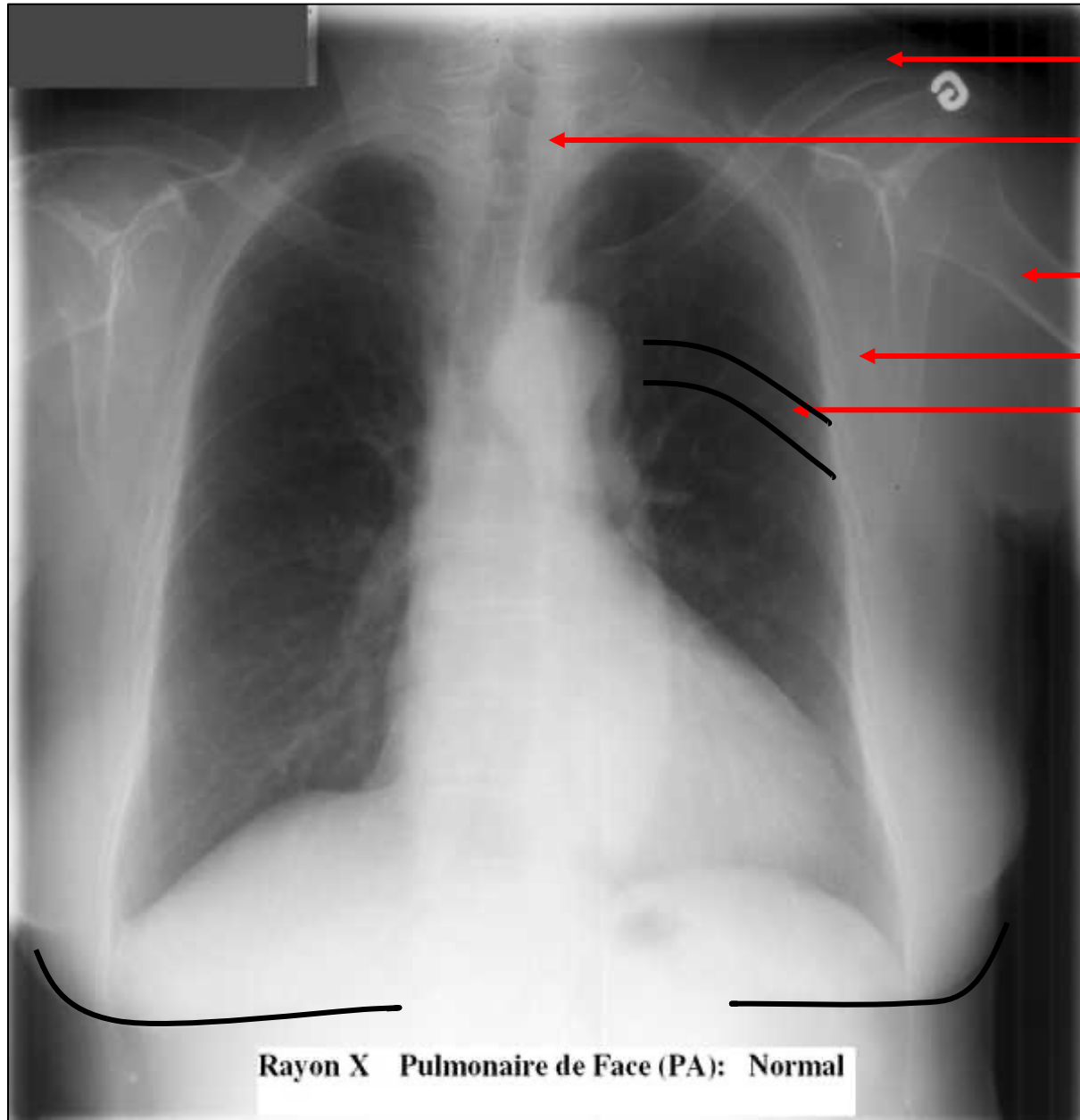
Chap 1.2 – Echelle organique



Radiographie du thorax à
inspiration complète

La ligne blanche pointillée
signale la bordure externe des
poumons à l'expiration

Le Contenant



Clavicule

Rachis cervical

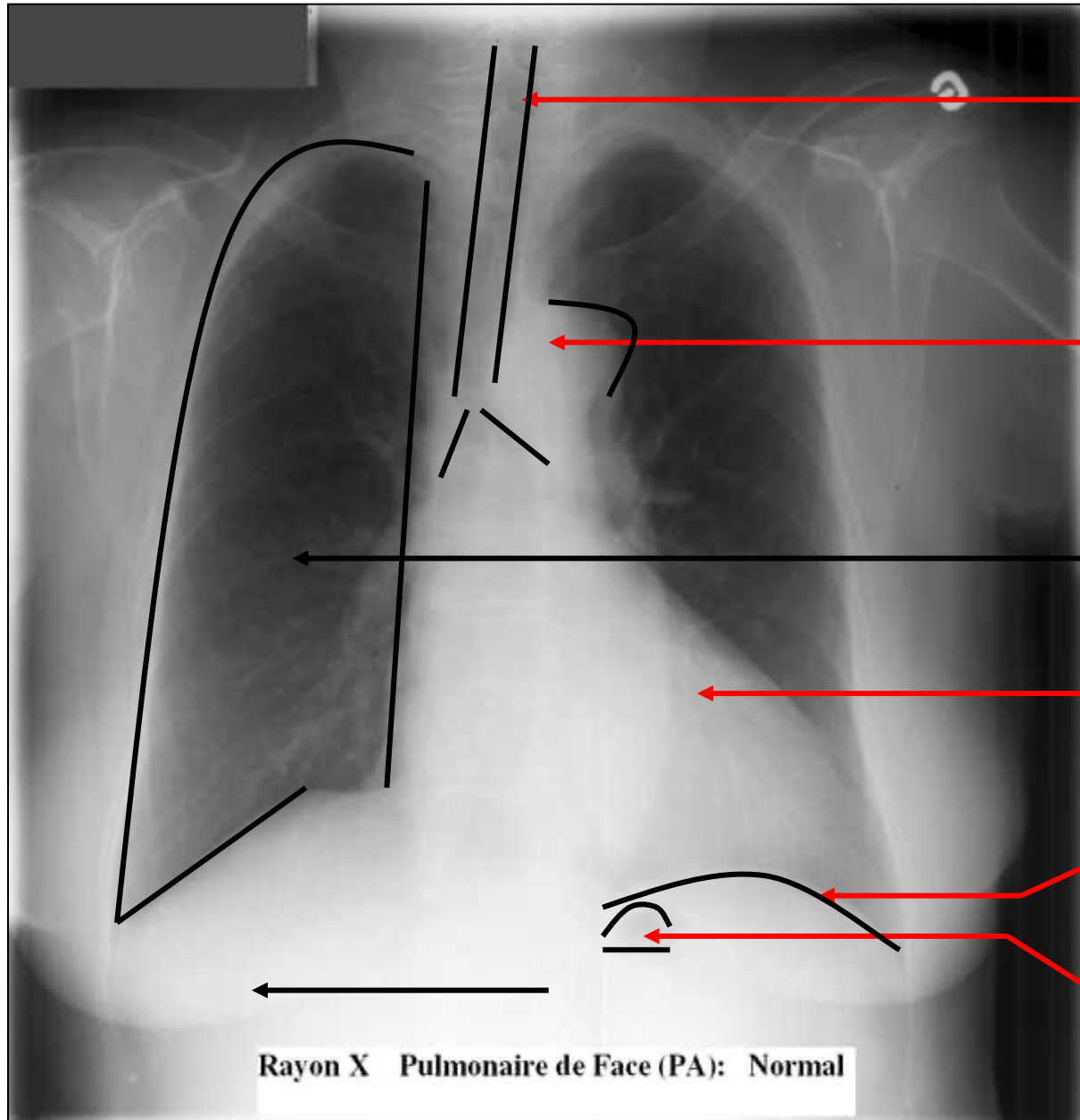
Humérus

Omoplate

Côtes

Rayon X Pulmonaire de Face (PA): Normal

Le Contenu



Trachée

Bouton aortique

Parenchyme
pulmonaire

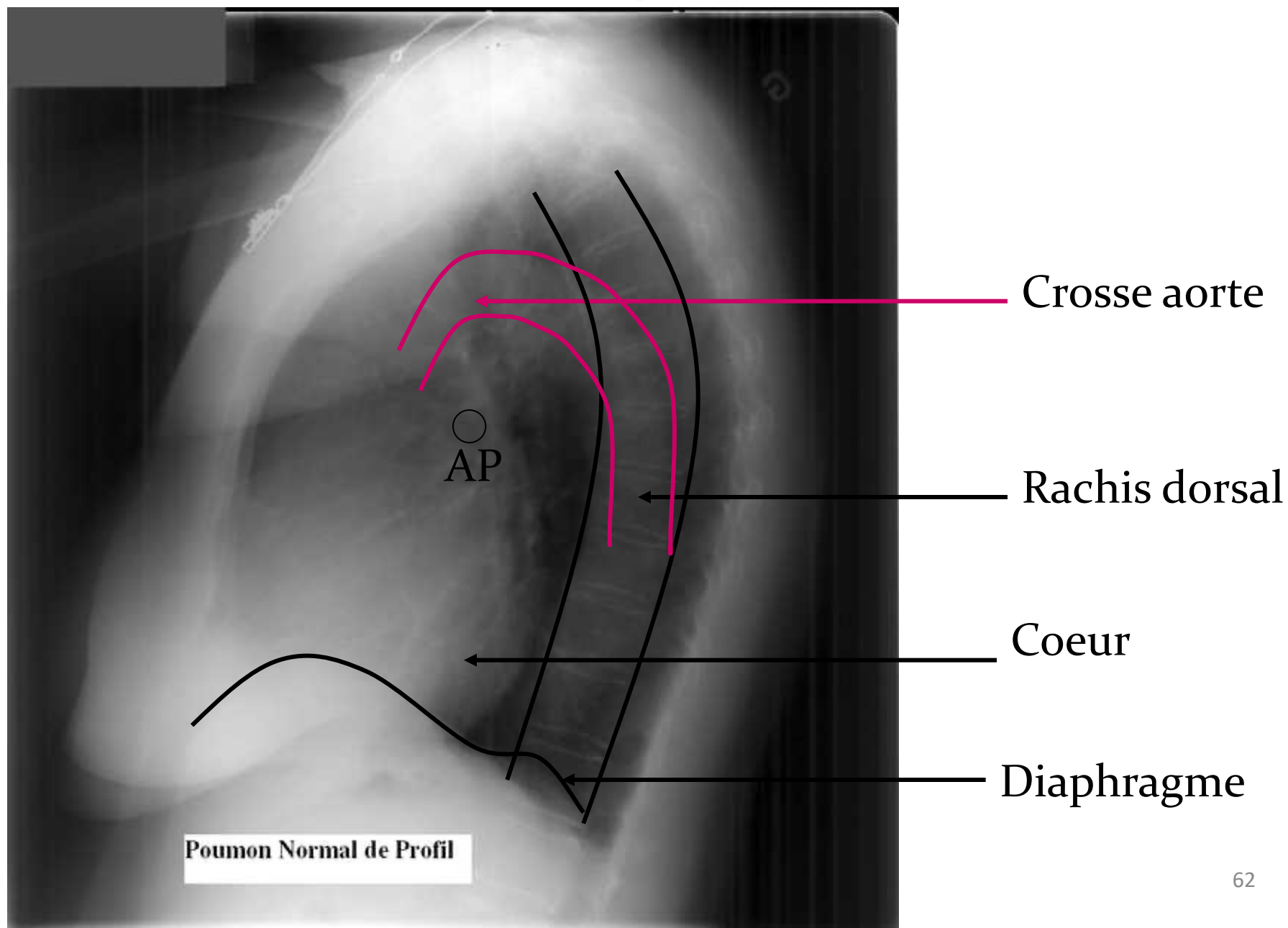
Coeur

Coupole
diaphragmatique

Poche à air
gastrique

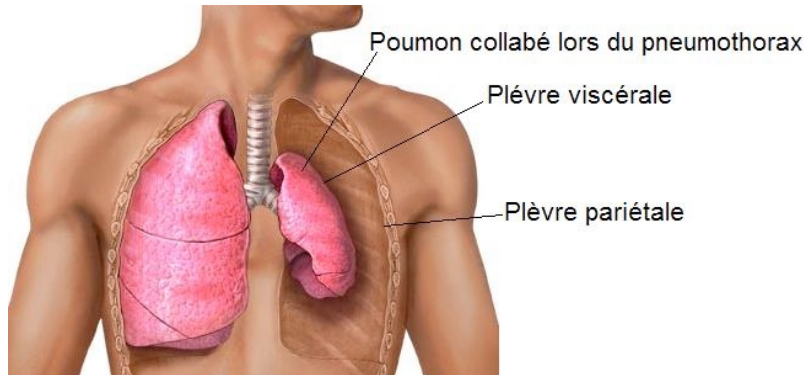
Rayon X Pulmonaire de Face (PA): Normal

De profil



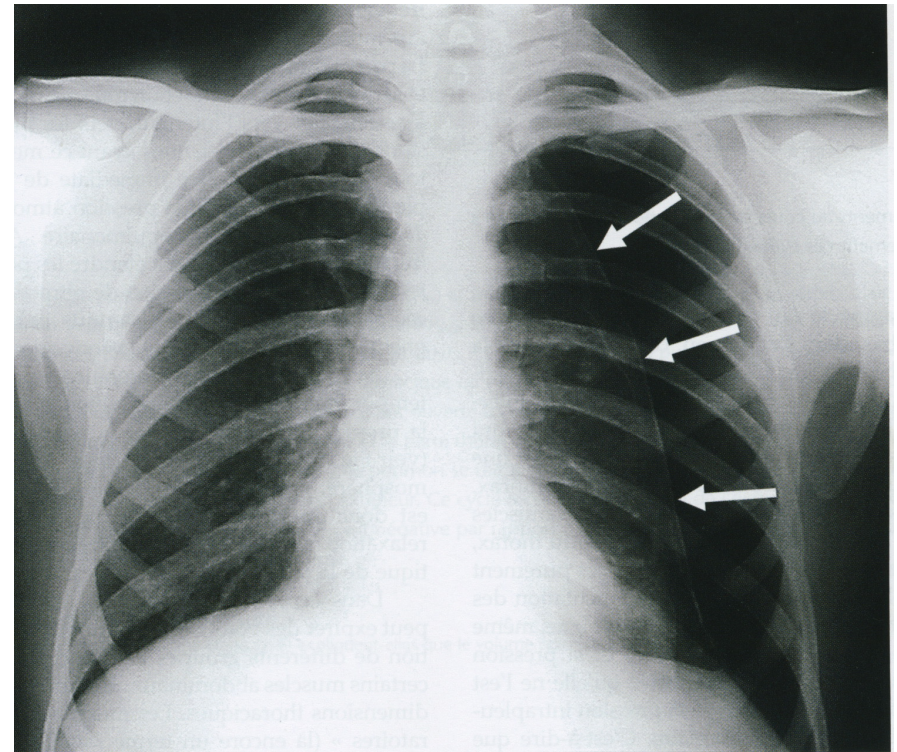
Chap 1.2 – Echelle organique

PHYSIOPATHOLOGIE : pneumothorax



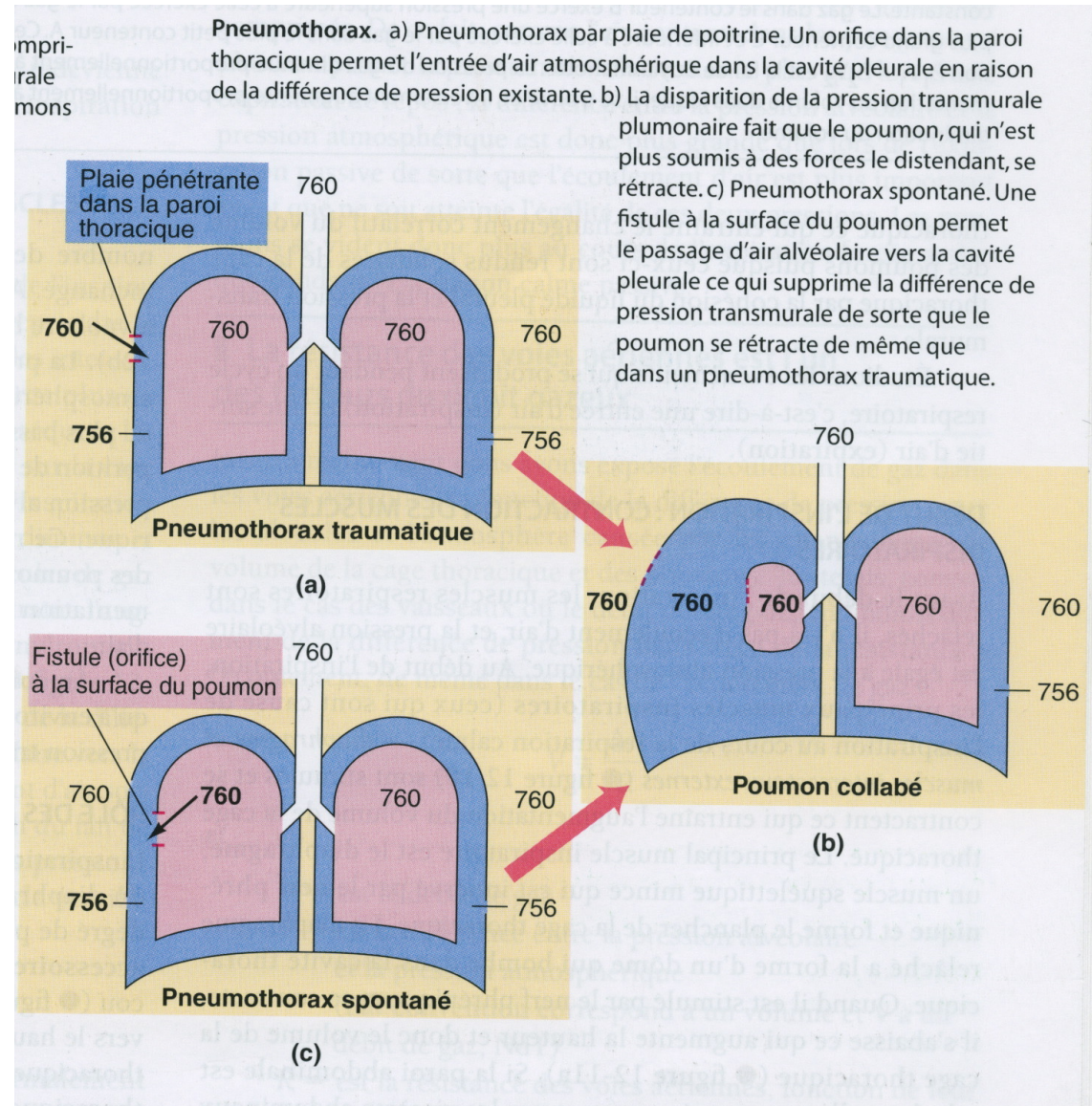
En temps normal, le poumon adhère à la paroi thoracique par l'existence d'une P° négative entre les deux feuillets de la plèvre

Suite à l'irruption d'air dans l'espace pleural, le poumon se trouve décollé de la paroi et rétracté dans le thorax.



Pneumothorax dû à un traumatisme (accident).
Les flèches soulignent la bordure du poumon gauche collabé.

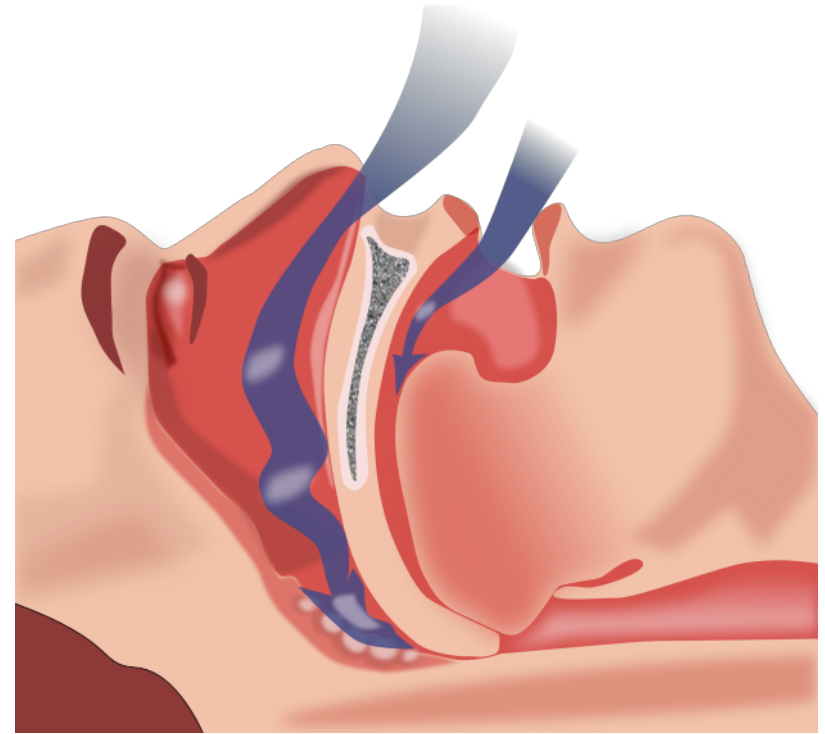
PHYSIOPATHOLOGIE : pneumothorax



PHYSIOPATHOLOGIE : apnée du sommeil

Le syndrome d'apnées du sommeil (« SAS ») ou plus précisément syndrome d'apnées-hypopnées du sommeil (« SAHS ») est un trouble du sommeil caractérisé par un arrêt du flux respiratoire (apnée) ou une diminution de ce flux (hypopnée).

Une apnée est dite « obstructive » quand elle résulte d'efforts respiratoires pour lutter contre une obstruction des voies aériennes supérieures (nez, bouche, pharynx, larynx). Elles peuvent être aussi neurologiques, par anomalie du contrôle de la respiration et il n'y a donc alors pas d'effort d'inspiration comme dans le cas précédent. On parle de « syndrome d'apnées centrales du sommeil » (« SACS »).



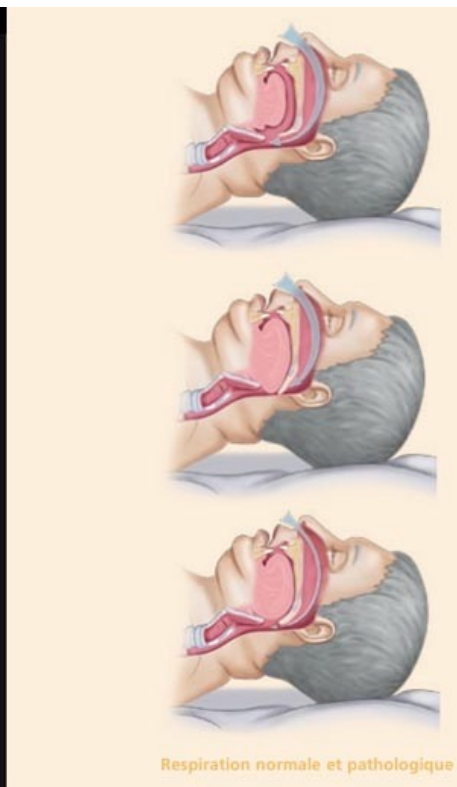
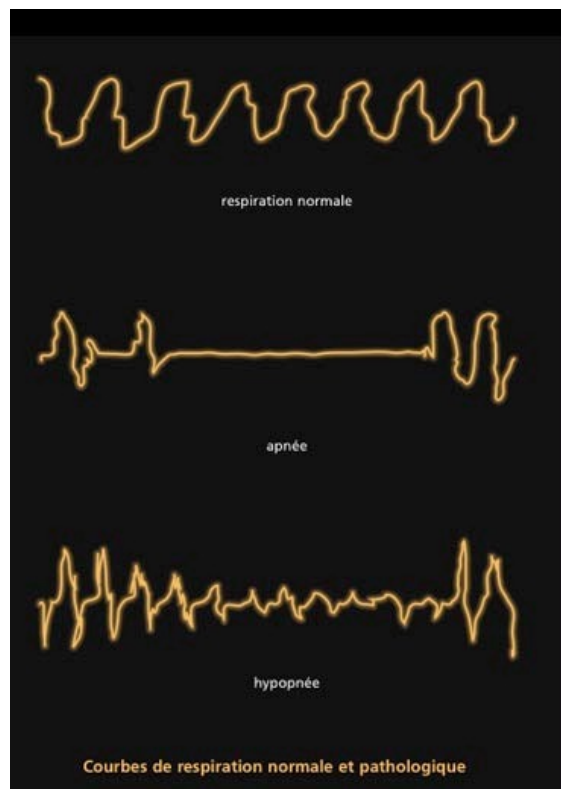
PHYSIOPATHOLOGIE : apnée du sommeil

L'apnée est définie par une interruption du débit aérien de plus de 10 secondes.

Il n'existe aucun consensus de définition pour l'hypopnée.

Cette dernière est souvent associée, en polysomnographie, à des phases de désaturation en oxygène (diminution de 3 à 4 % de la saturation, voire plus pour les cas les plus graves), ces événements s'accompagnant d'un allègement du sommeil responsable de somnolence excessive.

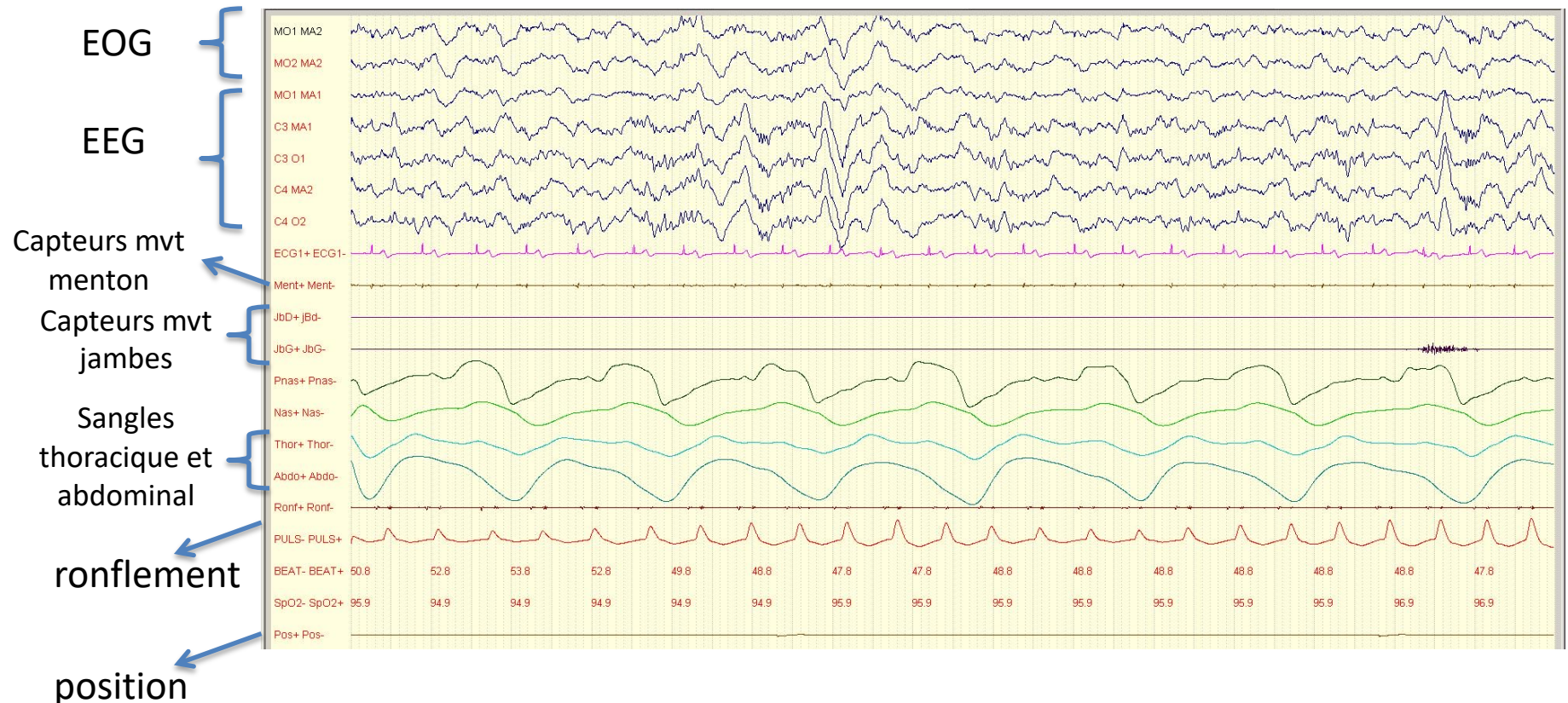
La mesure des efforts respiratoires permet de qualifier les apnées en séparant les apnées obstructives (avec efforts respiratoires), les centrales (sans effort) ou les mixtes.



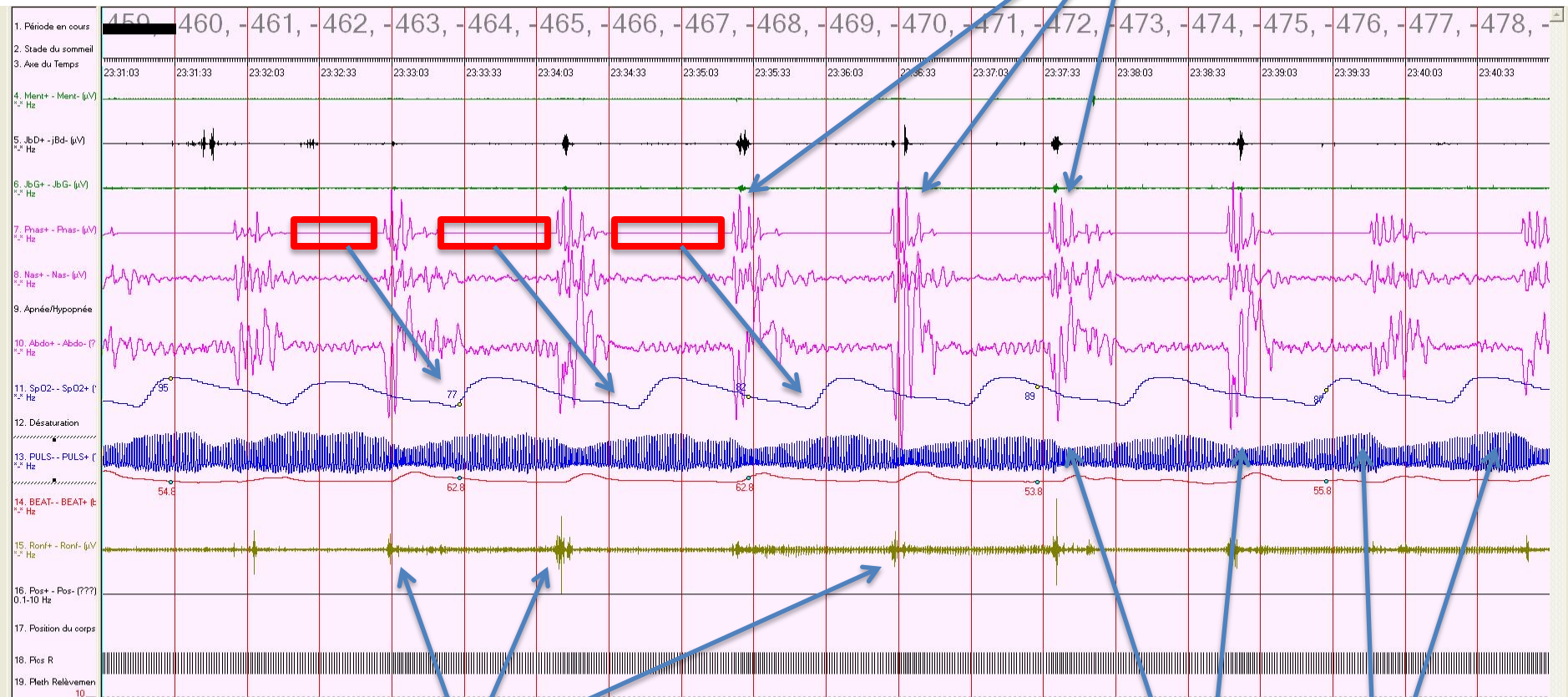
PHYSIOPATHOLOGIE : apnée du sommeil

Service de Neurologie, Hôpital Central, CHU de Nancy
Pr. H. Vespignani (chef de service), Dr. JL Schaff, Dr. J. Medina

Tracé polysomnographie : normal



Éch de temps : 10 minutes sont affichées.
 Succession d'apnée (cadres rouges) et reprise respiratoire



Ronflements/ Râles dus à la reprise respiratoire

PULS : succession de bradycardie / tachycardie
 (creux) (bosse)

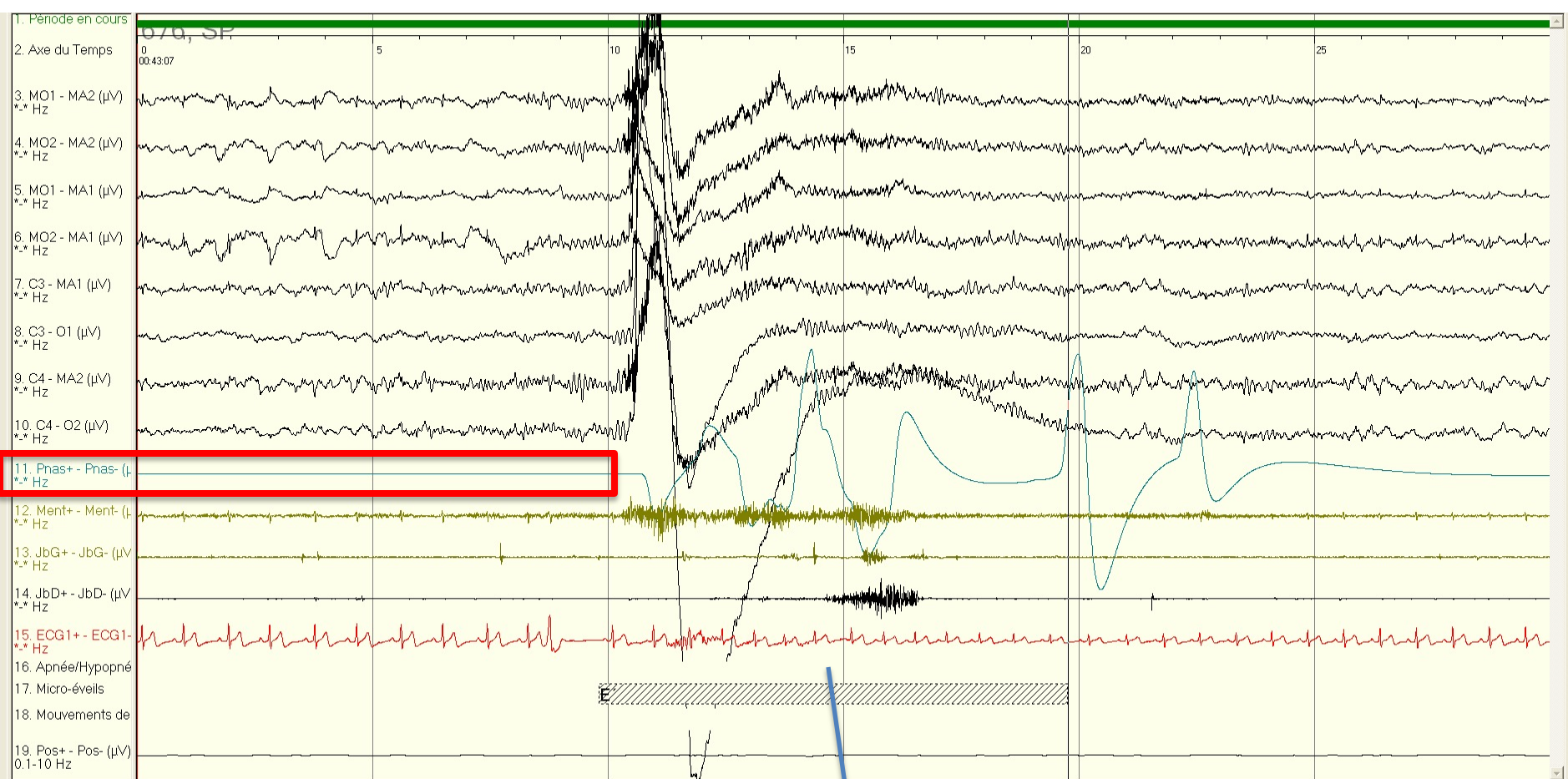
SpO2 : décroissance pendant apnée ; attention la décroissance est décalée par rapport à l'apnée car il faut du temps pour que la SpO2 sanguine diminue après une apnée (cf flèches)

Chap 1.2 – Echelle organique

Éveil lié à l'apnée

Mvt jambes et menton

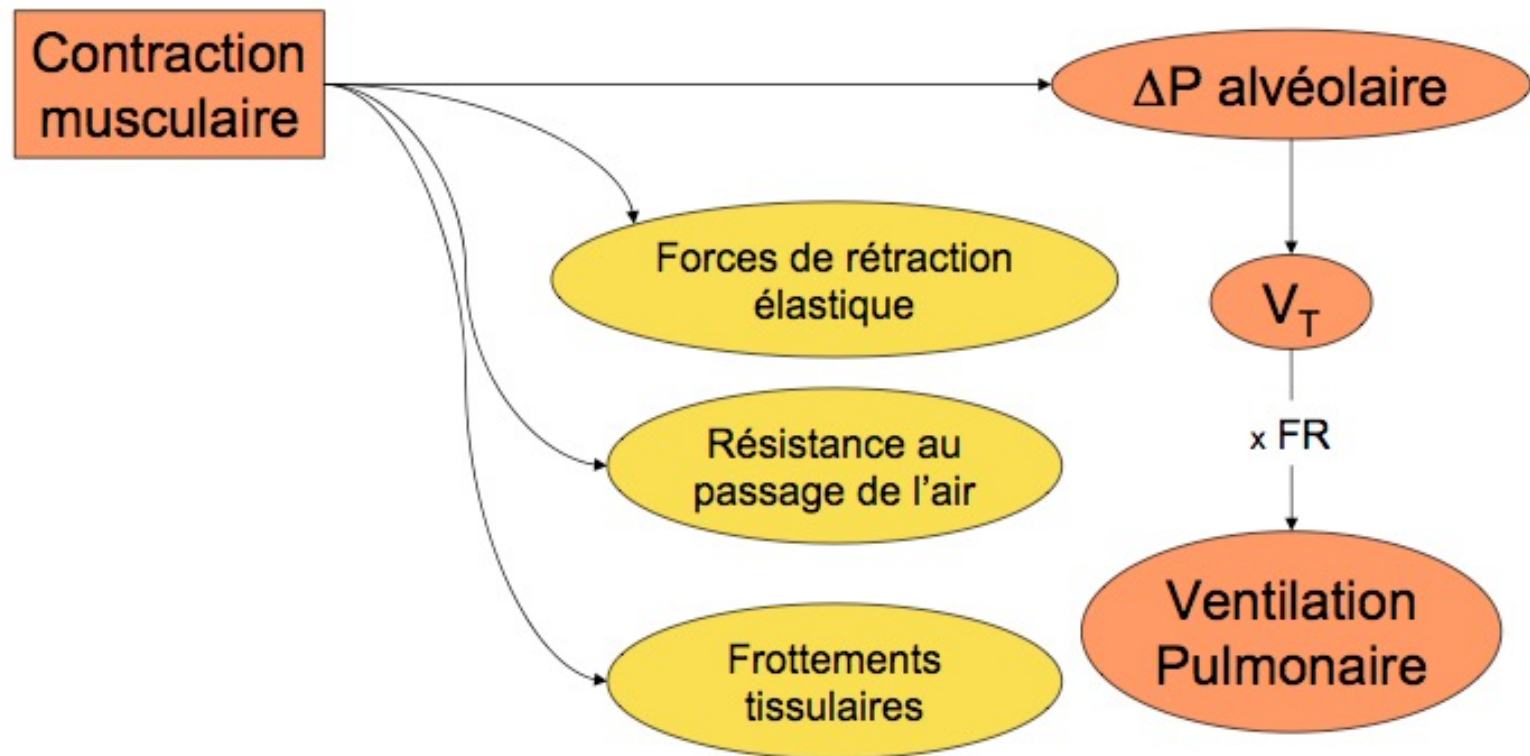
retour au sommeil



Apnée (cadre rouge)
Pnas = 0

tachycardie liée à l'apnée
trouble du rythme

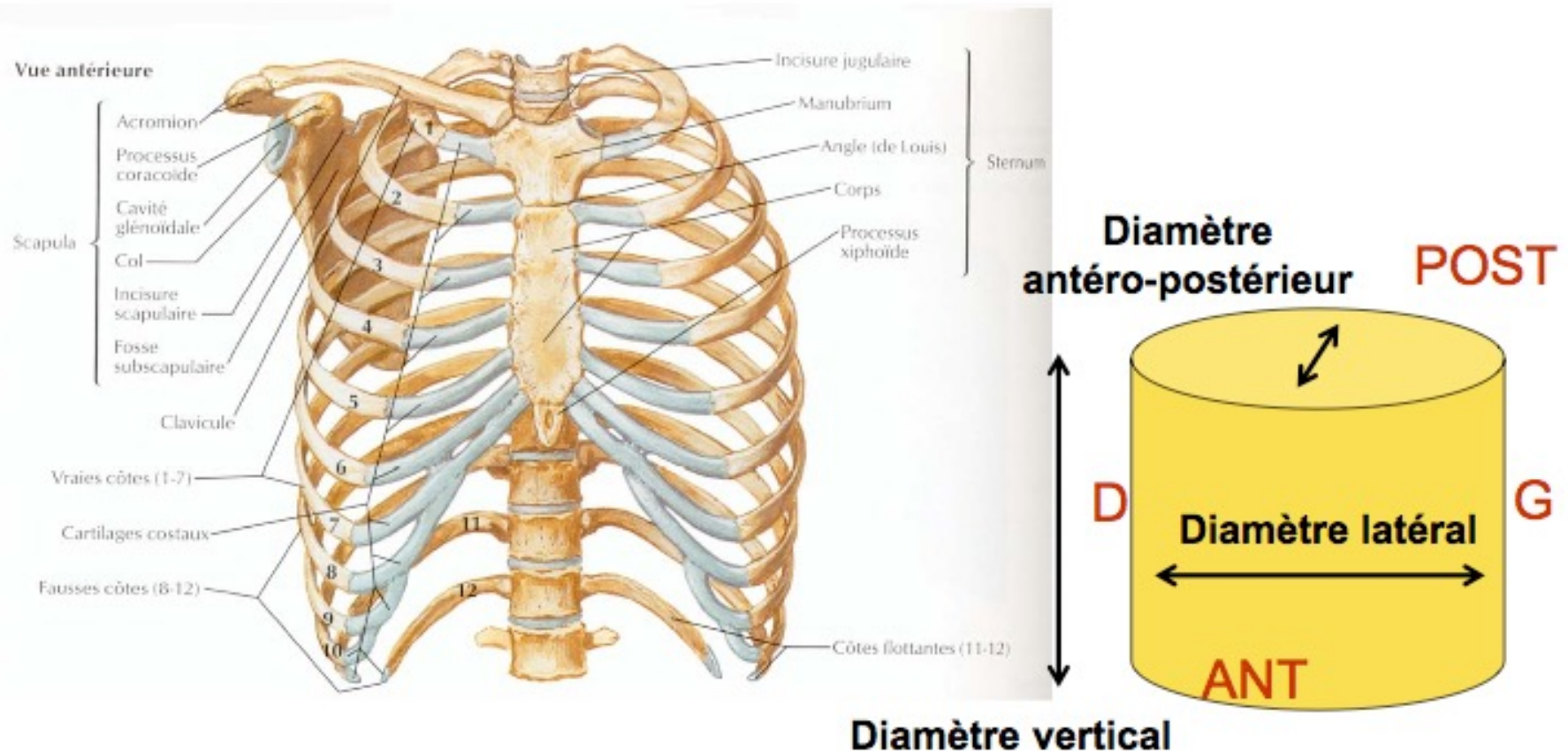
Mécanique ventilatoire



Mouvements respiratoires

- Respiration calme:
 - Mouvements périodiques, réguliers
 - Inspiration
 - Augmentation de tous les diamètres thoraciques
 - Déplacement antérieur de la paroi abdominale
 - Expiration
 - Retour à la position de base
- Hyperventilation:
 - Amplification de ces mouvements

Mouvements respiratoires



Mouvements respiratoires

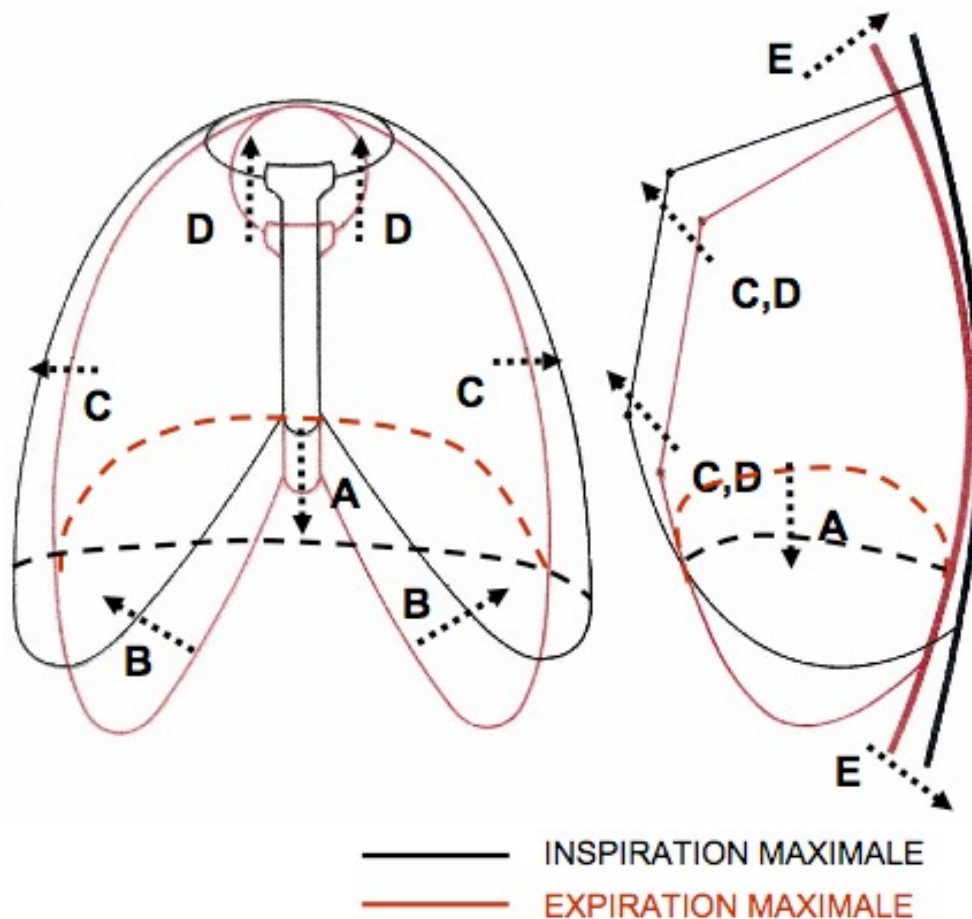
A: augmentation du diamètre vertical

B: élargissement de la base de la cage thoracique

C: augmentation du diamètre latéral

D: déplacement crânial du thorax

E: extension de la colonne vertébrale



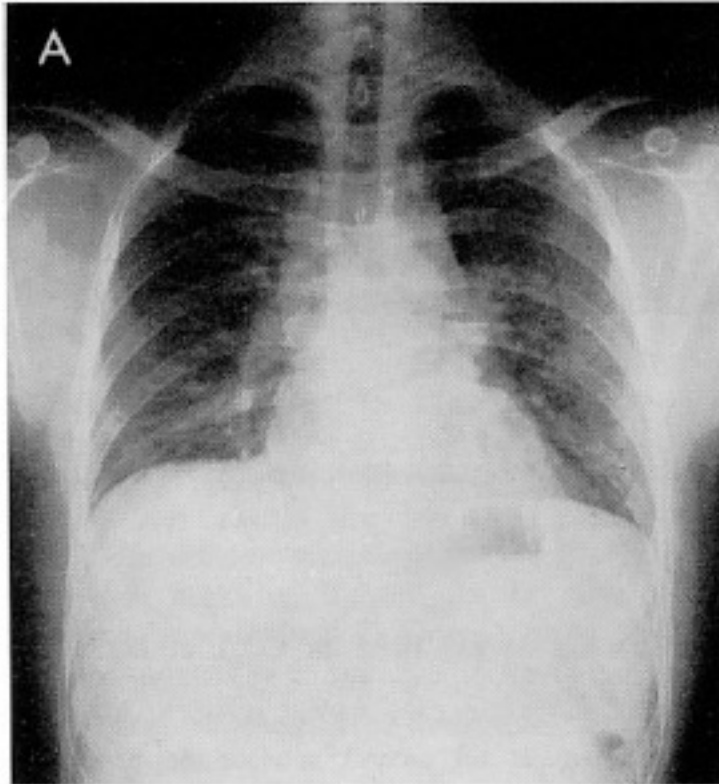
Mouvements respiratoires

- Amplitude **variable**
- Ventilation de **repos**
 - la circonférence au niveau de la xyphoïde augmente de ≈ 1 cm
 - le centre du diaphragme s'abaisse de 1 à 2 cm
 - surface $\approx 250 \text{ cm}^2 \rightarrow \Delta \text{Volume thoracique} \approx 375 \text{ cm}^3$
- Ventilation **maximale**
 - l'augmentation du diamètre antéro-postérieur est de $\approx 3,5$ cm
 - l'augmentation du diamètre latéral est de ≈ 3 cm
 - le diaphragme s'abaisse de ≈ 10 cm

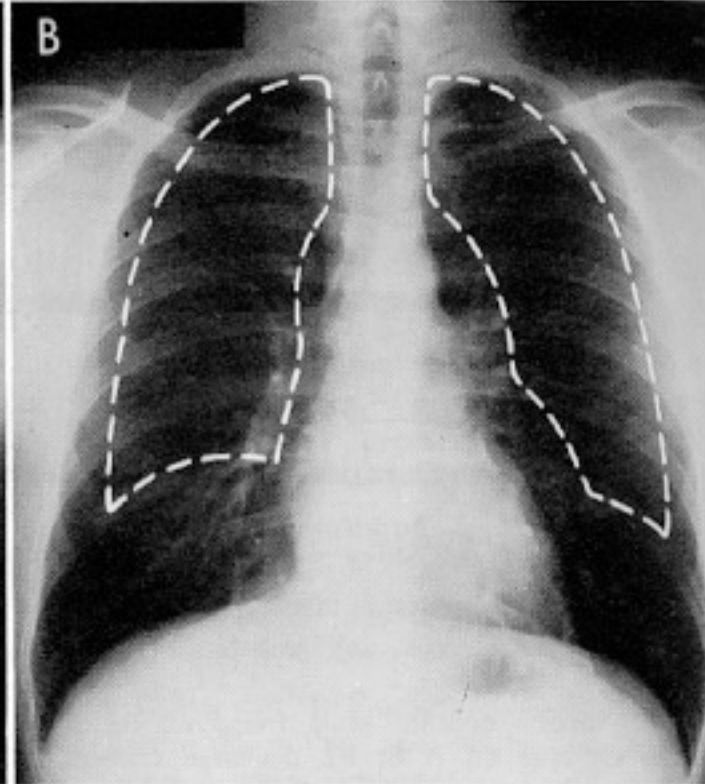
Mouvements respiratoires

- **Direction**
 - Inspiration normale
 - Expiration normale
 - Mouvements paradoxaux
- **Fréquence**
 - ↑ Tachypnée
 - ↓ Bradypnée
- **Amplitude**
 - Apnée
 - Hypopnée
- **Rythme**
 - Normal, soupirs
 - Respiration périodique et autres « patterns » anormaux
 - Respiration irrégulière

Mouvements respiratoires



Expiration forcée

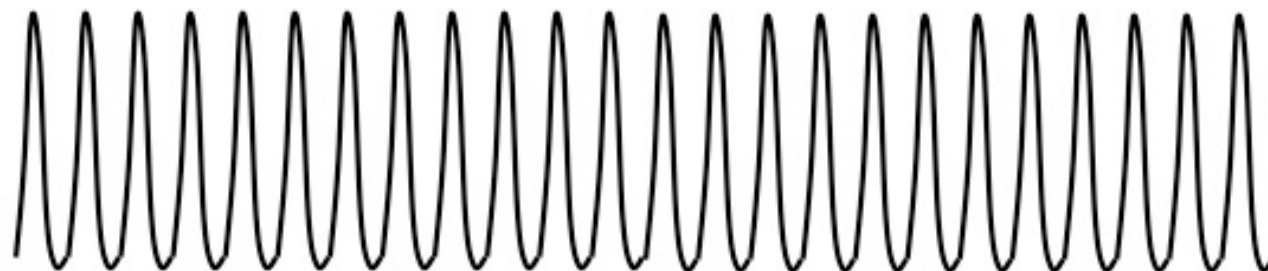


Inspiration forcée

Mouvements respiratoires



Rythme
normal
+ soupir



Tachypnée



Bradypnée
+ apnée

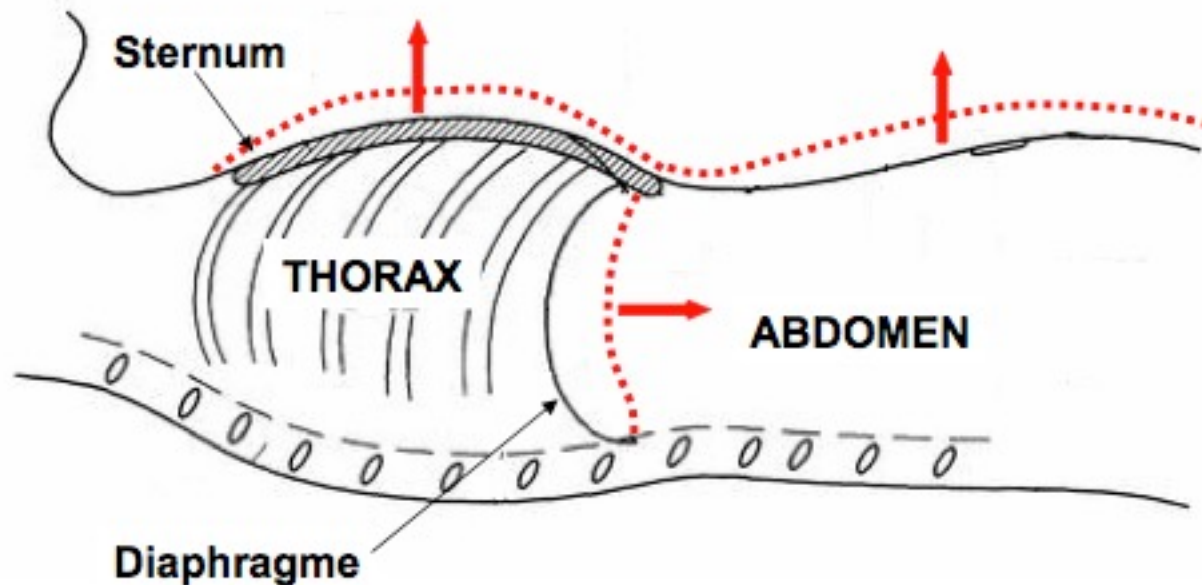


Respiration
périodique

Mouvements respiratoires

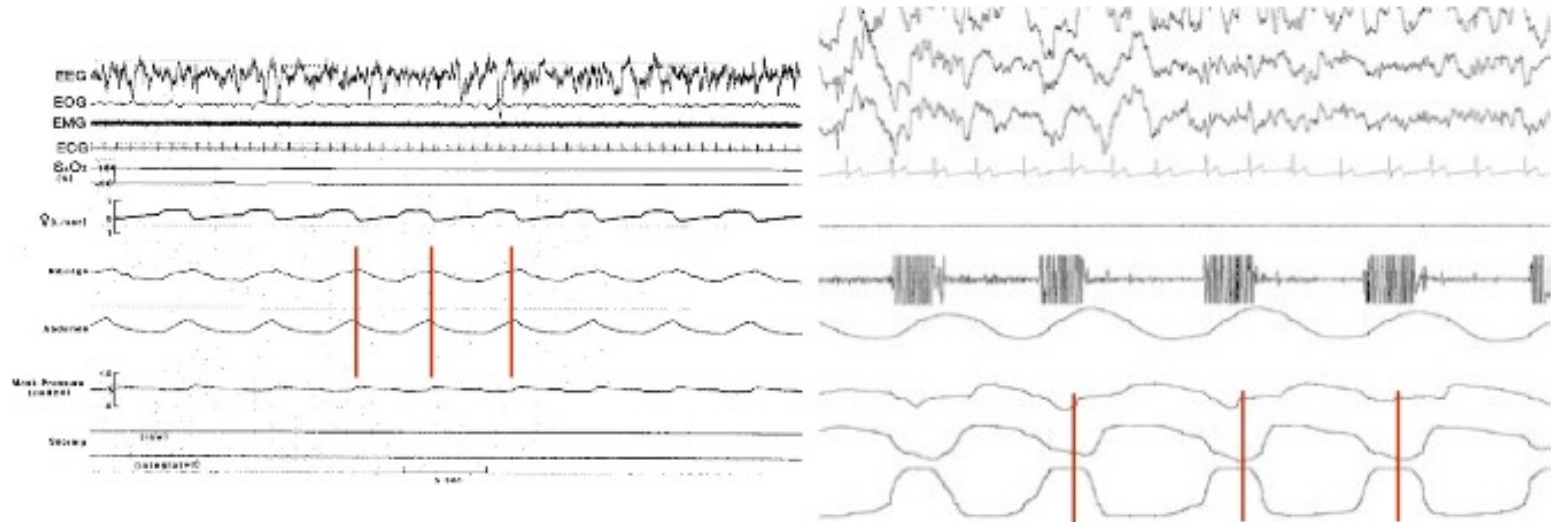
- Mouvements respiratoires anormaux:
 - mouvements asymétriques des deux hémithorax
 - Ex: pneumothorax
 - mouvements de faible amplitude, en particulier au cours de la toux
 - Ex: maladie neuromusculaire sévère
 - mouvements du thorax et de l'abdomen désynchronisés, voire en opposition de phase (respiration paradoxale)
 - Ex: hypopnées, apnées obstructives du sommeil

Mouvements respiratoires



Mouvements respiratoires

Exemple de respiration paradoxale
au cours du sommeil



Thorax et abdomen en phase

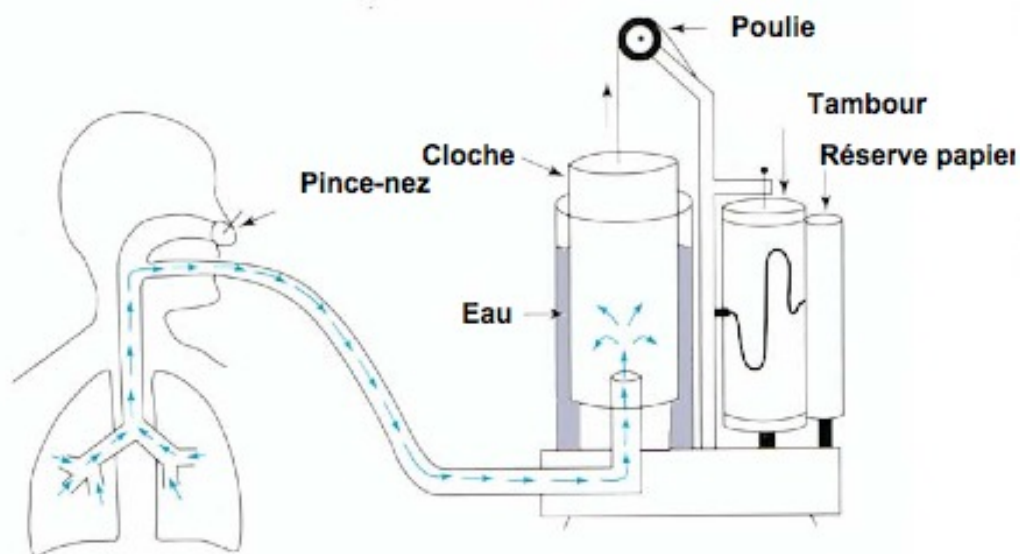
Thorax et abdomen en
opposition de phase

Volumes pulmonaires

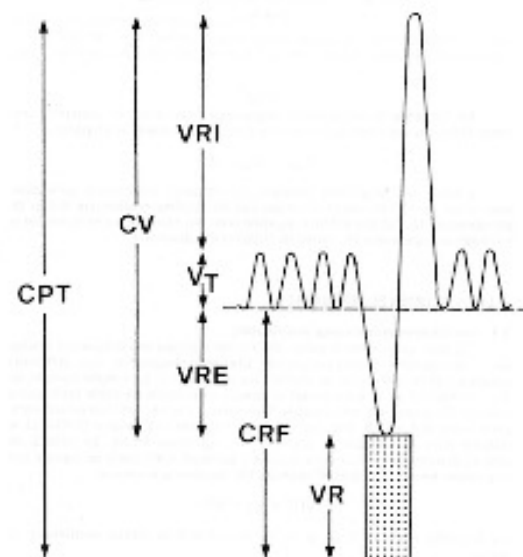
- Mouvements gazeux thoraciques inspiratoires et expiratoires = ventilation pulmonaire
- L'amplitude des mouvements thoraciques est **variable**
- La ventilation pulmonaire ne mobilise pas la totalité des volumes pulmonaires
 - volumes **mobilisables**
 - volume **non mobilisable**

Volumes pulmonaires

SPIROMETRE A CLOCHE

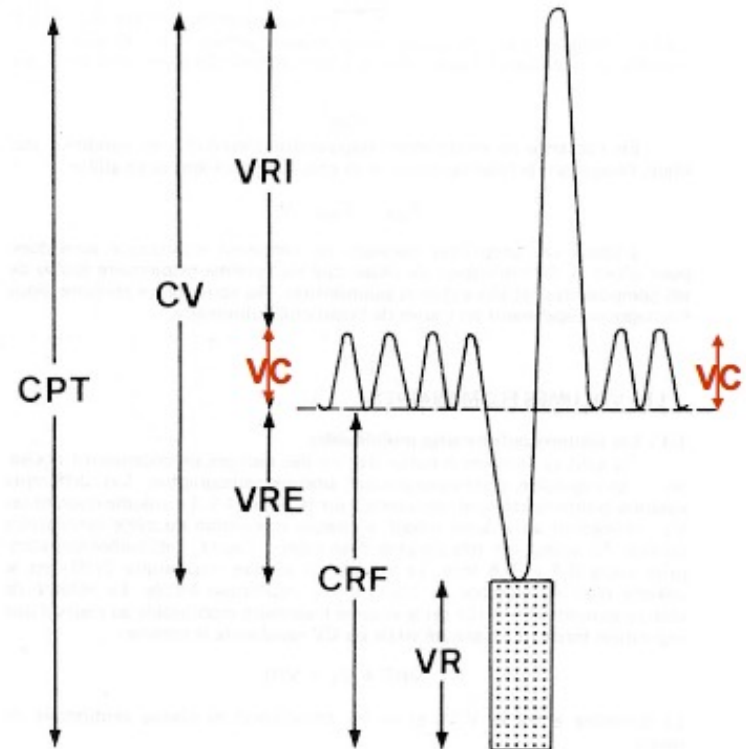


SPIROGRAMME



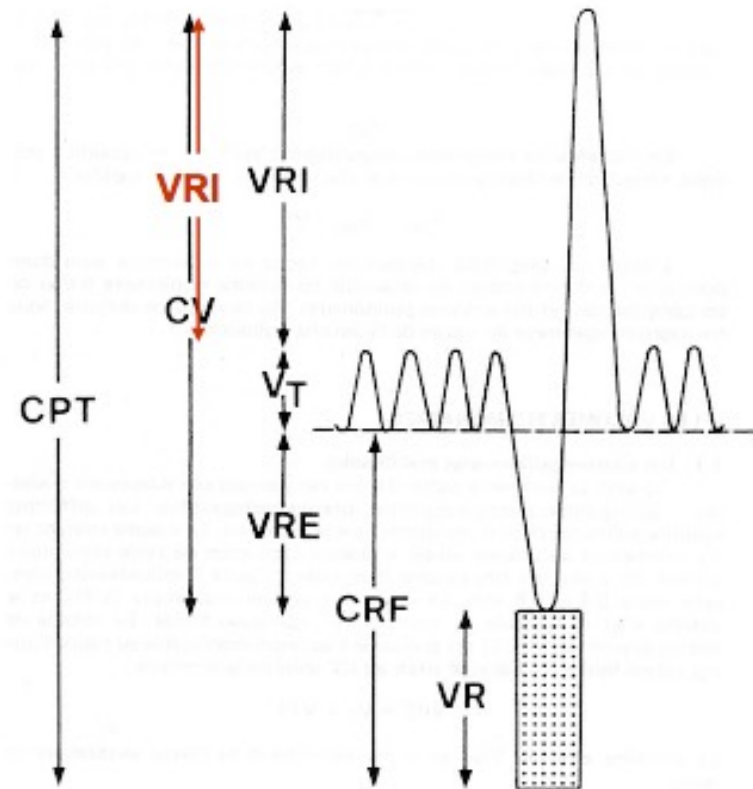
Volumes pulmonaires

- **Volume courant (VC)**
= volume mobilisé au cours d'un cycle respiratoire
- **$VC = VT$ = «Tidal Volume»**
- Adulte au repos $\approx 500\text{ml}$



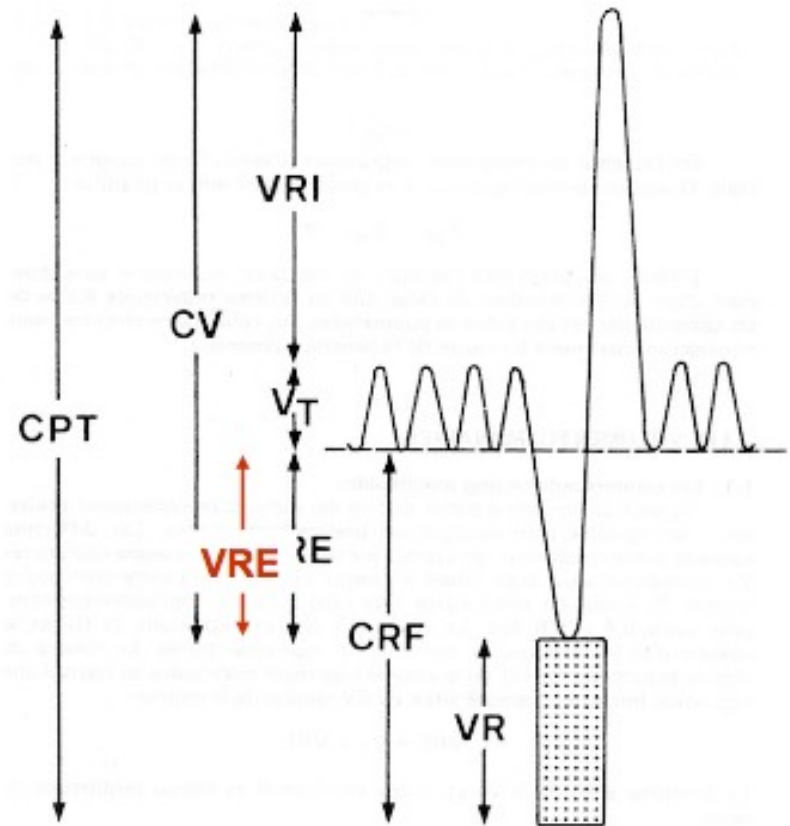
Volumes pulmonaires

- Volume de réserve inspiratoire (VRI)
- Adulte au repos $\approx$ 2500 à 3000 ml



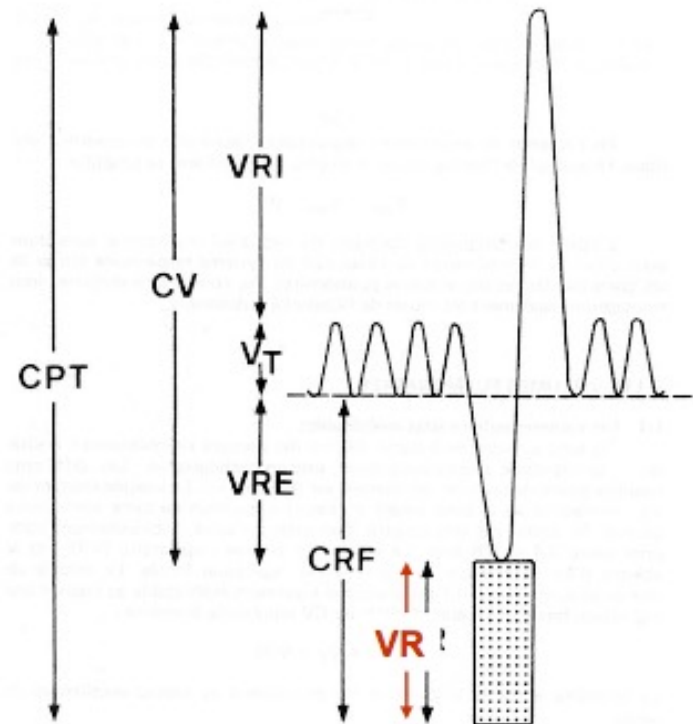
Volumes pulmonaires

- Volume de réserve expiratoire (VRE)
- Adulte au repos $\approx$ 1000 ml



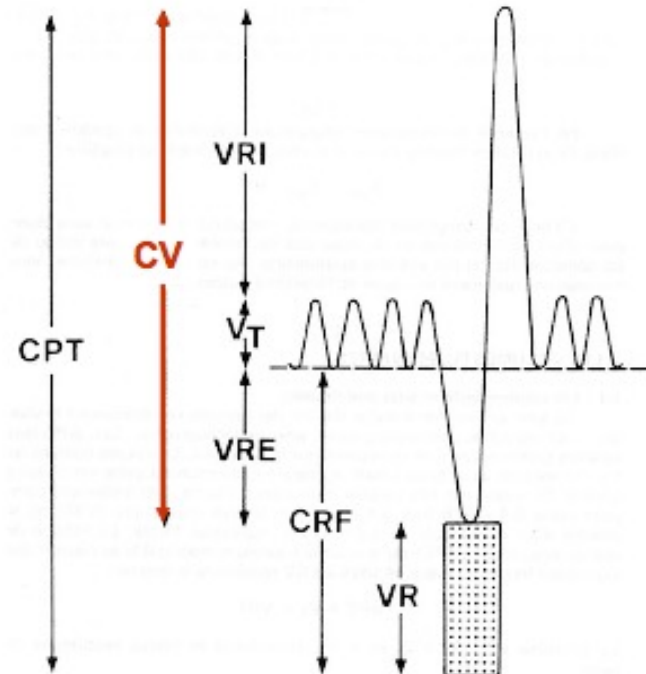
Volumes pulmonaires

- **Volume résiduel (VR)** = volume pulmonaire à la fin d'une expiration forcée
- Non mobilisable
- Mesuré de façon indirecte
- Adulte au repos ≈ 1000 ml



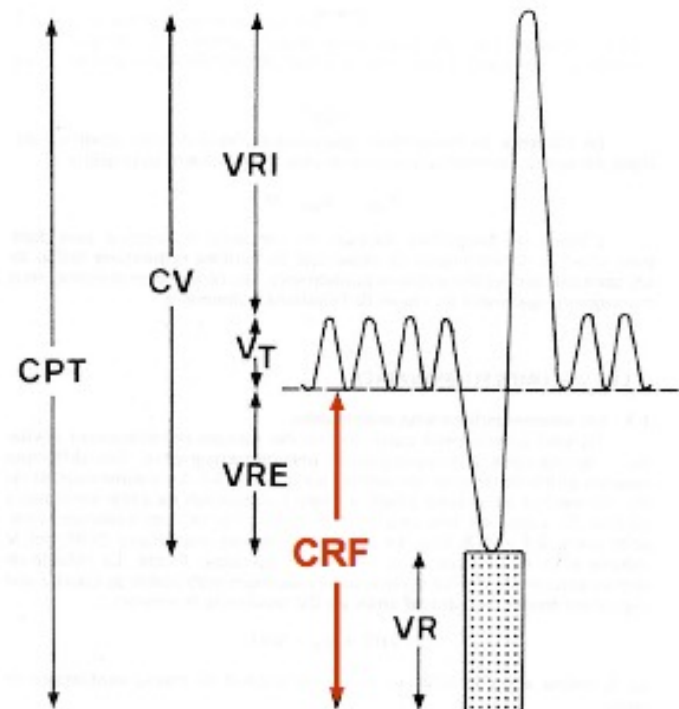
Volumes pulmonaires

- **Capacité vitale (CV)** =
totalité des volumes
mobilisables
- $CV = VRE + VC + VRI$
- Adulte au repos ≈ 4 à $4,5$ l



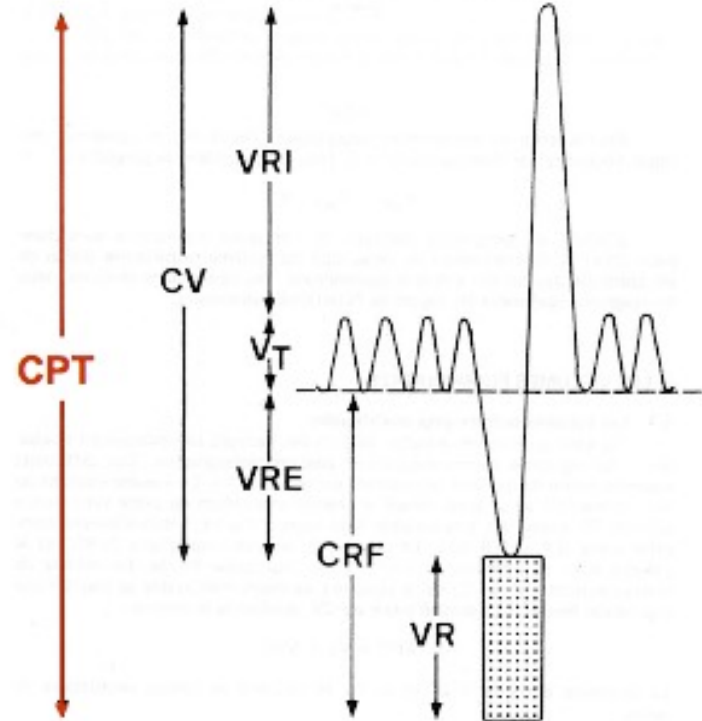
Volumes pulmonaires

- **Capacité résiduelle fonctionnelle (CRF)** = volume pulmonaire en fin d'expiration normale = **volume pulmonaire «de repos»**
- $CRF = VR + VRE$
- Mesurée de façon indirecte
- Adulte au repos $\approx 2\,000$ ml

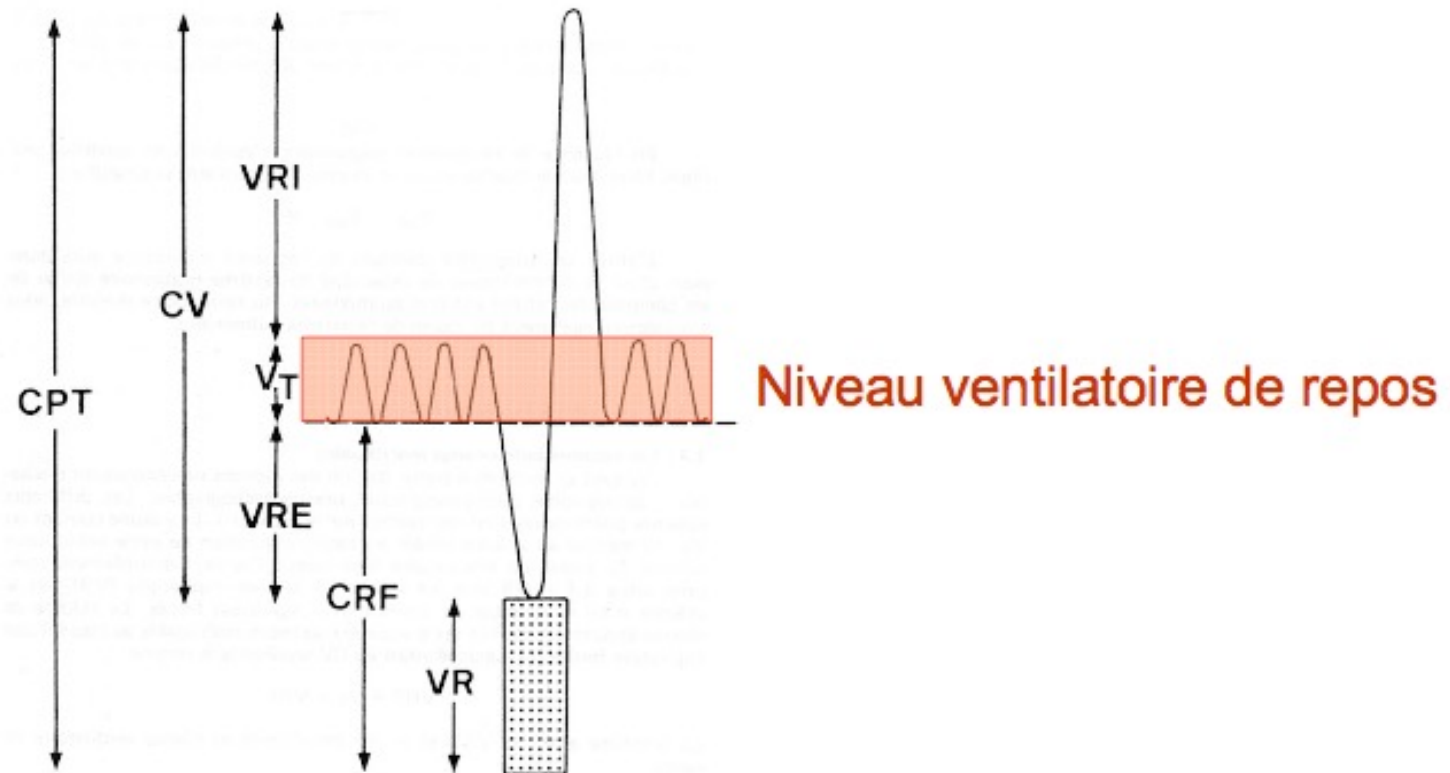


Volumes pulmonaires

- **Capacité pulmonaire totale (CPT)** = somme de tous les volumes pulmonaires
- $CPT = VR + VRE + VC + VRI = CV + VR$
- Adulte au repos $\approx 5l$

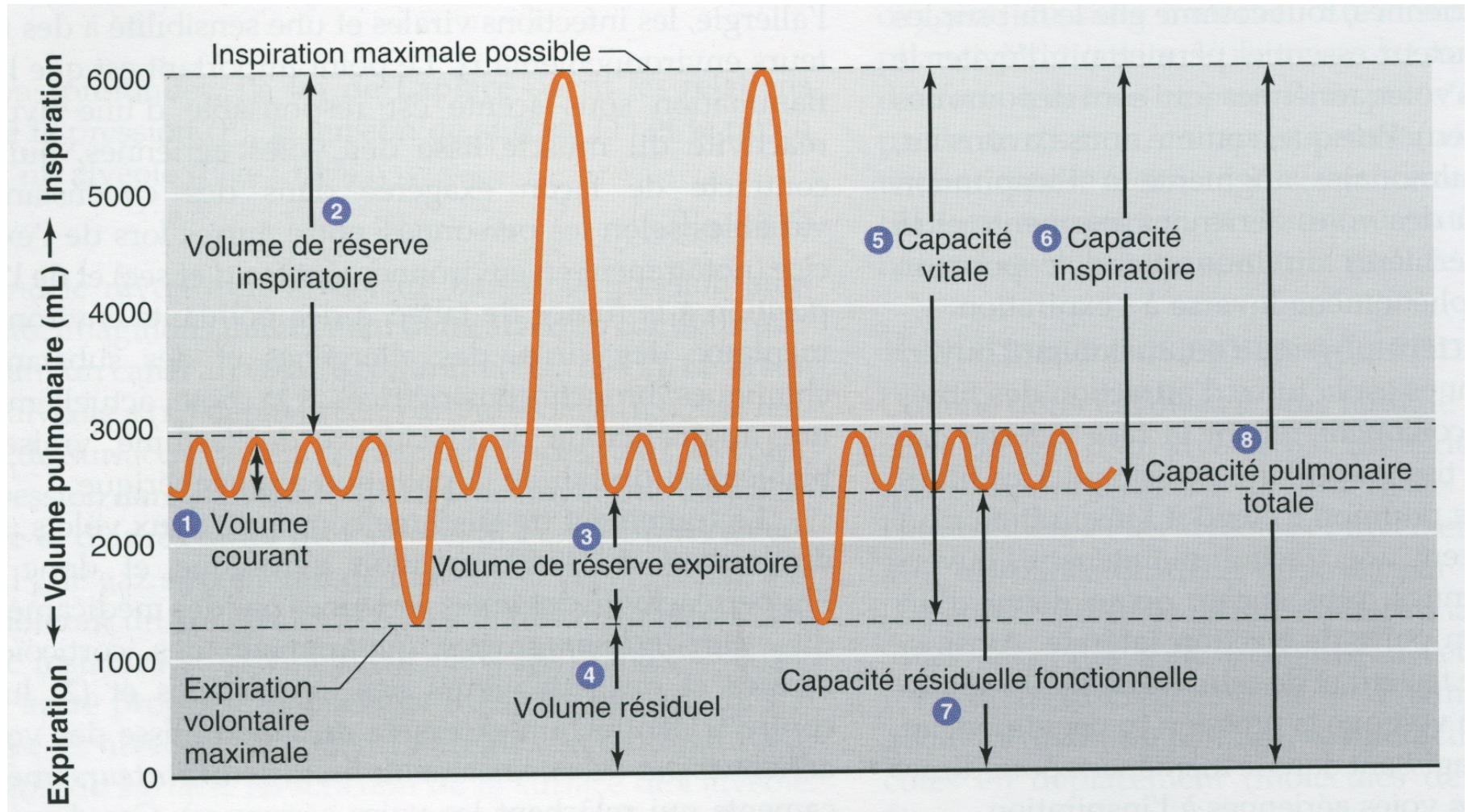


Volumes pulmonaires



Chap 1.3 – Paramètres mesurables

En résumé



Les volumes et capacités pulmonaires

- Valeurs des volumes et capacité pulmonaires **variables** en fonction de
 - âge
 - sexe
 - taille → volumes exprimés en % théorique
 - race
- Une mesure correcte des volumes pulmonaires nécessite la **coopération** du sujet
- Dans les conditions normales
 - poumon droit: 55% de la CV
 - poumon gauche: 45% de la CV



Capacité vitale

Volumes et capacités pulmonaires: méthodes de mesure

- Volumes mobilisables
 - Spirométrie
 - Pneumotachographie
- Volumes et capacités non mobilisables
 - VR, CRF, CPT : pléthysmographie corporelle
 - VR: dilution de l'hélium

SPIROMETRIE

La **spirométrie** (du latin spirar, respirer et metron, mesure) est un test de mesure de la respiration.

C'est le plus fréquent des tests de contrôle de la fonction pulmonaire.

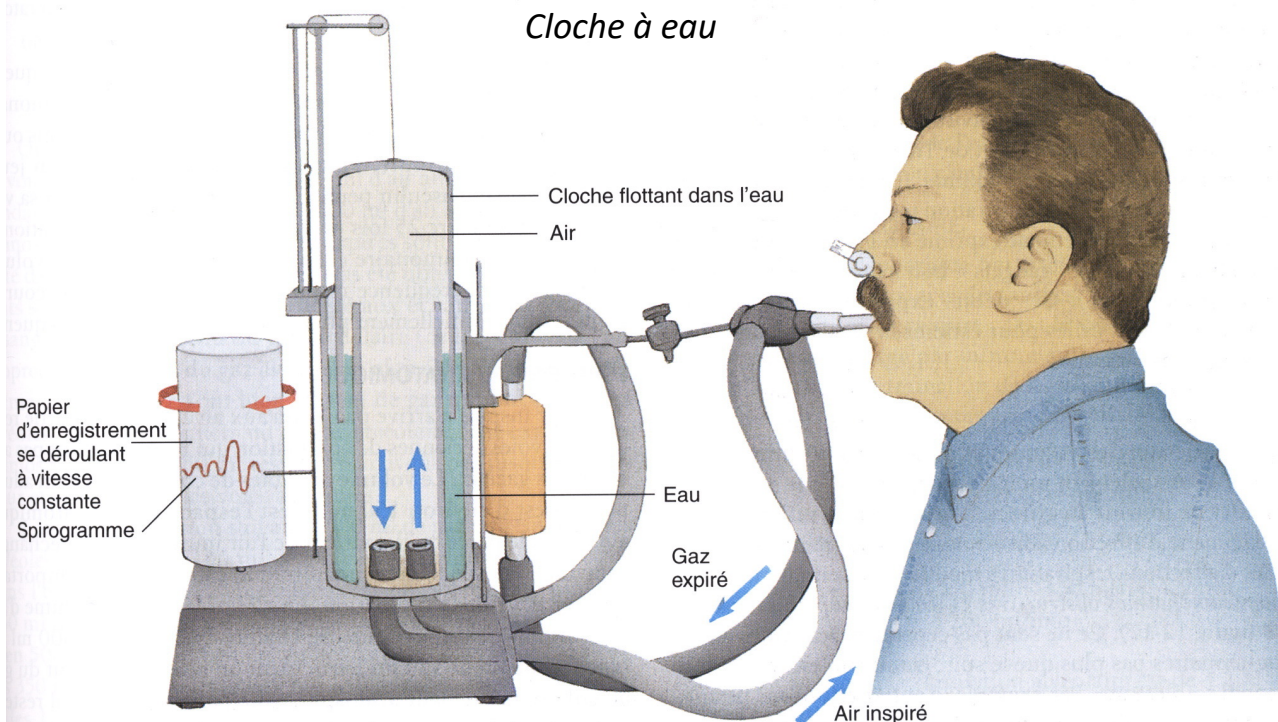
Le but d'une spirométrie est de contrôler la fonction ventilatoire en mesurant les volumes d'air mobilisés par les mouvements respiratoires et les débits ventilatoire.

Ces tests visent à déterminer, de manière relativement simple les paramètres de différentes capacités pulmonaires, les volumes pulmonaires et les débits d'air (inspiration, expiration) d'un patient, dans le but de diagnostiquer certaines pathologies respiratoires (exemple : asthmes) ou de suivre leur évolution.

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

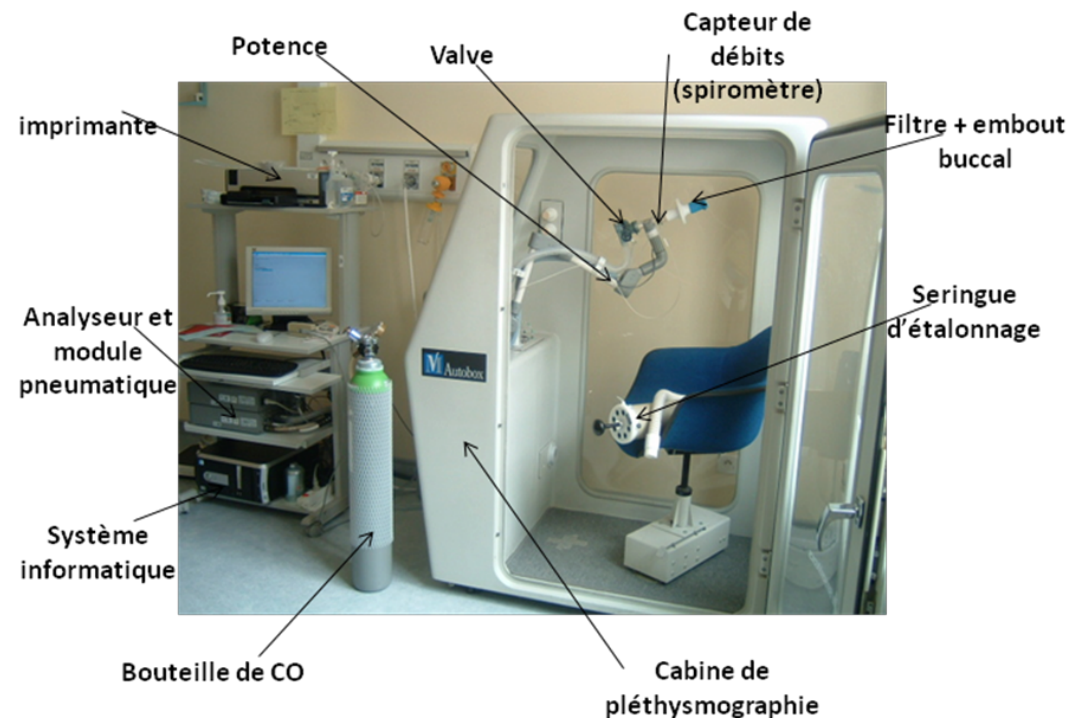
Le test de spirométrie est réalisée en utilisant un appareil appelé **spiromètre**.

- Spiromètre mesurant le vol et fournissant le débit directement :
 - « cloche à eau »
 - spiromètre à joint de déroulement
 - soufflet



Chap 1.3 – Paramètres mesurables

- Spiromètres mesurant le débit et fournissant le volume directement :
 - turbine avec mesure optique de vitesse
 - spiromètre à fil chauffant
 - mesure de la P° à l'aide d'une résistance



Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Principe de la Jauge à fil chaud

Le fonctionnement de ce type de capteur repose sur la variation de la conductibilité thermique du gaz avec la pression lorsque celle-ci est comprise dans un domaine s'étendant approximativement de 10^{-1} à 10^3 Pa

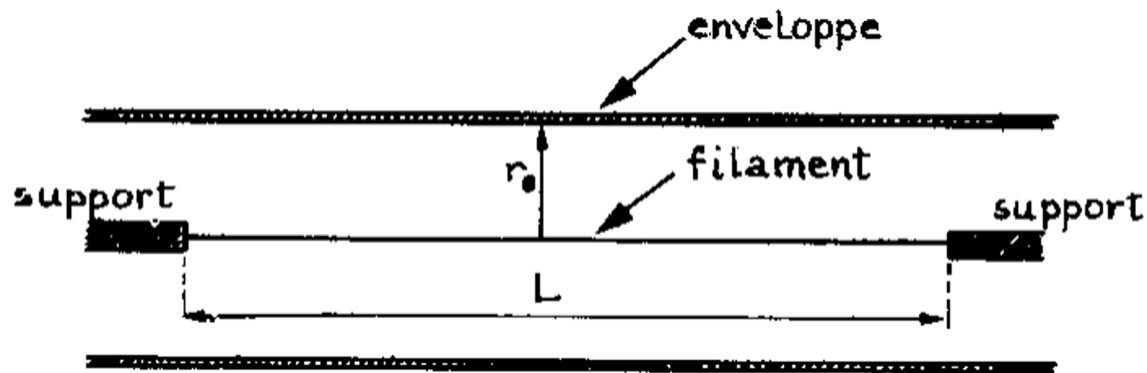
Certaines propriétés des gaz comme la viscosité et la conductibilité thermique sont liés aux transferts d'énergie et de quantité de mouvement.

Puisque ces transferts s'opèrent par chocs entre molécules, on conçoit aisément que ces propriétés vont dépendre de la pression.

Principe :

L'élément de base du capteur est un filament métallique rectiligne, chauffé par effet Joule, qui est disposé dans une enveloppe cylindrique co-axiale dont la face externe est en contact avec l'atmosphère ambiante.

Chap 1.3 – Paramètres mesurables



La température du filament dépend principalement des pertes thermiques par conduction dans le gaz qui sont d'autant plus grandes que la pression est importante : La T° ou la puissance nécessaire pour maintenir cette T° constante constituent donc des moyens de mesure de la P° .

Grâce à l'étude du bilan énergétique (transfert de chaleur) on peut déduire

$$\text{Puissance} = a' (p/Vm) (T_f - T_0)$$

Avec p : pression et m : masse molaire du gaz

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Exemple de jauge à fil chaud: jauge de Pirani

La jauge de Pirani fait une mesure indirecte de la pression.

Elle est constituée d'un filament chauffé placé dans une enceinte dont on veut mesurer la pression.

La mesure de la pression est déduite de la quantité de chaleur perdue par le filament par suite de la conduction gazeuse : les molécules qui rencontrent le filament absorbent une partie de son énergie.

Il existe plusieurs méthodes de mesure de l'énergie perdue par le filament :

- * Maintenir constante la T° du filament et mesurer les variations de tension du filament aux bornes de la jauge.
- * Utiliser des filaments dont la résistivité a un coefficient de T° élevé, de sorte que dans le domaine de P° , de faibles variations se traduisent par de fortes variations de résistance.



Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Le filament constitue une branche d'un pont de Wheatstone initialement équilibré: les variations de pression conduisent à un déséquilibre du pont.

Le courant de déséquilibre qui circule dans la diagonale du pont est mesuré par un ampèremètre qui, après étalonnage pour l'air, a été directement gradué en millibar par le constructeur.

Le domaine d'utilisation est compris entre 100 et 10^{-4} mbar.

Une jauge de Pirani peut-être laissée en permanence sous tension sans risque de dégradation.

Les avantages : encombrement réduit, robustesse, mesure instantanée

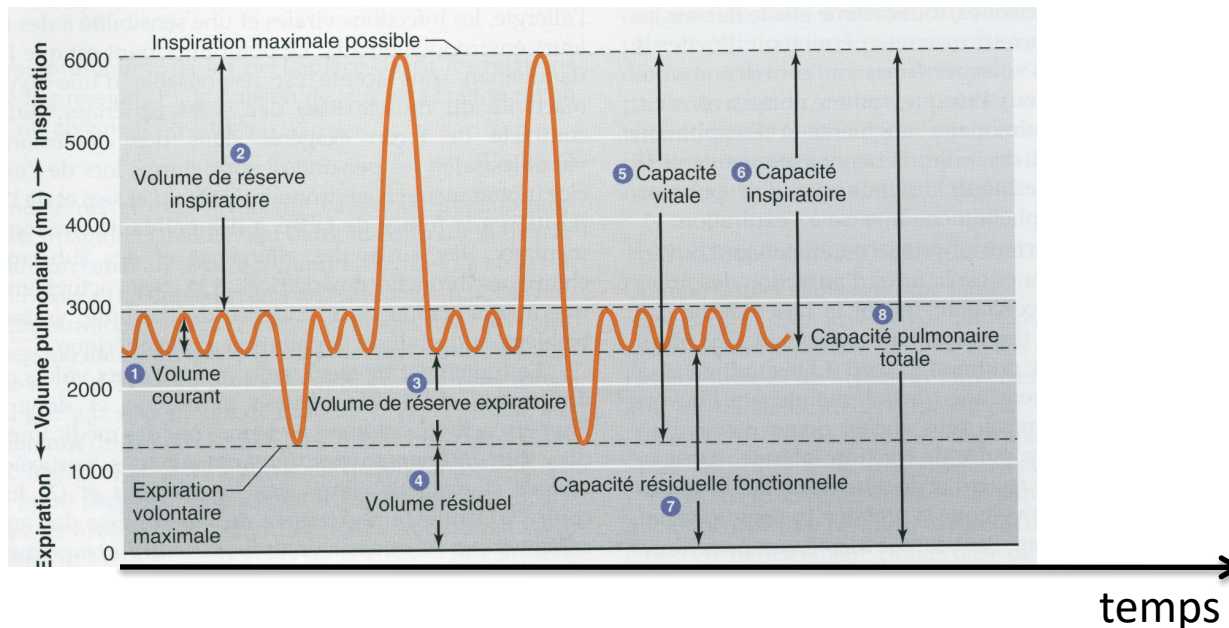
Les inconvénients : calibration dépend du gaz, domaine restreint d'utilisation

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

La plupart des spiromètres affichent les résultats sous forme de graphiques que l'on appelle « spirogrammes » :

- une courbe volume-temps, montrant le volume (en litres) le long de l'axe Y et le temps (en secondes) le long de l'axe X
- une boucle débit-volume, ce qui représente graphiquement le débit d'air sur l'axe Y et le volume total inspiré ou expiré sur l'axe X

Exemple

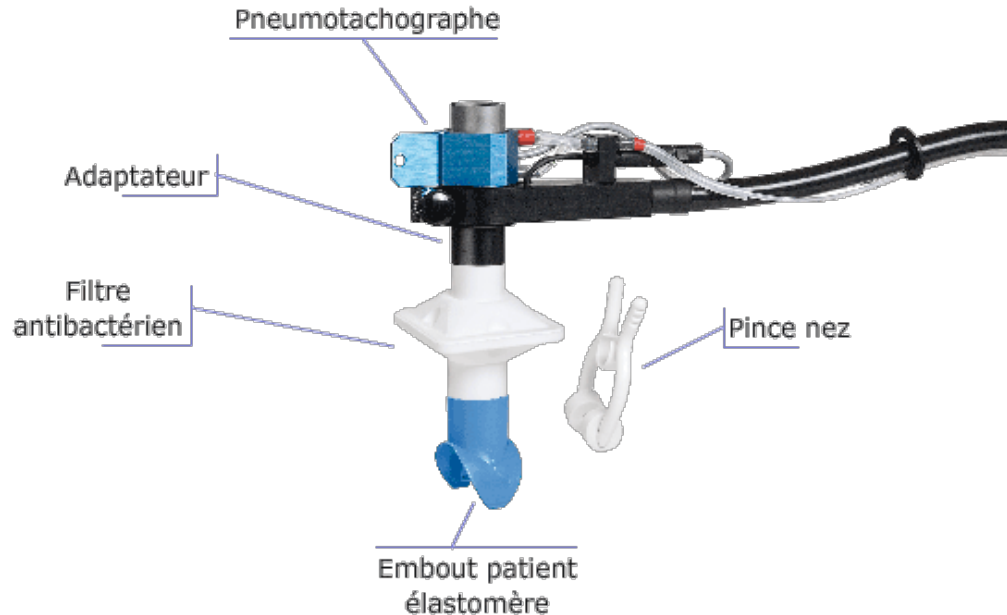


Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Un pneumotachographe est un appareil qui mesure le débit de gaz instantané à la bouche.

Le pneumotachographe a détrôné le spiromètre car :

- Le spiromètre fonctionne en circuit fermé. Il doit être compensé en oxygène et en dioxyde de carbone ;
- Le pneumotachographe fonctionne en circuit ouvert et pose peu de problèmes d'hygiène.



Chap 1.3 – Paramètres mesurables

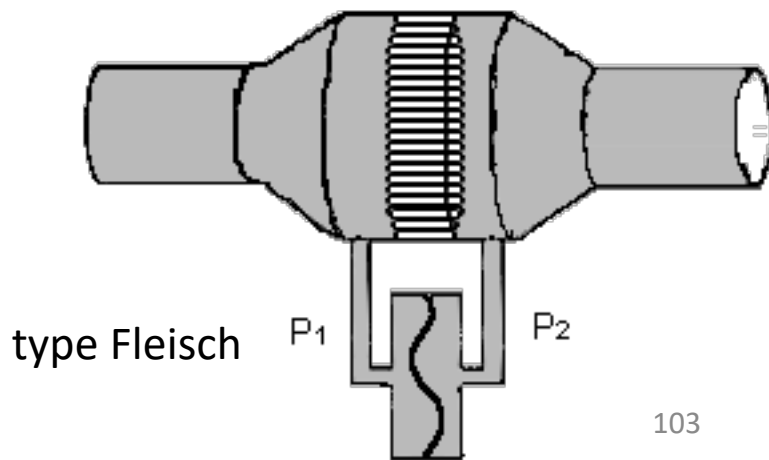
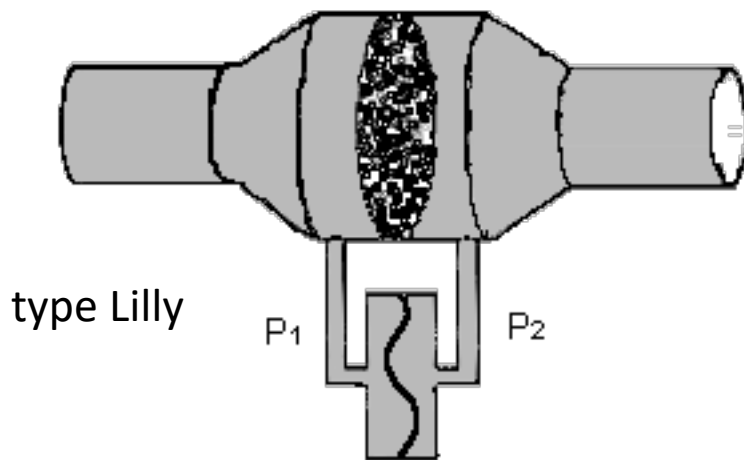
Les pneumotachographes fonctionnent selon le principe de Venturi. L'effet Venturi est le nom donné à un phénomène de la dynamique des fluides où les particules gazeuses ou liquides se retrouvent accélérées à cause d'un rétrécissement de leur zone de circulation. En même temps la pression diminue.

Il y a deux types de pneumotachographes disponibles: le type Fleisch et le type Lilly.

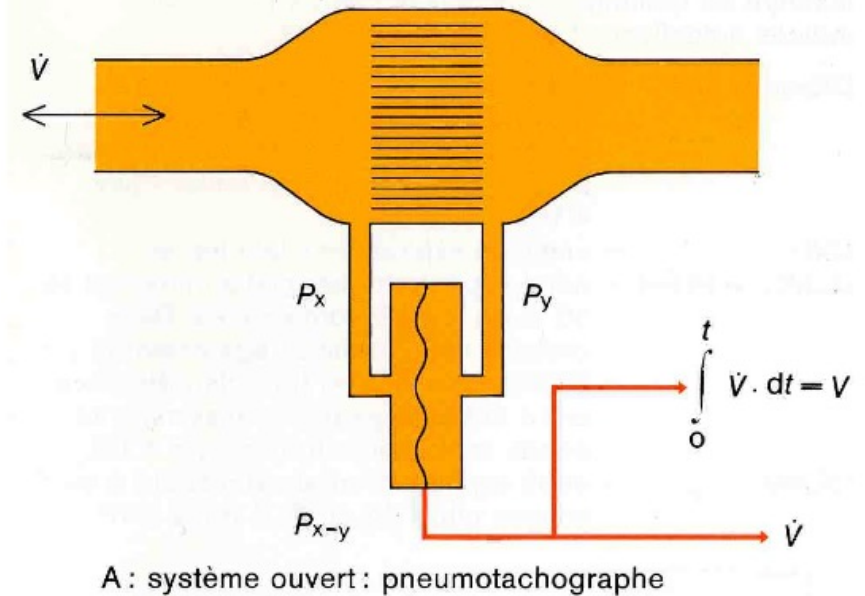
Les pneumotachographes du type Fleisch sont plus fiables que celles du type Lilly.

Un pneumotachograph Lilly mesure la différence entre la pression avant et après une membrane avec une résistance connue.

Dans le cas d'un pneumotachograph Fleisch cette résistance est une série des capillaires parallèles.

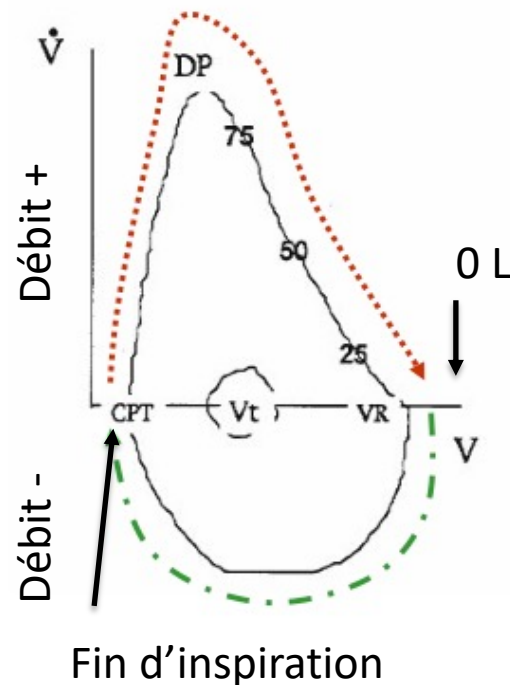


Chap 1.3 – Paramètres mesurables

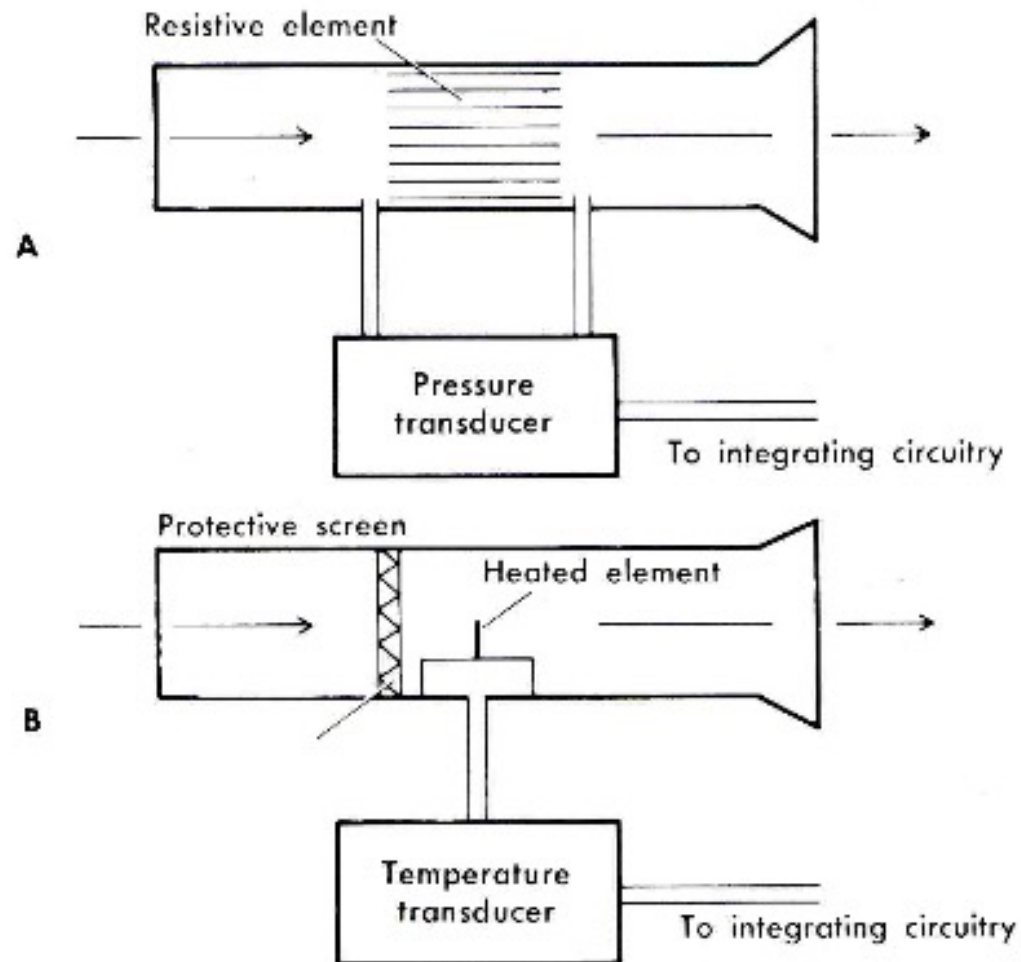


• Courbe débit-volume pneumotachographique

- Sujet connecté à un spiromètre et à un pneumotachographe, respiration buccale
- Manœuvre **inspiratoire** maximale puis **expiration forcée**
- On mesure le débit **expiratoire** instantané à un volume pulmonaire donné

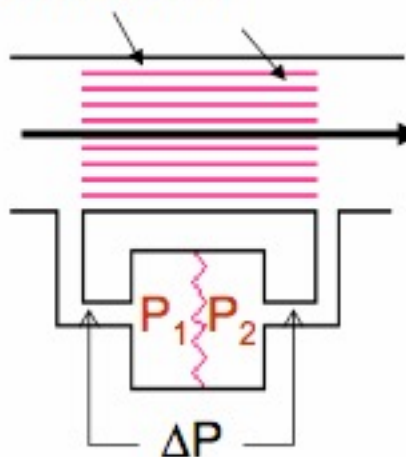


Chap 1.3 – Paramètres mesurables



Chap 1.3 – Paramètres mesurables

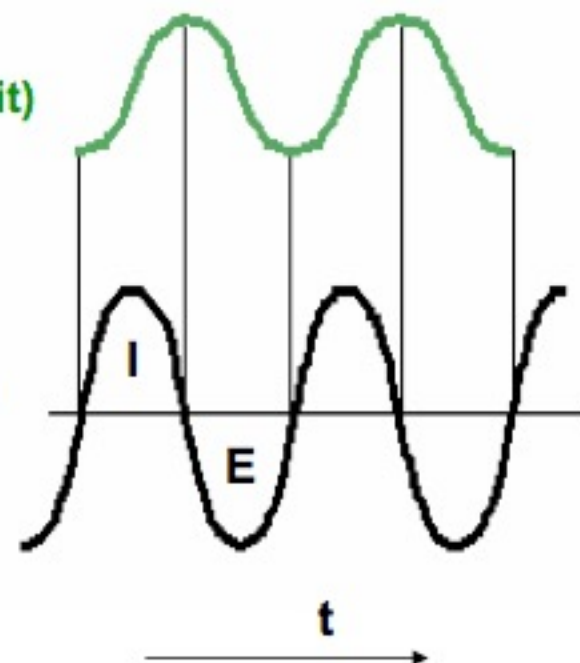
Flux laminaire



$$\dot{V} = k \frac{\Delta P}{dt}$$

Volume
(intégration du débit)

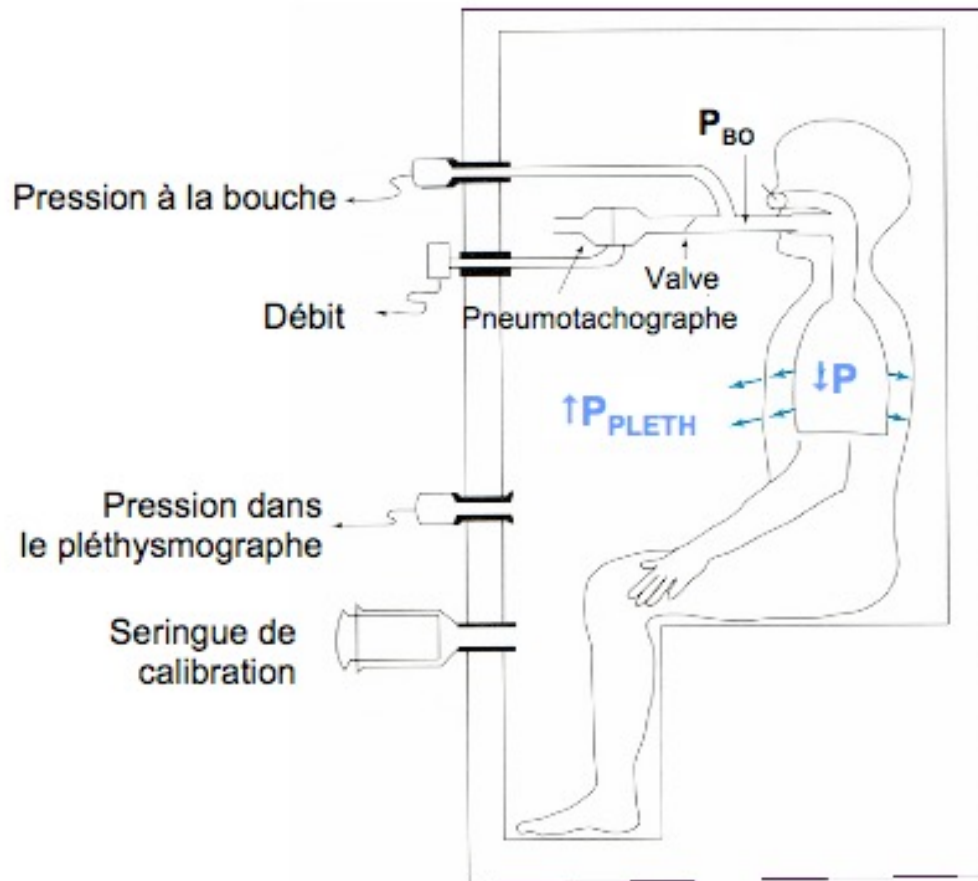
Débit instantané



Pneumotachographie

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Pléthysmographie corporelle

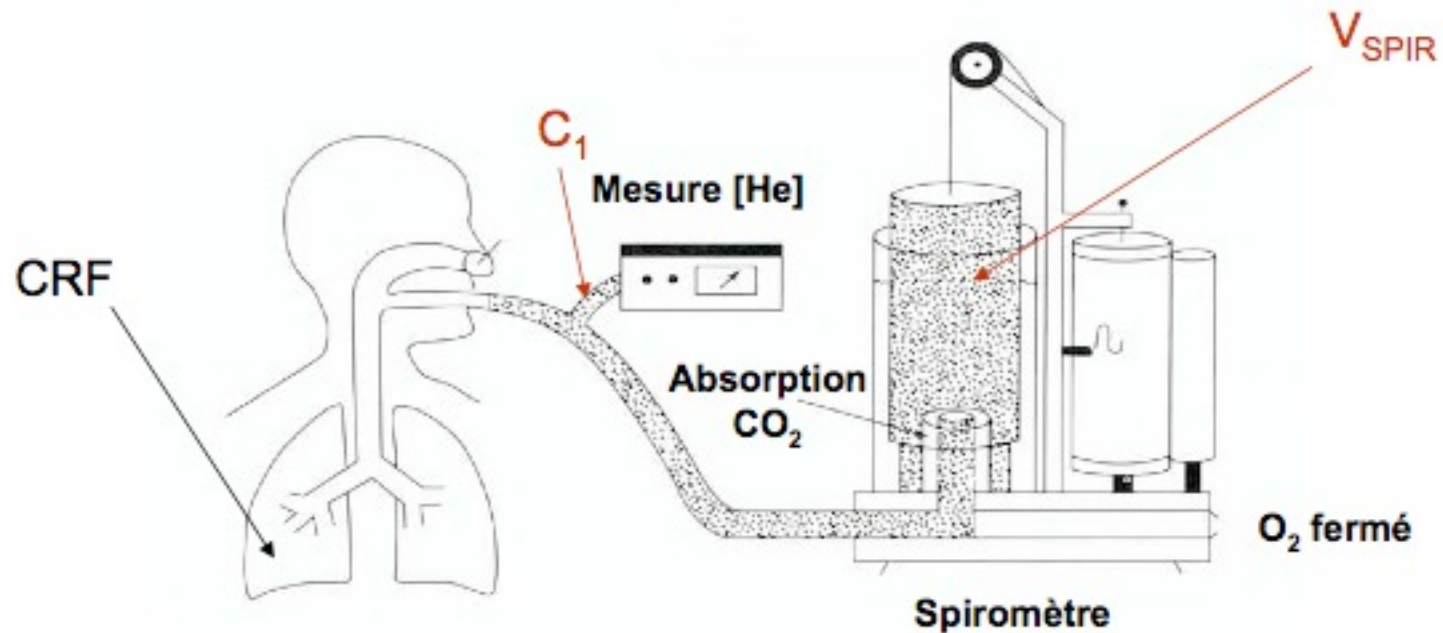


Pléthysmographie corporelle

D'après référence 5

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Méthode de dilution à l'hélium : mesure de concentration d'He dans l'air

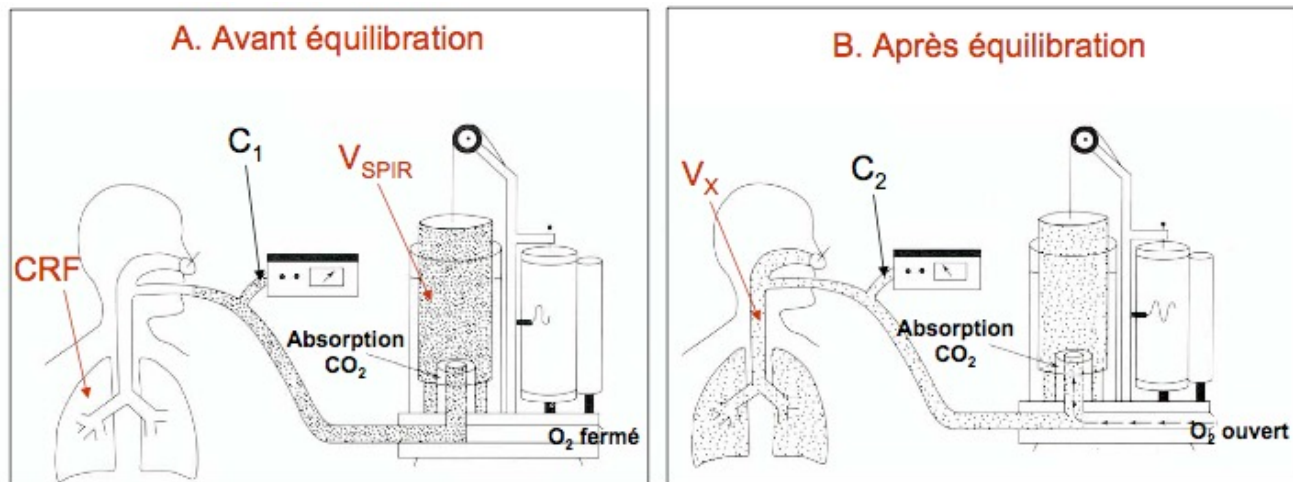


Le sujet est connecté à un spiromètre de volume V_{SPIR} connu contenant une concentration connue d'He, à la fin d'une expiration normale (CRF = $V_R + V_{RE}$)

Méthode de dilution à l'hélium (gaz inerte)

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Méthode de dilution à l'hélium



$$V_{SPIR} \cdot C_1 = V_x \cdot C_2 \quad \text{avec} \quad V_x = VR + VRE + V_{SPIR}$$

Méthode de dilution à l'hélium (gaz inerte)

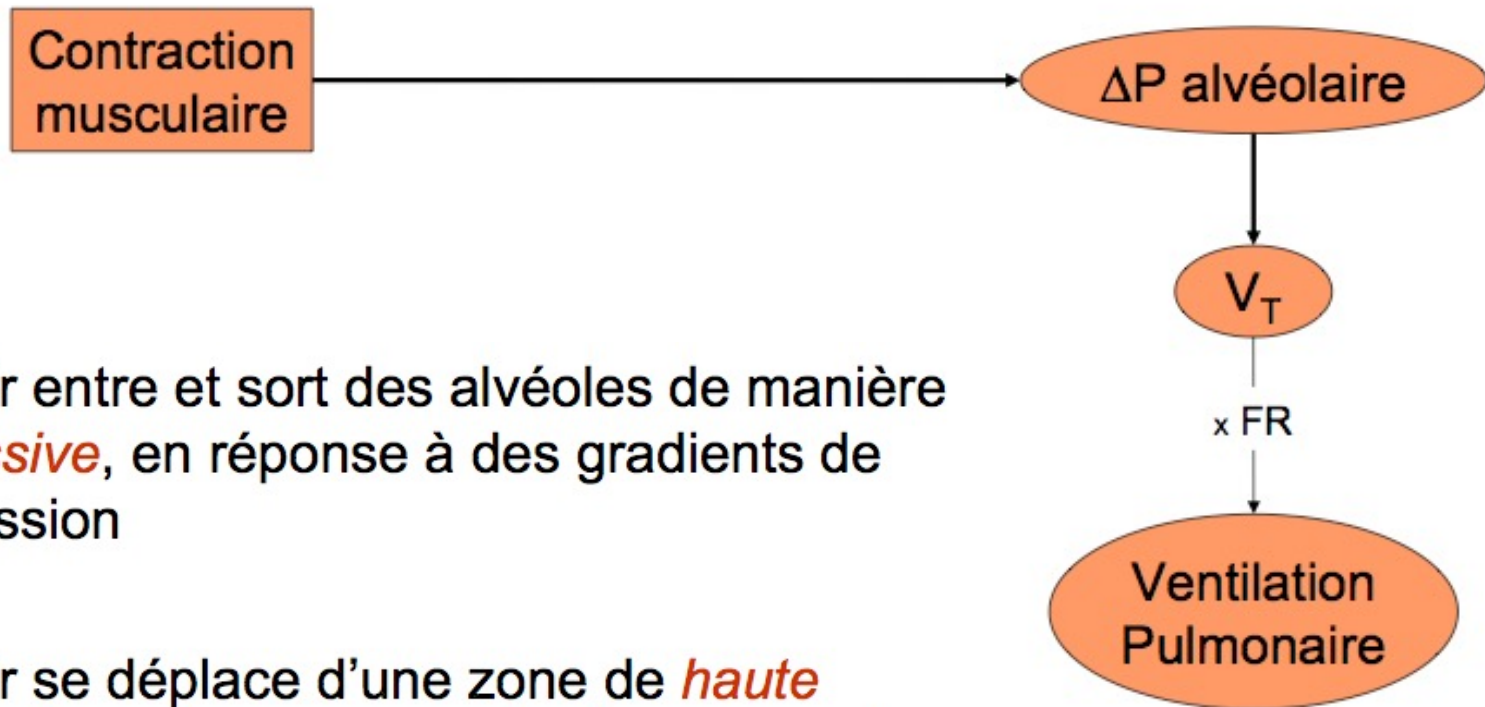
$$VR = \frac{V_{SPIR} \cdot C_1}{C_2} - VRE - V_{SPIR}$$

- Mesure du VR par méthode de dilution
 - **sous-estime** la valeur de VR
 - car les zones alvéolaires mal/non ventilées ne participent pas à la dilution de l'hélium
- La pléthysmographie mesure le volume gazeux **intra-thoracique total** (CPT)
- La différence VR_{He} / VR_{PLETH} peut être marquée dans certaines pathologies (1000ml)

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Production du débit aérien

Loi physique
Cycle respiratoire

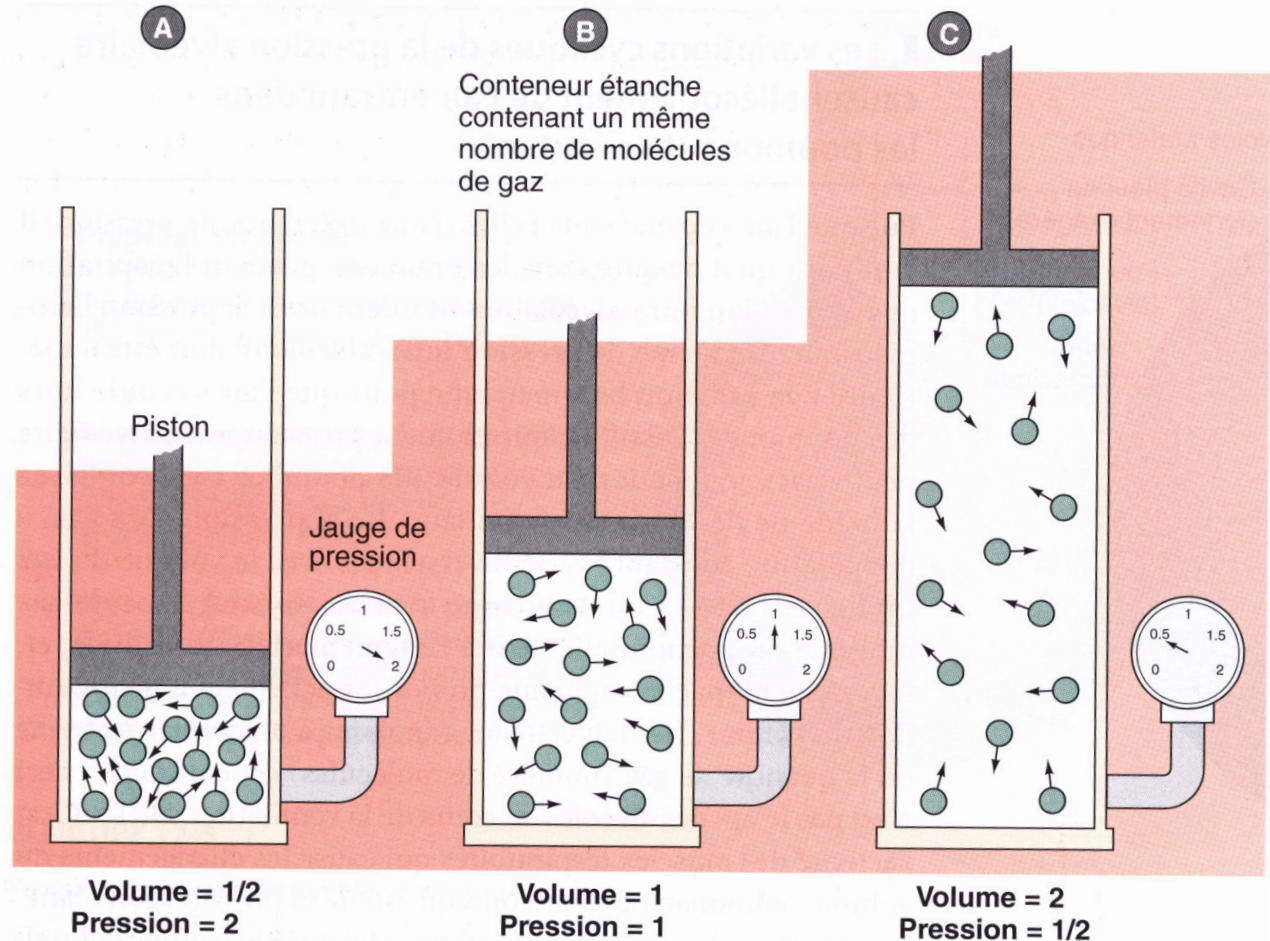


- L'air entre et sort des alvéoles de manière *passive*, en réponse à des gradients de pression
- L'air se déplace d'une zone de *haute* pression vers une zone de *basse* pression

Rappel :

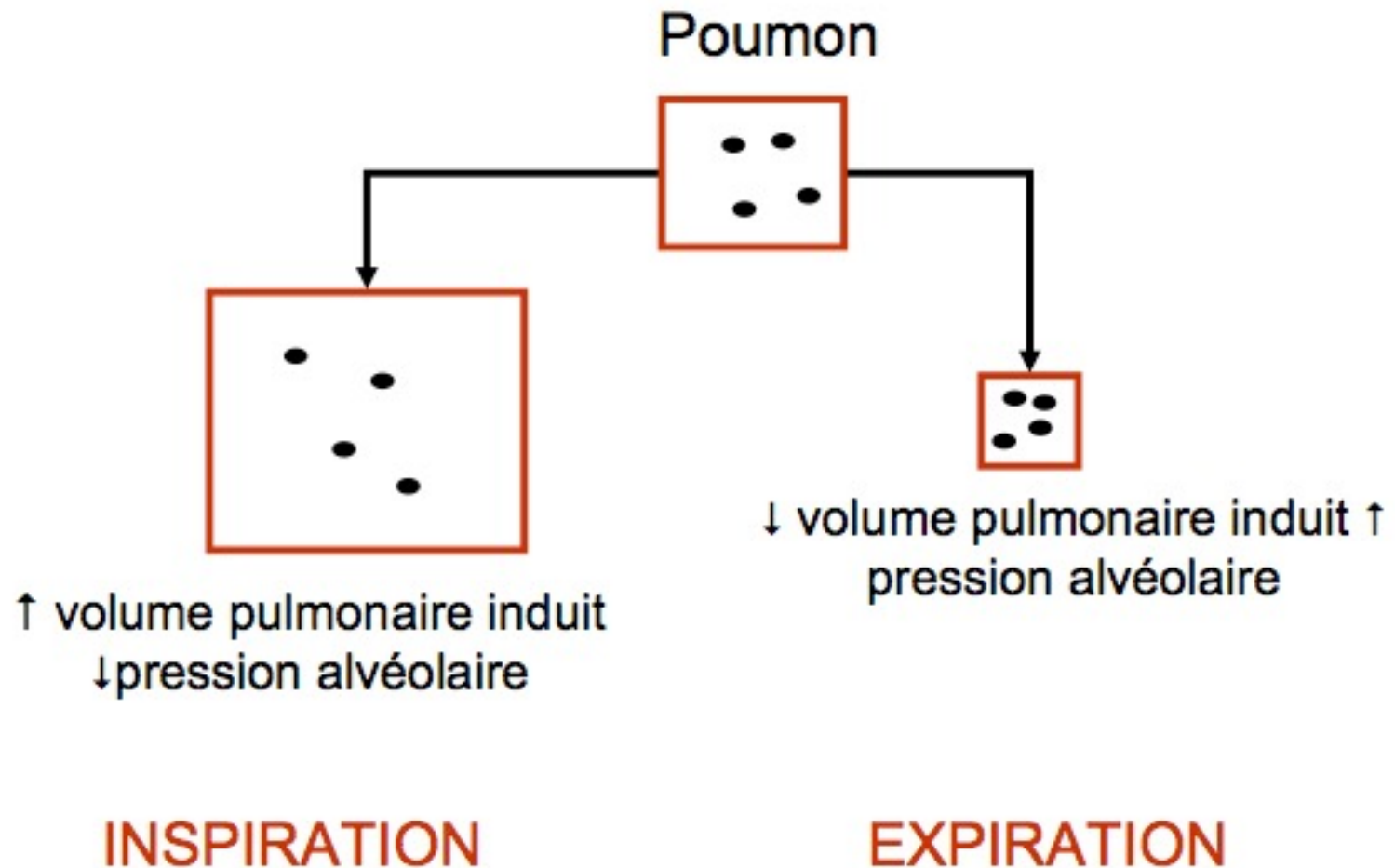
**Production du débit
aérien**

**Loi de Boyle-Mariotte :
À t° cste et dans un
espace clos, P est
inversement
proportionnel à V**

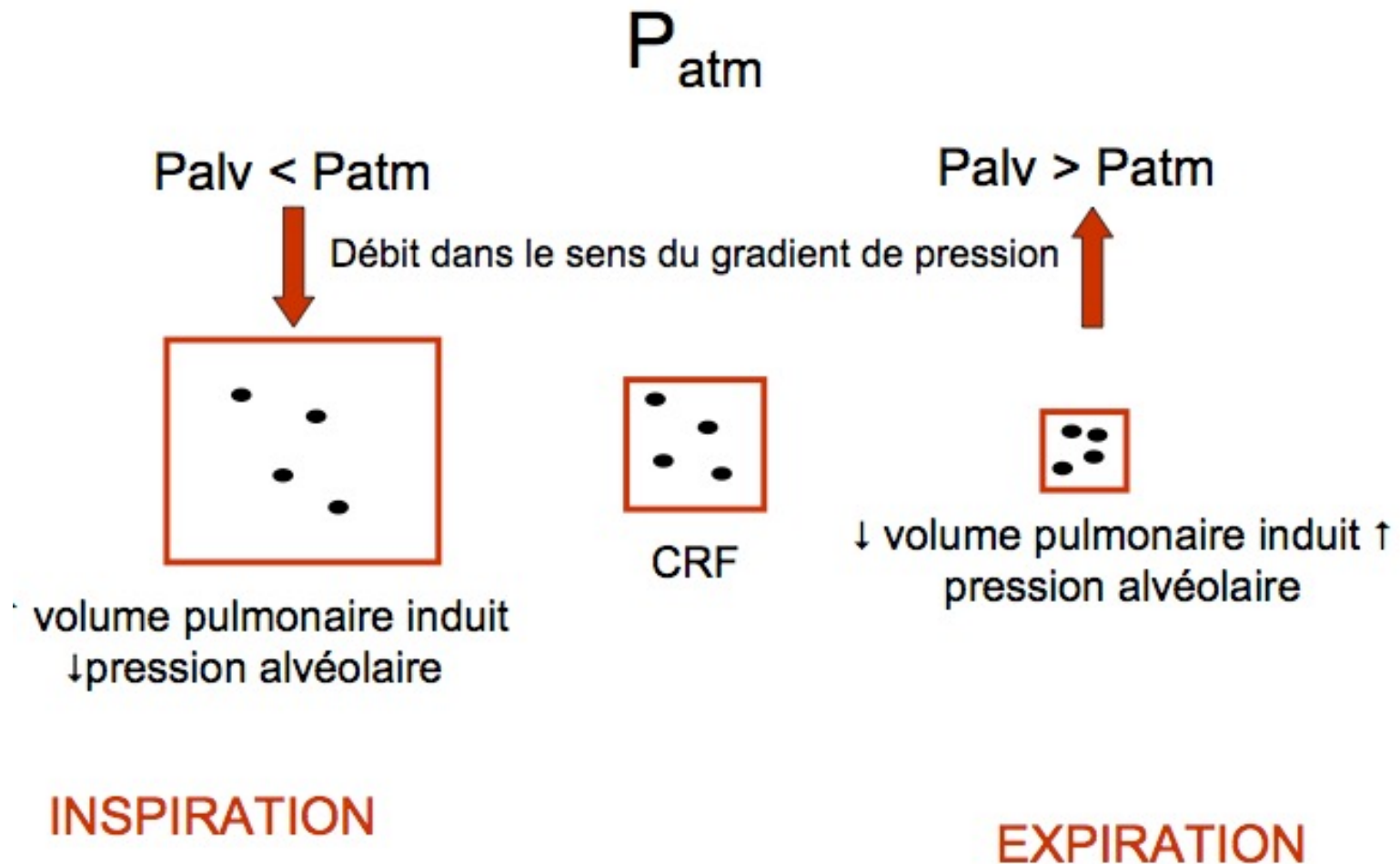


Loi de Boyle-Mariotte. Il y a le même nombre de molécules de gaz dans les 3 conteneurs. Du fait du mouvement aléatoire des molécules, la probabilité qu'une molécule heurte la paroi du conteneur et exerce une pression sur elle est inversement proportionnelle au volume du conteneur si la température reste constante. Le gaz dans le conteneur B exerce une pression supérieure à celle exercée par le gaz dans le plus grand conteneur C et inférieure à celle exercée par le gaz dans le plus petit conteneur A. Cette relation $P_1 V_1 = P_2 V_2$ est la loi de Boyle-Mariotte. La pression du gaz diminue proportionnellement à l'augmentation du volume dans lequel il se trouve et, inversement augmente proportionnellement à la diminution du volume.

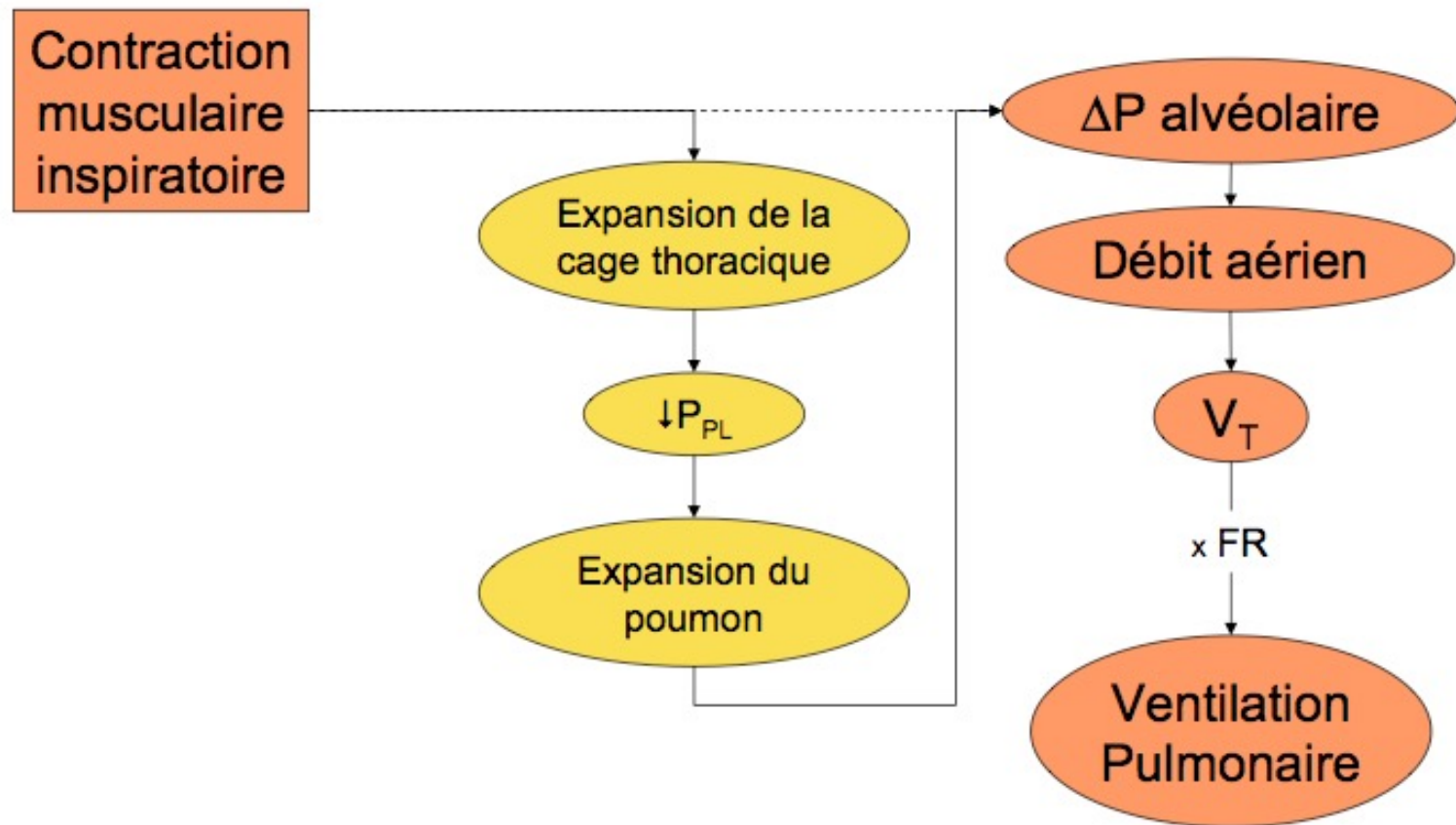
Chap 1.3 – Paramètres mesurables



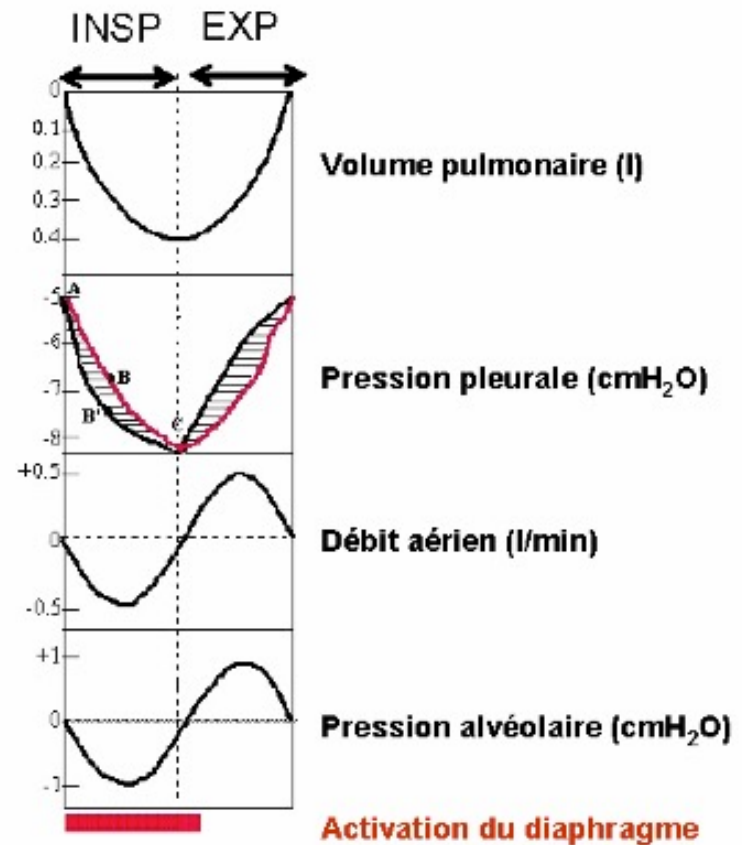
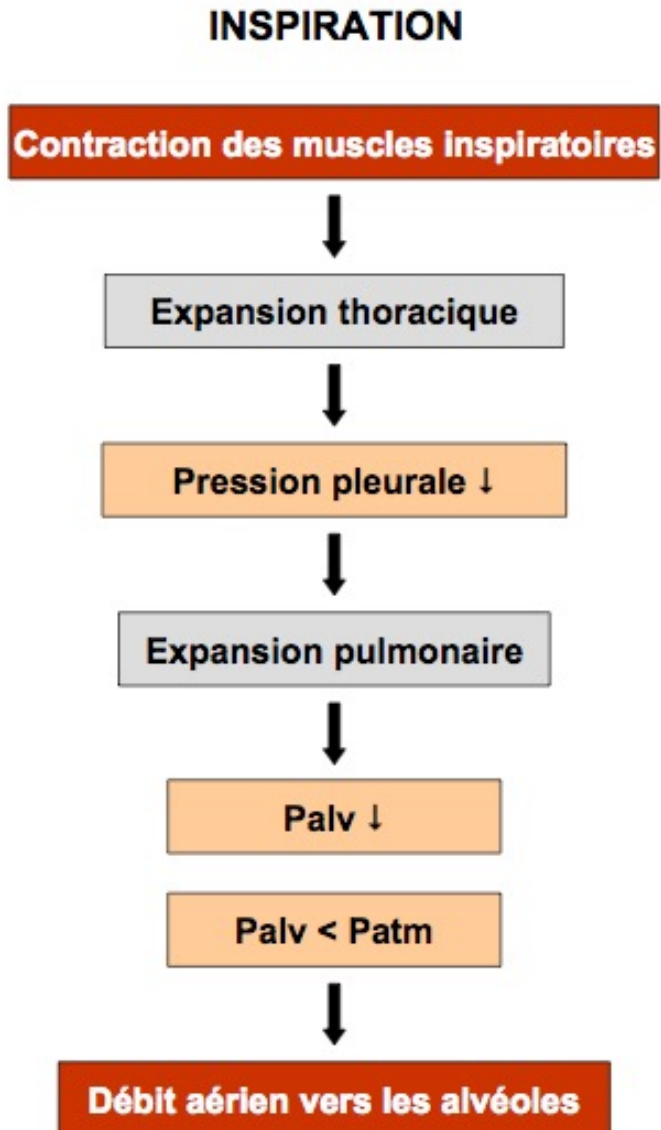
Chap 1.3 – Paramètres mesurables



Chap 1.3 – Paramètres mesurables

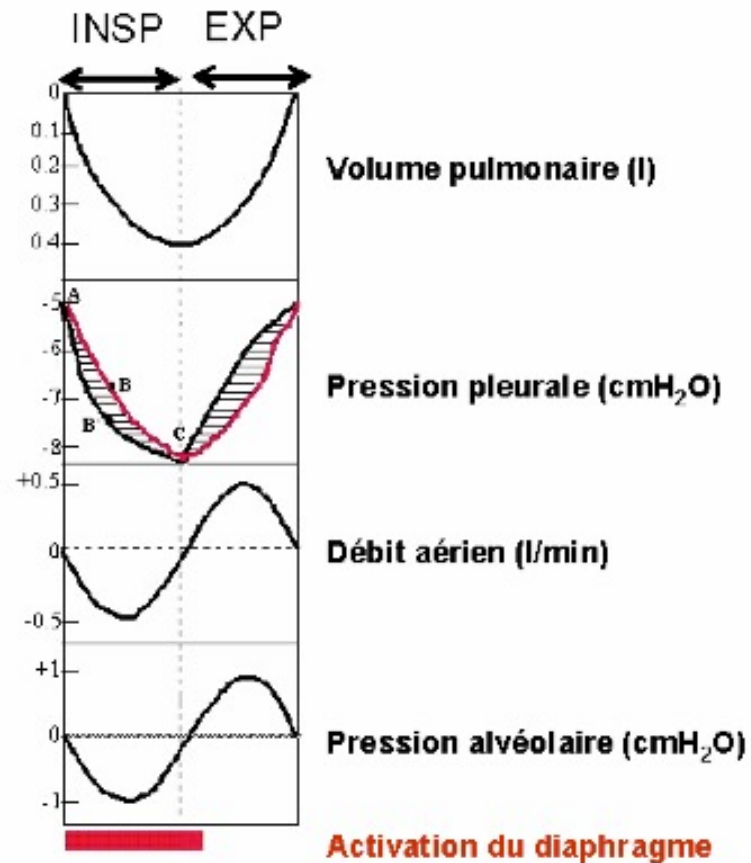


Chap 1.3 – Paramètres mesurables

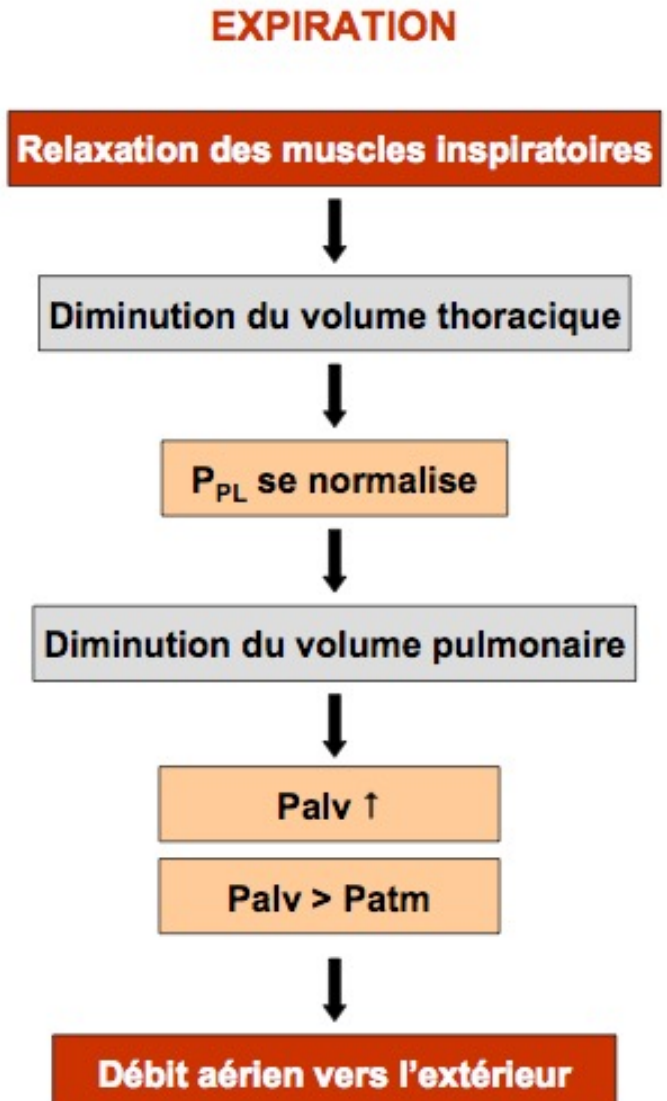


D'après référence 6

Chap 1.3 – Paramètres mesurables



D'après référence 6



Propriétés résistives du système respiratoire

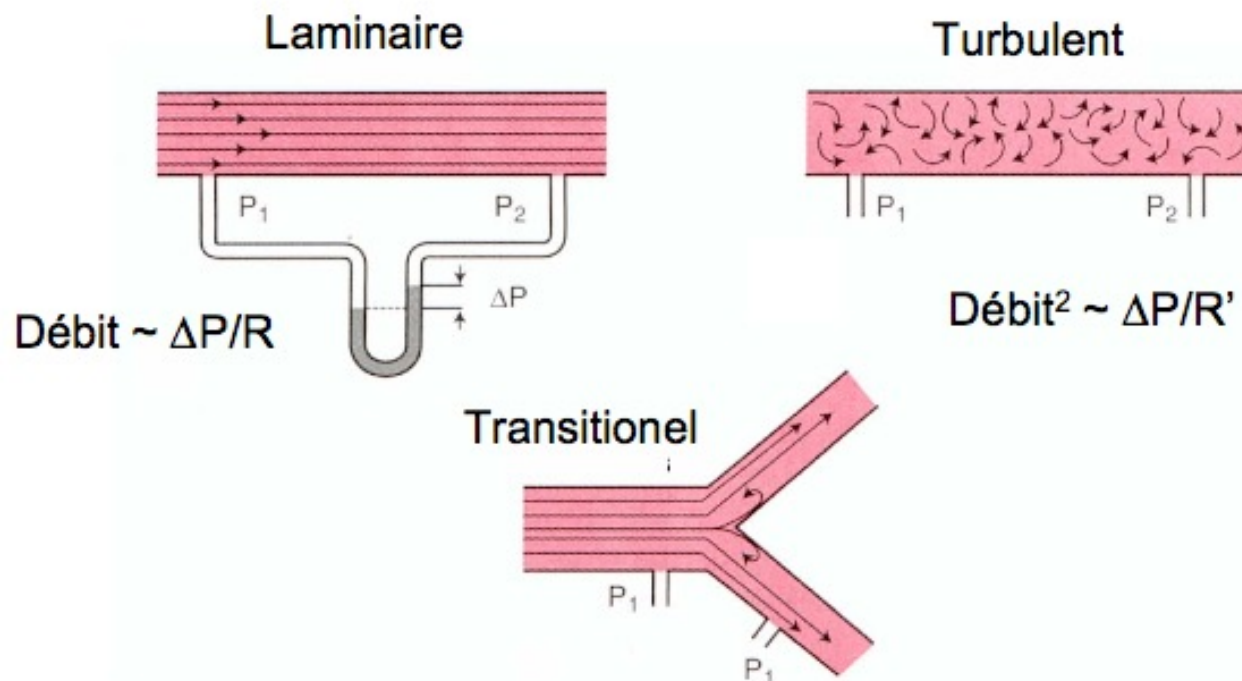
- Ventilation = condition **dynamique**
- L'activité des muscles respiratoires doit
 - vaincre l'élasticité pulmonaire (2/3 au repos)
 - vaincre la **résistance du système respiratoire au passage de l'air** (1/3 au repos)
 - résistances tissulaires ($\approx 20\%$): frottements du tissu pulmonaire
 - résistances des voies aériennes ($\approx 80\%$): résistance à l'écoulement des molécules

Résistances pulmonaires

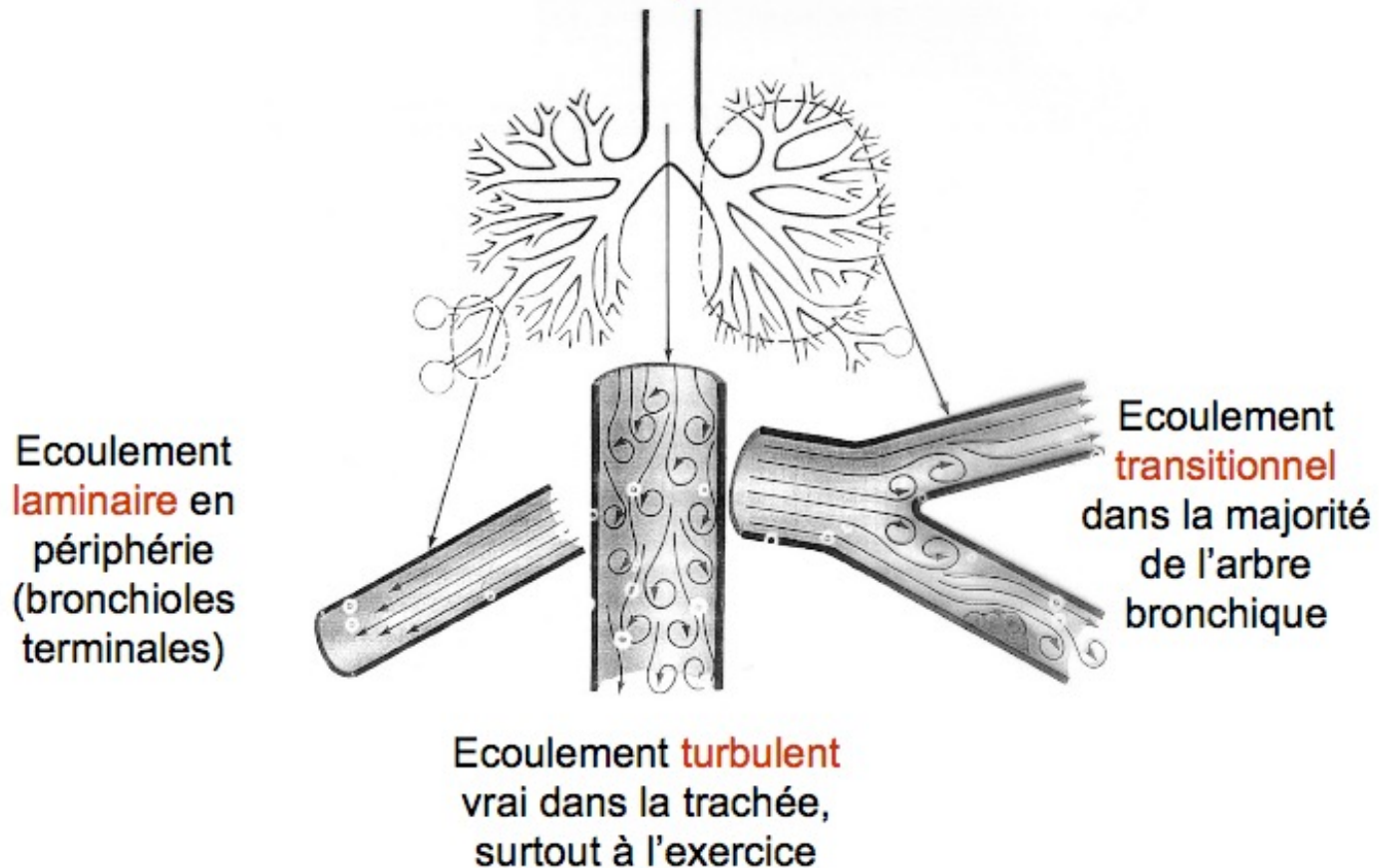
- Ecoulement d'un fluide dans un système de conduction
 - Pression
 - gradient de pression ($P_{\text{alv}} - P_{\text{atm}}$) → débit aérien
 - Débit
 - quantité d'air qui circule dans les VA/unité de temps
 - Résistance
 - difficulté à laquelle l'air se heurte pour circuler entre 2 points des VA sous l'action d'une ΔP donnée

Résistances pulmonaires

- Ecoulement d'un fluide



Résistances pulmonaires



Résistances pulmonaires

Ecoulement aérien

- Modélisation
↳ écoulement **transitionnel**

$$\Delta P = R_1 \cdot \dot{V} + R_2 \cdot \dot{V}^2$$

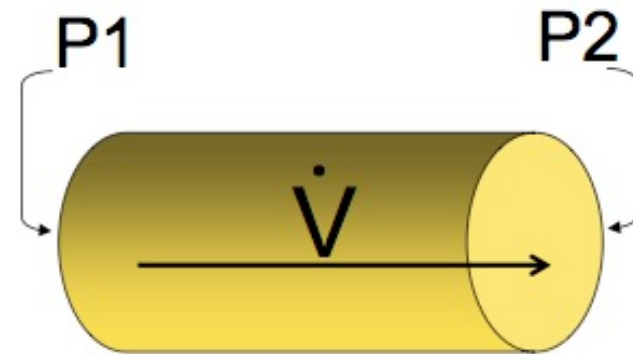
- Détection des modifications pathologiques
↳ approximation à un écoulement **laminaire**

$$\Delta P = R_1 \cdot \dot{V}$$

Résistances pulmonaires

- Fluide

- viscosité η
- densité ρ
- conduit de longueur l
- rayon r



- En écoulement laminaire

$$\dot{V} = \frac{\Delta P^*}{R} \quad R = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$$

* Loi de Poiseuille

Résistances pulmonaires

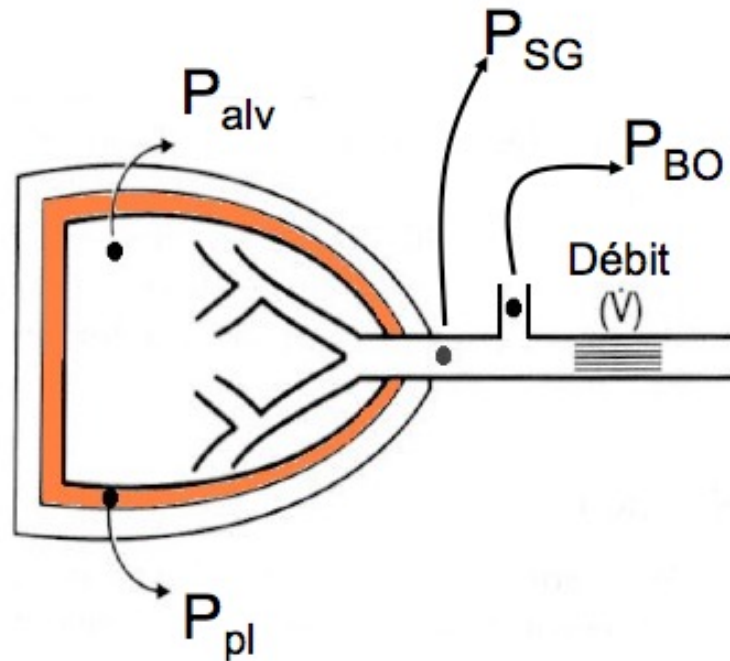
- Mesure des résistances
 - pulmonaires totales
 - résistance due à l'écoulement de l'air dans les VA + résistances dues au tissu pulmonaire
 - des voies aériennes totales
 - résistance due à l'écoulement de l'air dans les VA
 - des voies aériennes supérieures (= supraglottique)
 - résistance due à l'écoulement de l'air dans les VAS
 - possibilité de mesurer cette R à différents niveaux

Résistances pulmonaires

- Principe de la mesure

- on suppose l'écoulement **laminaire**
- on **mesure** le débit et les variations de pression
- on **calcule** la résistance:

$$R = \frac{\Delta P}{\dot{V}}$$

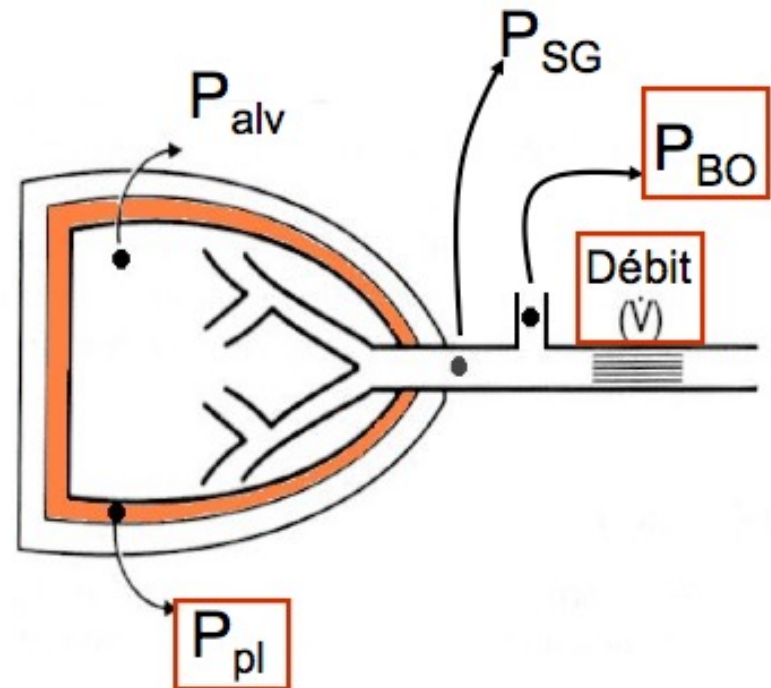


Résistances pulmonaires

- Mesure des **résistances pulmonaires totales**

$$RPT = \frac{P_{pl} - P_{BO}}{\dot{V}}$$

- nécessite la mesure de la **pression œsophagienne**, de la pression buccale et du débit

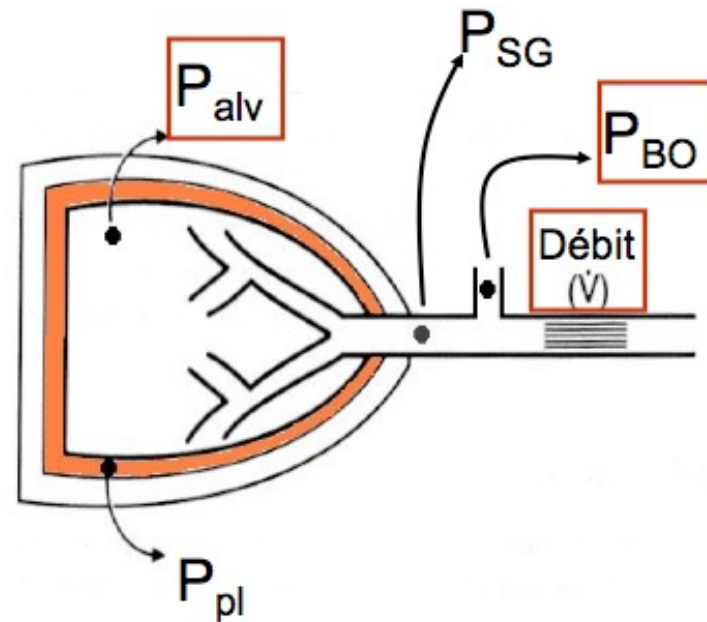


Résistances pulmonaires

- Mesure de la **résistance des voies aériennes**

$$R_{VA} = \frac{P_{alv} - P_{BO}}{\dot{V}}$$

- nécessite la mesure de la **pression alvéolaire**, de la pression buccale et du débit

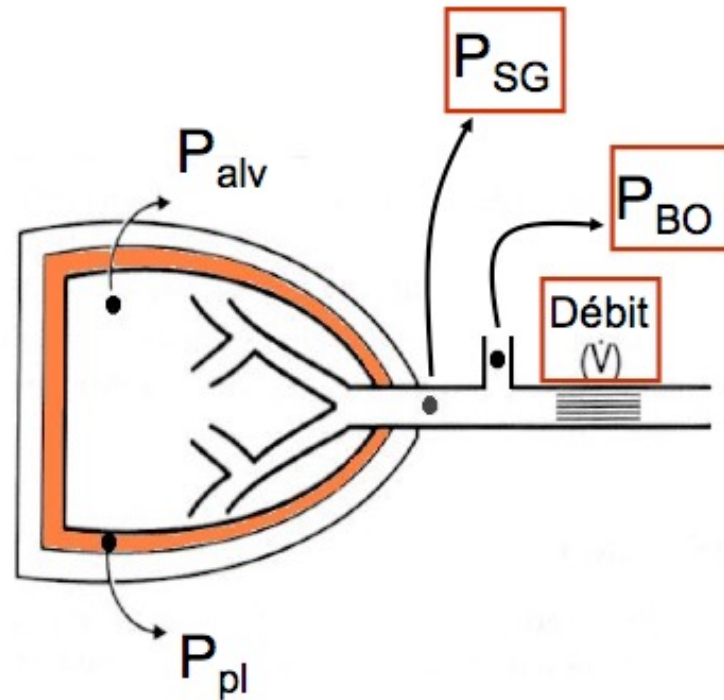


Résistances pulmonaires

- Mesure de la **résistance des VAS ou supraglottique**

$$R_{SG} = \frac{P_{SG} - P_{BO}}{\dot{V}}$$

- nécessite la mesure de la **pression pharyngée**, de la pression buccale et du débit



Résistances pulmonaires

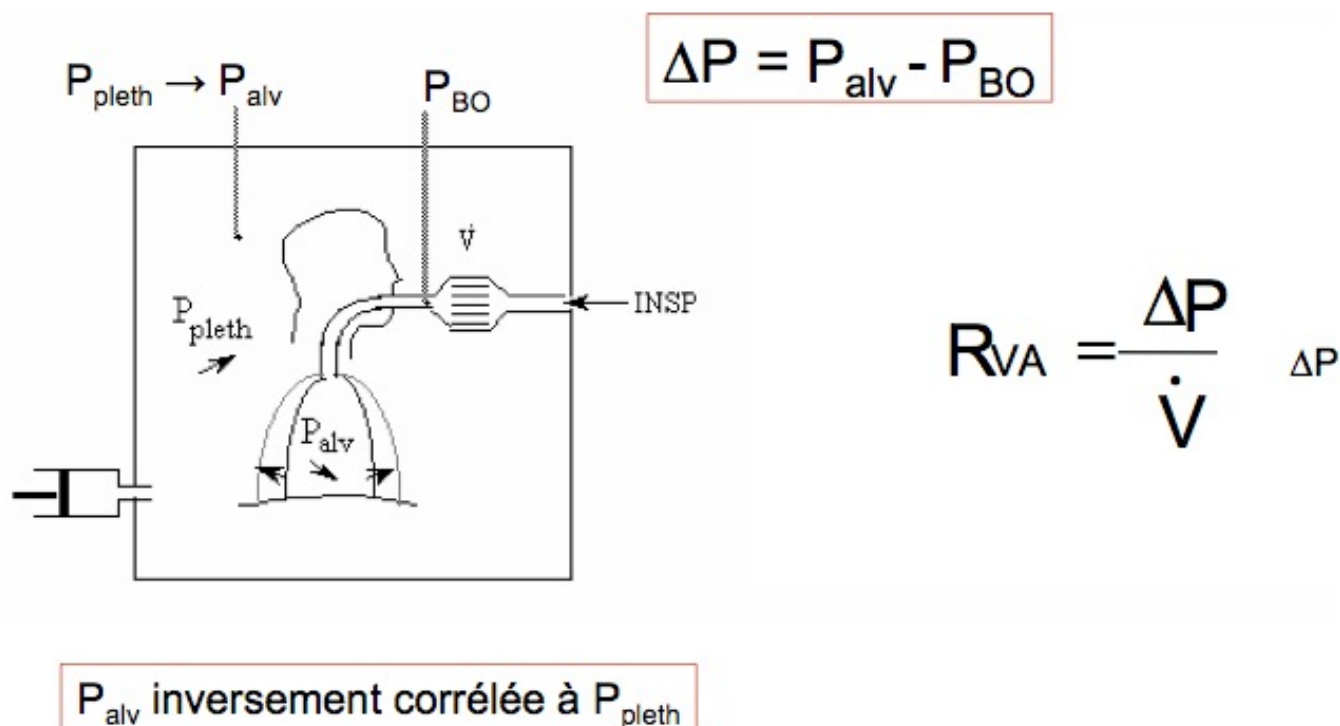
- Le calcul des RPT et de la résistance pharyngée nécessite
 - Mesure du **débit** avec un pneumotachographe
 - Mesure de la **pression**
 - pleurale → cathéter œsophagien
 - pharyngée → cathéter supra-glottique
 - buccale

Résistances pulmonaires

- Le calcul de la résistance des voies aériennes nécessite
 - Mesure du **débit** avec un pneumotachographe
 - Mesure de la **pression alvéolaire** par pléthysmographie
 - résistances → conditions dynamiques
 - $P_{\text{alv}} \neq P_{\text{BO}}$

Résistances pulmonaires

Mesure de la résistance des voies aériennes



Résistances pulmonaires

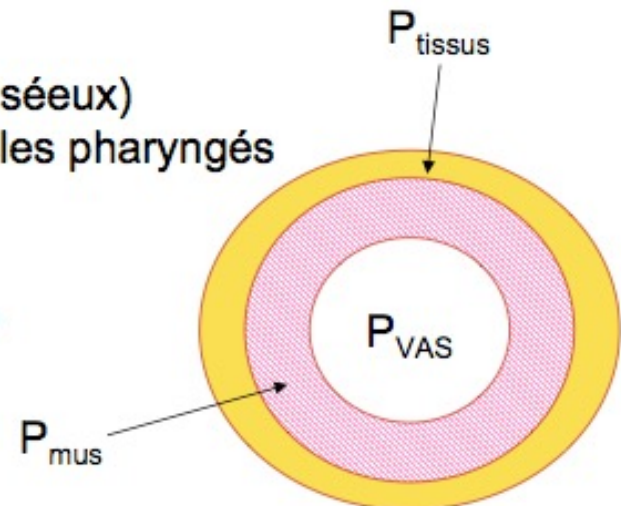
- Les voies aériennes dont le diamètre est inférieur à 2 mm ne contribuent que 10% à la R_{VA}
 - La diminution du calibre est compensée par
 - l'augmentation ++ de la surface de section totale
 - le faible débit aérien
 - On estime que les résistances sont en parallèle et non plus en série: $1/R_{tot} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$

Résistances pulmonaires

- La résistance des voies aériennes est liée
 - au contrôle du **calibre** (R proportionnelle à $1/r^4$)
 - pharyngé pour les VAS
 - bronchique et bronchiolaire pour les VAI
 - à des mécanismes
 - passifs / actifs
 - réversibles / irréversibles
 - stables / cycliques

Résistances pulmonaires

- Calibre des **VA Supérieures** sous le contrôle de
 - Facteurs **mécaniques**
 - Pression transpulmonaire
 - Gravité
 - Interaction des groupes musculaires pharyngés
 - Facteurs **nerveux**
 - Réflexes (dilatateur du pharynx, nauséux)
 - Activité des nerfs moteurs des muscles pharyngés
 - Facteurs **anatomiques**
 - Rétrécissement du calibre pharyngé



Résistances pulmonaires

- Calibre des **VA Inférieures** sous contrôle de

- Facteurs **mécaniques**

- Traction latérale par le tissu conjonctif

$$\hookrightarrow R_{CPT} < R_{CRF}$$

$$\hookrightarrow R_{Apex} < R_{Base}$$

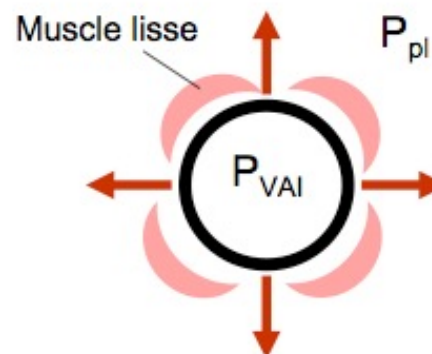
$$\hookrightarrow R_{INSP} < R_{EXP}$$

- Facteurs **nerveux et chimiques**

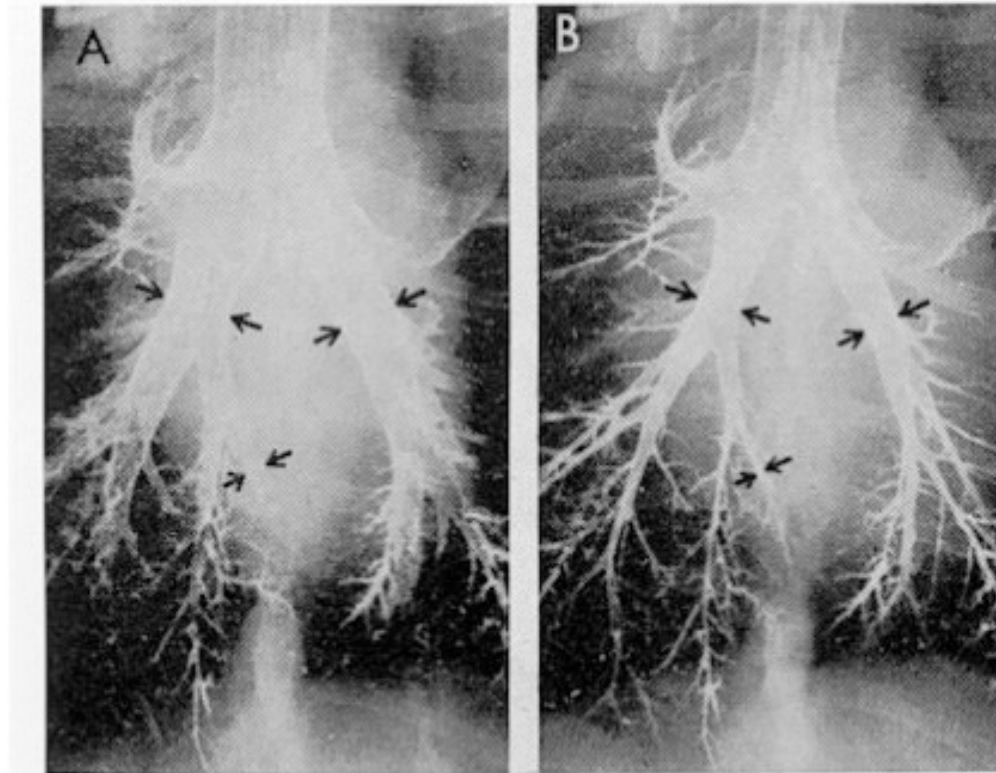
- SN sympathique: bronchodilatation
- SN parasympathique: bronchoconstriction
- Leucotriènes, histamine, irritants (SO_2 , poussières, fumées...)

- Facteurs **anatomiques**

- Obstruction de la lumière bronchique



Résistances pulmonaires

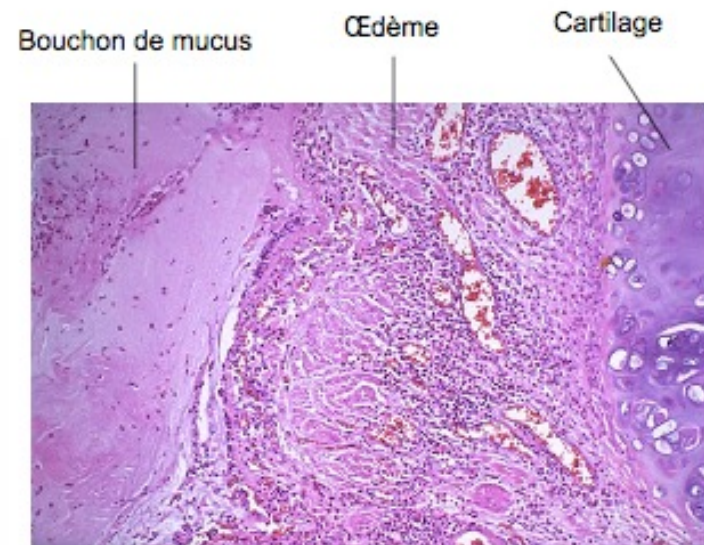
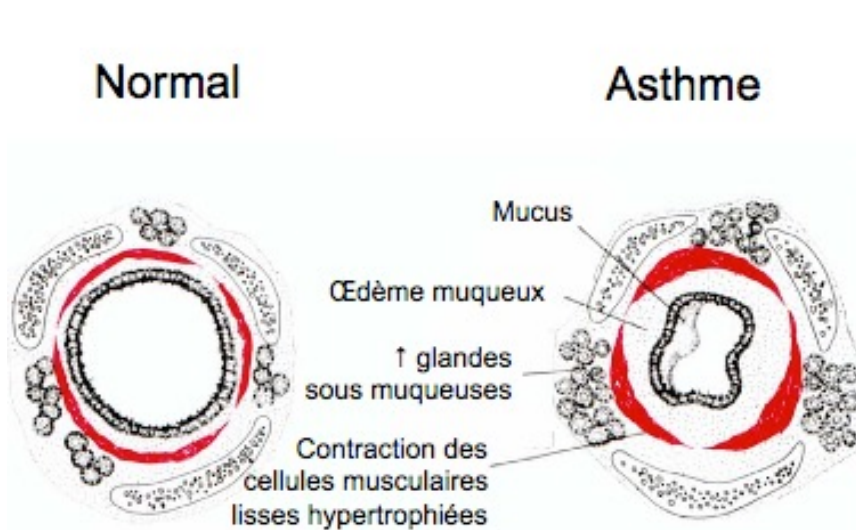


Avant

Après stimulation parasympathique:
bronchoconstriction

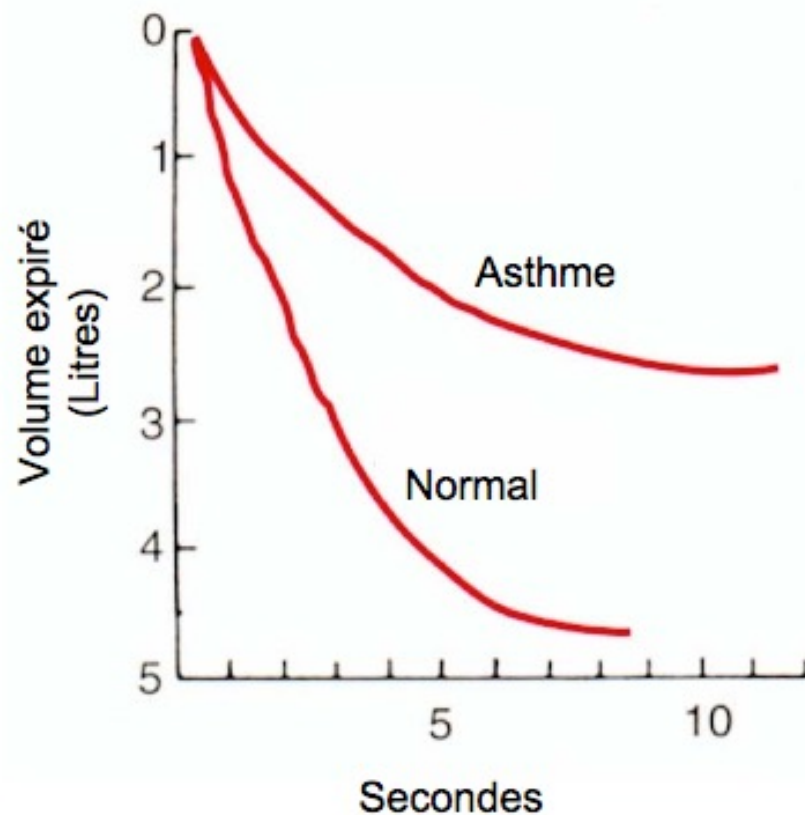
Résistances pulmonaires

- Anomalie des résistance des **VA inférieures** → troubles ventilatoires obstructifs



Relation débit/volume

Courbe d'expiration forcée spirométrique



Propriétés mécaniques

- Propriétés résistives
- Propriétés élastiques
 - Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires
 - Généralités
 - Elasticité thoracique
 - Elasticité pulmonaire
 - Compliance thoraco-pulmonaire
 - Mesure
 - Analyse

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Poumon et cage thoracique = structures élastiques
- Etirement ou compression d'une structure élastique
 - ↳ pression qui tend à ramener la structure à l'état initial

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

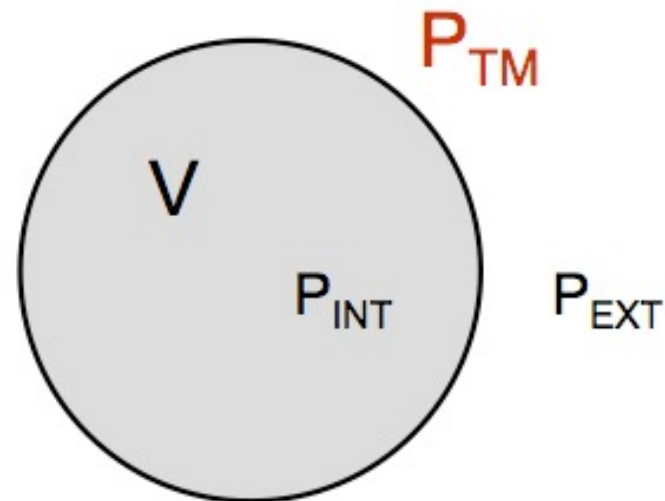
- Dans une structure élastique:
 - le volume est directement proportionnel à la différence de pression de part et d'autre de la paroi
 - $\Delta P = \text{pression transmurale } (P_{TM}) = \text{pression de distension pariétale}$

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Volume V
proportionnel à ΔP de
part et d'autre de la
paroi = **pression**
transmurale (P_{TM})

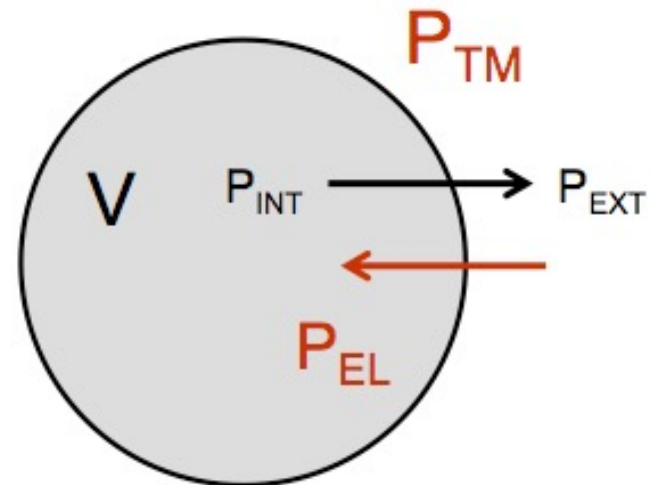
- Par convention

$$P_{TM} = P_{INT} - P_{EXT}$$



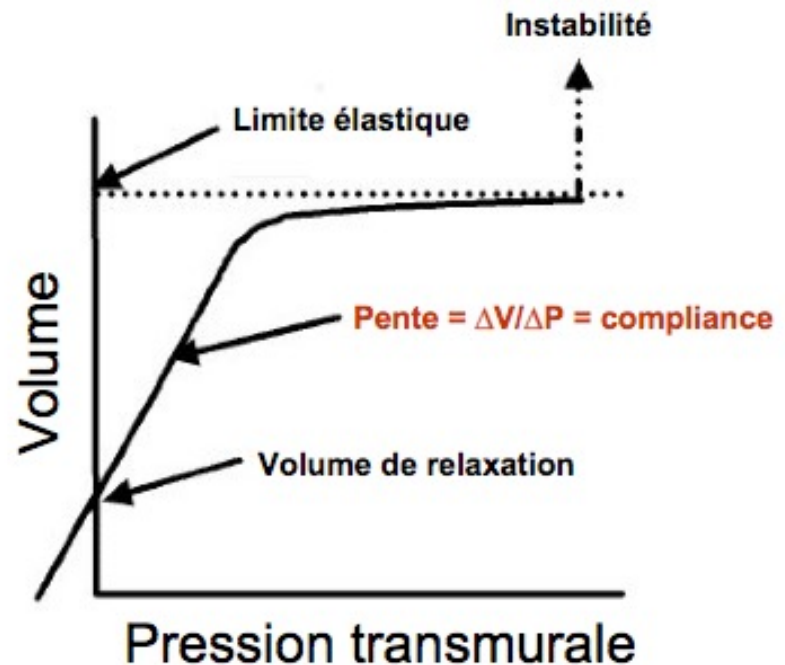
Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- A chaque volume V
 - PTM s'oppose à la pression de rétraction élastique (PEL)
 - si $|PTM| > |PEL|$, $V \uparrow$
 - si $|PTM| < |PEL|$, $V \downarrow$
 - si $|PTM| = |PEL|$, équilibre



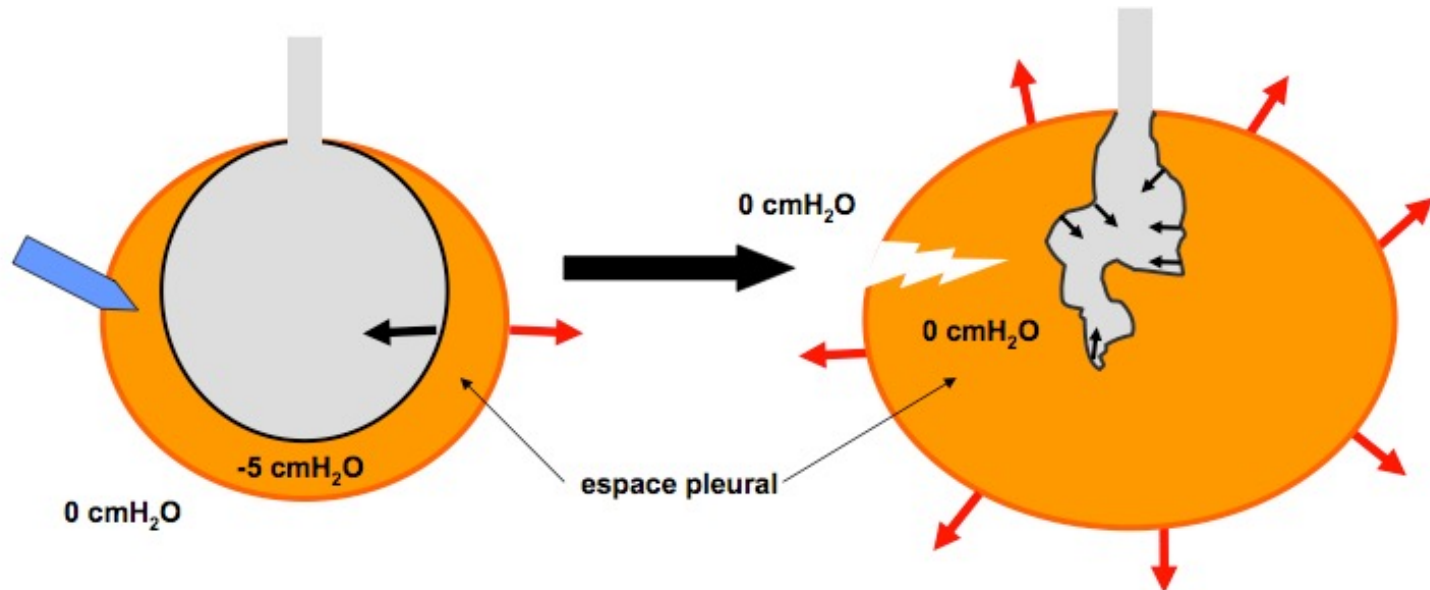
Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Une structure élastique est caractérisée par la **courbe pression transmurale – volume**
- Structures biologiques: volume de relaxation $\neq 0$
- Pour des P_{TM} basses: **collapsus**
- Pour des P_{TM} hautes: **rupture**
- Pente de la courbe = **compliance**
 - $\rightarrow$ distensibilité de la structure
 - $= 1/\text{élastance} \rightarrow$ élasticité de la structure



Propriétés élastiques thoracopulmonaires

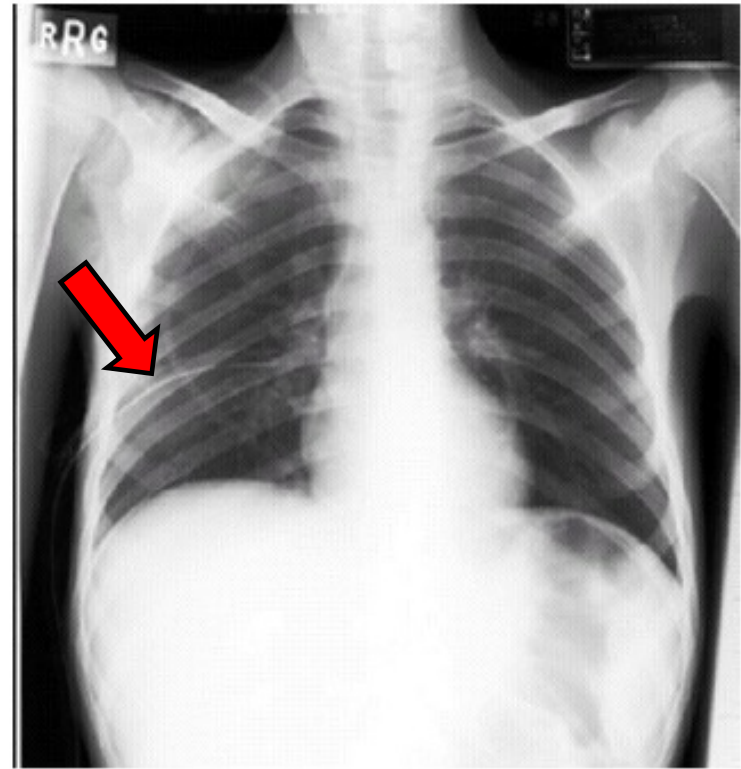
- Mise en évidence de l'élasticité thoraco-pulmonaire



Propriétés élastiques thoracopulmonaires



Pneumothorax droit



Après pose d'un drain

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

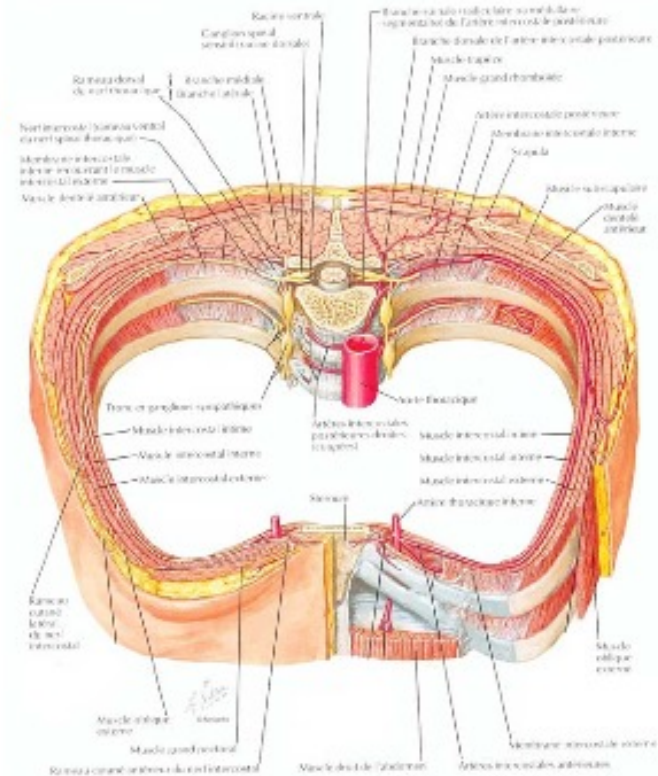
- Elasticité de la cage thoracique:
 - facteurs **anatomiques**
- Elasticité du poumon:
 - facteurs **histologiques**
 - facteur **physicochimique**

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Propriétés élastiques de la cage thoracique

– liées à des facteurs anatomiques

- squelette ostéo-cartilagineux
- muscles
- ligaments



Propriétés élastiques du poumon

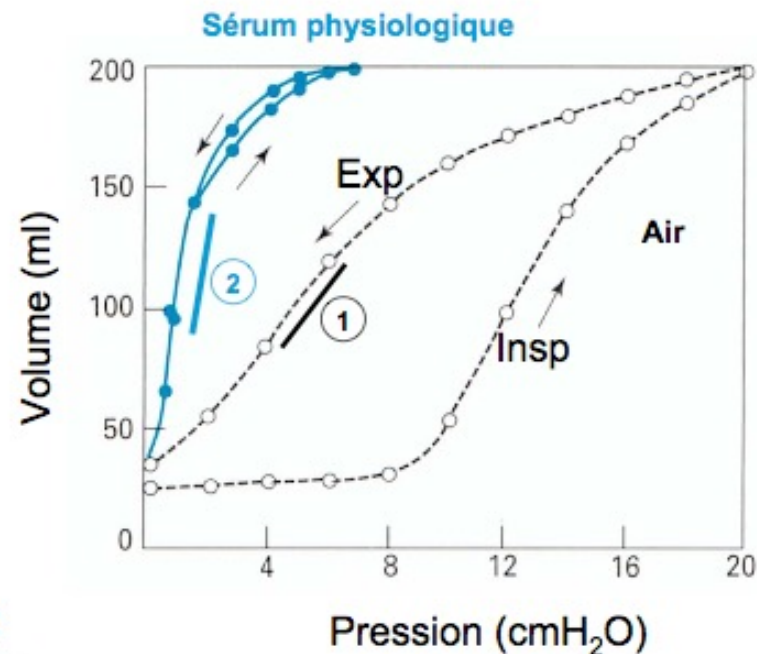
- Propriétés élastiques du poumon
 - Facteurs **histologiques**
 - Fibres élastiques et collagène de l'interstitium et de l'arbre bronchique
 - Structure alvéolaire/contenu liquidien
 - forces élastiques du **tissu pulmonaire** ($\approx 50\%$)

Propriétés élastiques du poumon

- Propriétés élastiques du poumon
 - Facteur physicochimique
 - forces élastiques dues à la tension superficielle ($\approx 50\%$)

Propriétés élastiques du poumon

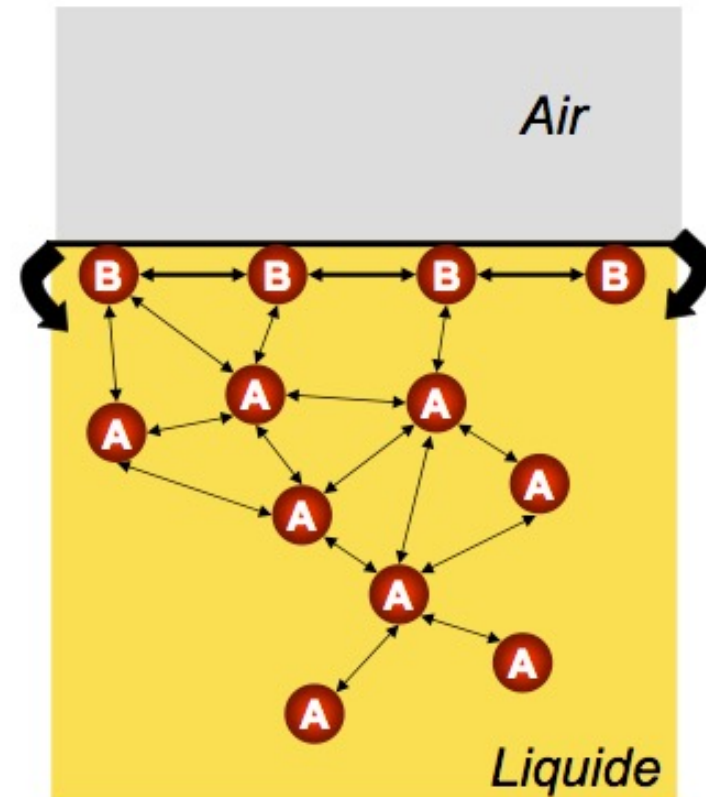
- Mise en évidence du rôle de la tension superficielle
 - Poumon isolé de chat
 - Distension du poumon avec air ou liquide
 - Compliance avec air ① $\ll$ compliance avec liquide ②



Meilleure compliance en présence de surfactant

Propriétés élastiques du poumon

- Dans un liquide
 - les molécules (A) sont soumises à des forces d'attraction qui s'annulent
- A l'interface air/liquide
 - les molécules (B) sont attirées préférentiellement
 - les unes vers les autres
 - vers l'intérieur



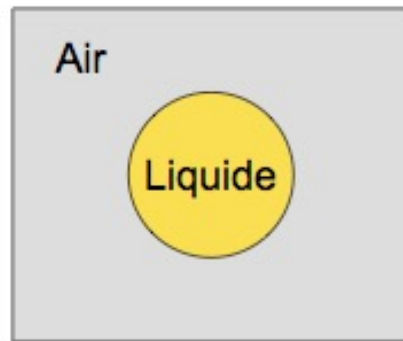
Propriétés élastiques du poumon

- Interface air/liquide → se rétracte pour atteindre une surface minimum

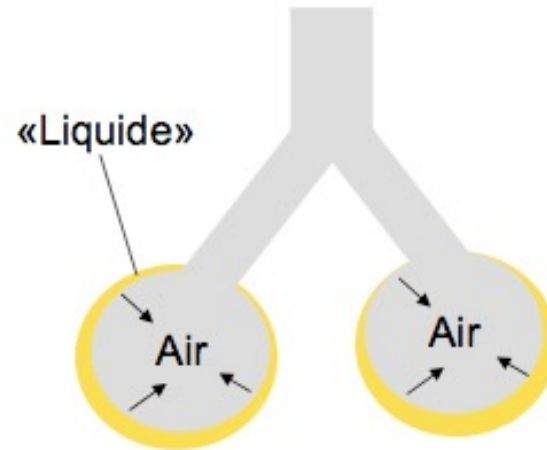


- **Tension superficielle** (T , dyn/cm) = force superficielle de contraction d'un liquide grâce à laquelle la surface air/liquide tend à être la plus réduite possible

Propriétés élastiques du poumon



Goutte d'eau

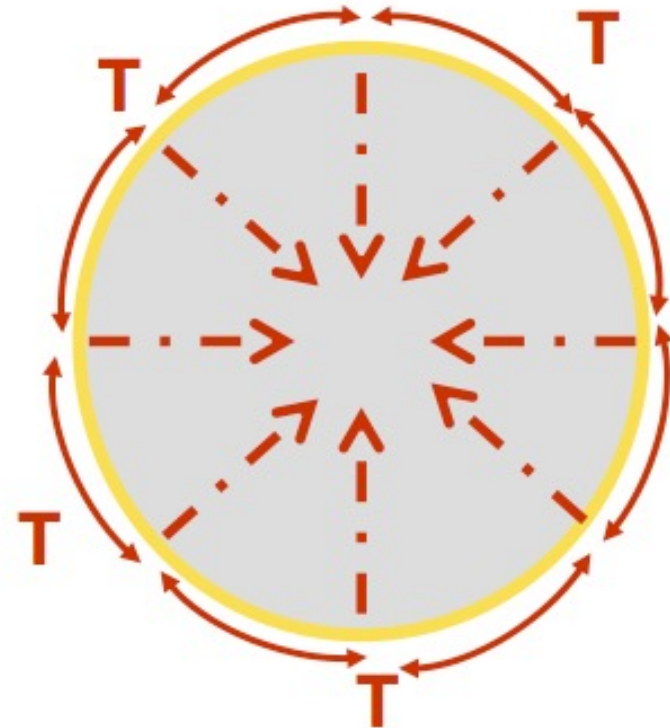


Alvéoles

- Surface alvéolaire des pneumocytes recouverte d'un mince film aqueux en contact avec le gaz alvéolaire → interface air/liquide
- Tension superficielle élevée

Propriétés élastiques du poumon

- Tension superficielle d'une sphère
 - effet net de la tension superficielle sur la paroi → **collapsus** de la sphère

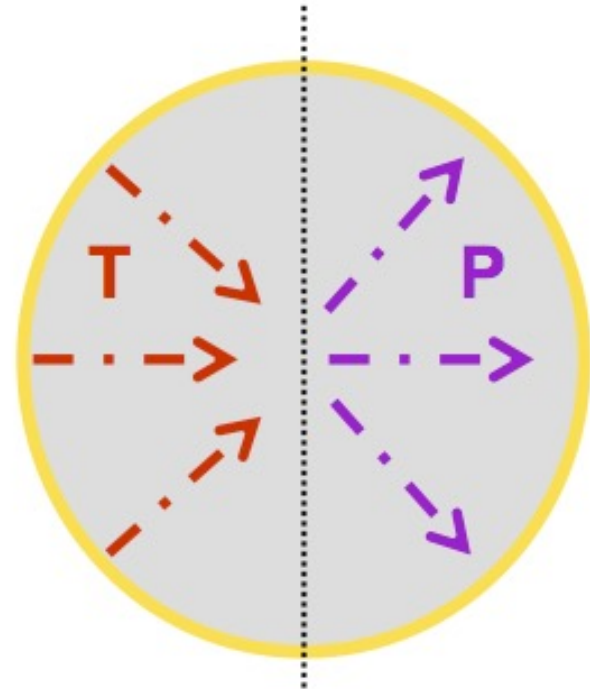


Propriétés élastiques du poumon

- Tension superficielle d'une sphère distensible
 - Rayon r , Pression de distension P
 - Equilibre atteint lorsque:

$$P = \frac{2T}{r}$$

- loi de Laplace



Propriétés élastiques du poumon

- Ajout d'un **agent tensio-actif** à l'interface air/liquide
 - ↳ ↓ tension superficielle
 - ↳ ↓ force de rétraction de la paroi
- Dans les alvéoles, agent tensio-actif = **surfactant**
= Lipoprotéine complexe
 - Phospholipides (DiPalmitoyl PhosphatidylCholine, DPPC)
 - Apoprotéines
 - Ions calcium

Propriétés élastiques du poumon

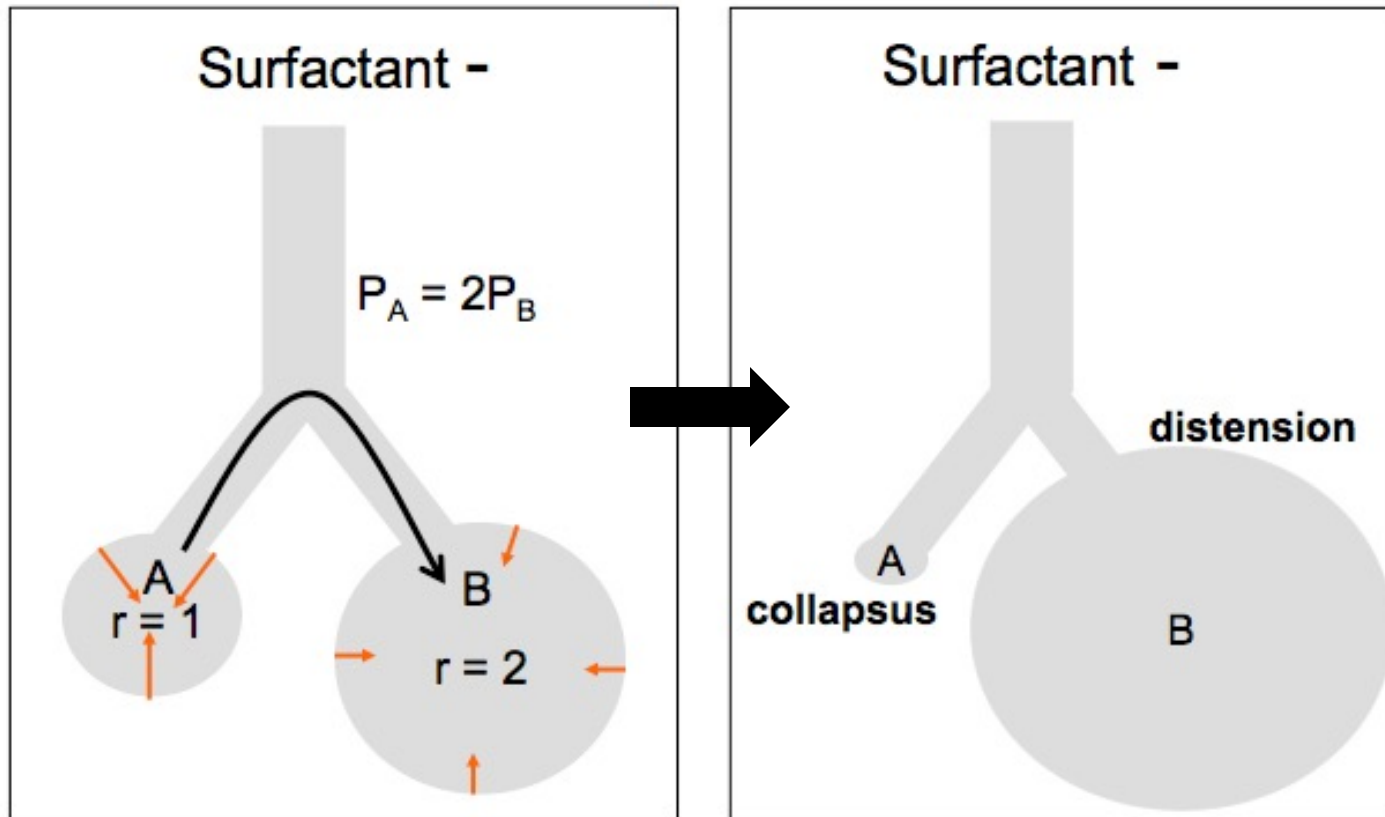
- Rôles physiologiques:
 - le surfactant diminue la tension superficielle alvéolaire donc augmente la compliance pulmonaire ($\Delta\text{volume}/\Delta\text{pression}$)
 - stabilise les alvéoles de taille différentes
 - diminue la quantité de liquide filtré hors des capillaires et rend la surface alvéolaire imperméable aux protéines

Propriétés élastiques du poumon

- Propriétés tensio-actives du surfactant
 - varient en fonction du rayon alvéolaire (de l'épaisseur de la couche de surfactant)
 - de façon à ce que le rapport $2T/r$ soit constant)

Propriétés élastiques du poumon

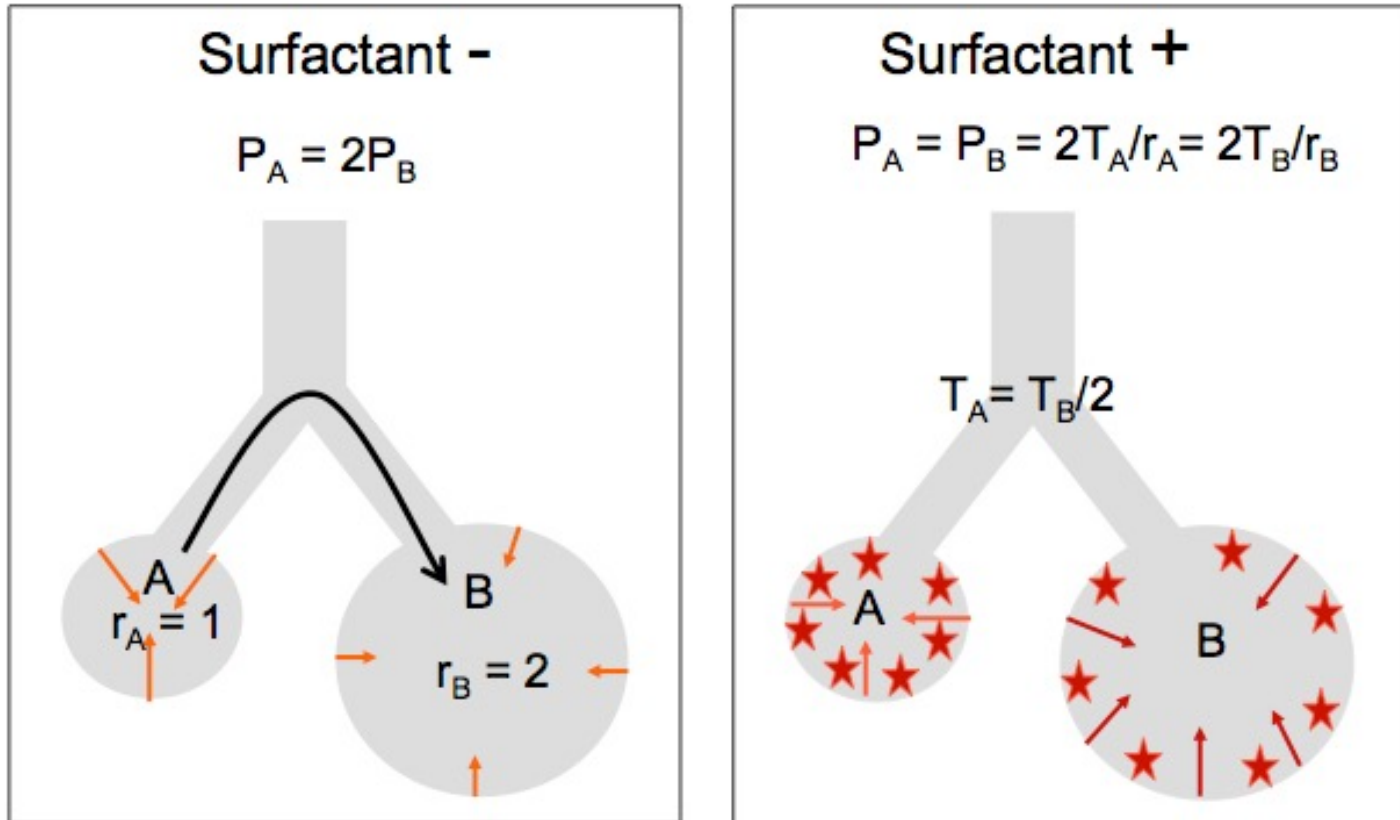
Loi de Laplace: $P = 2T/r$



Sans surfactant, T est constante

Propriétés élastiques du poumon

Loi de Laplace: $P=2T/r$, mais T varie en fonction de r



Le surfactant abaisse plus la TS dans les petits alvéoles que dans les gros

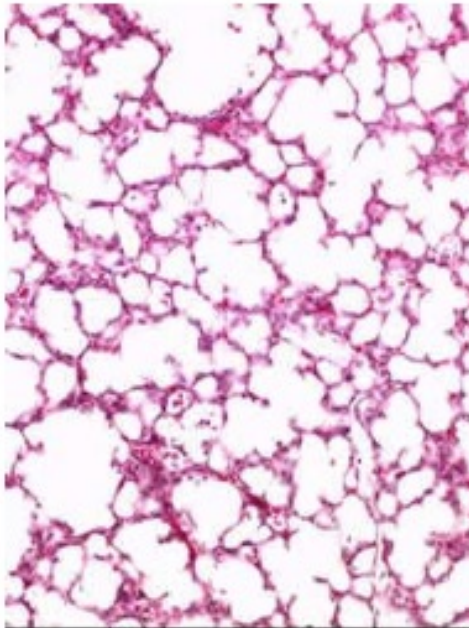
Propriétés élastiques du poumon

- En présence de surfactant, la tension superficielle est
 - élevée à hauts volumes pulmonaires
 - augmente la pression de rétraction élastique du poumon
 - basse à bas volumes pulmonaires
 - stabilise les alvéoles, empêche leur collapsus

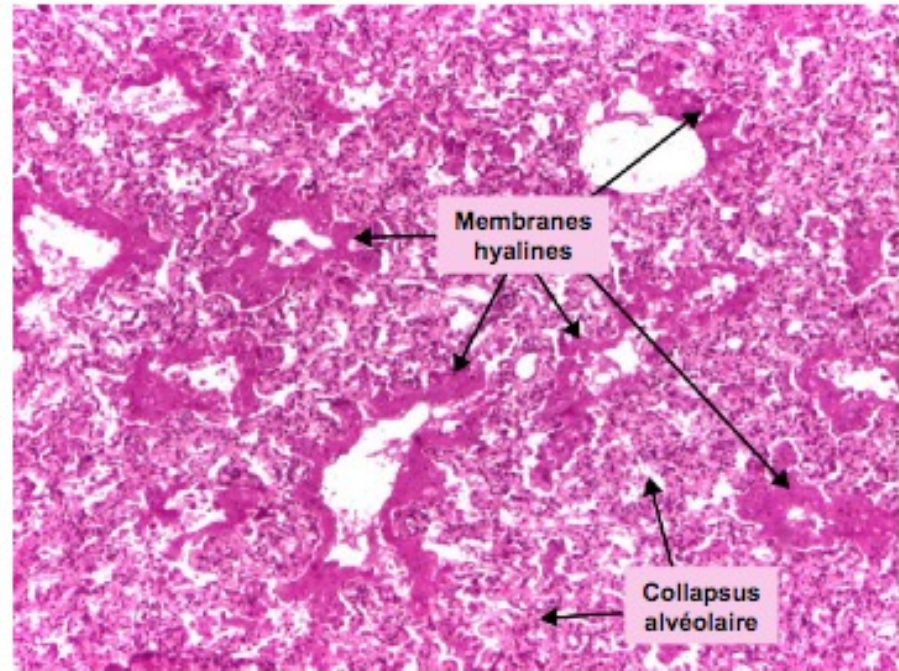
Propriétés élastiques du poumon

- Déficit en surfactant: détresse respiratoire du prématuré
 - PN II vers 22 SA, surfactant adéquat vers 36 SA
 - Déficit en surfactant responsable de
 - collapsus/distension alvéolaires → mauvaise ventilation pulmonaire
 - diminution de la compliance pulmonaire → travail respiratoire↑
 - Présence de protéines ++ à la surface alvéolaire («membranes hyalines») → mauvais échanges gazeux

Propriétés élastiques du poumon



Nouveau-né à terme



Nouveau-né prématuré

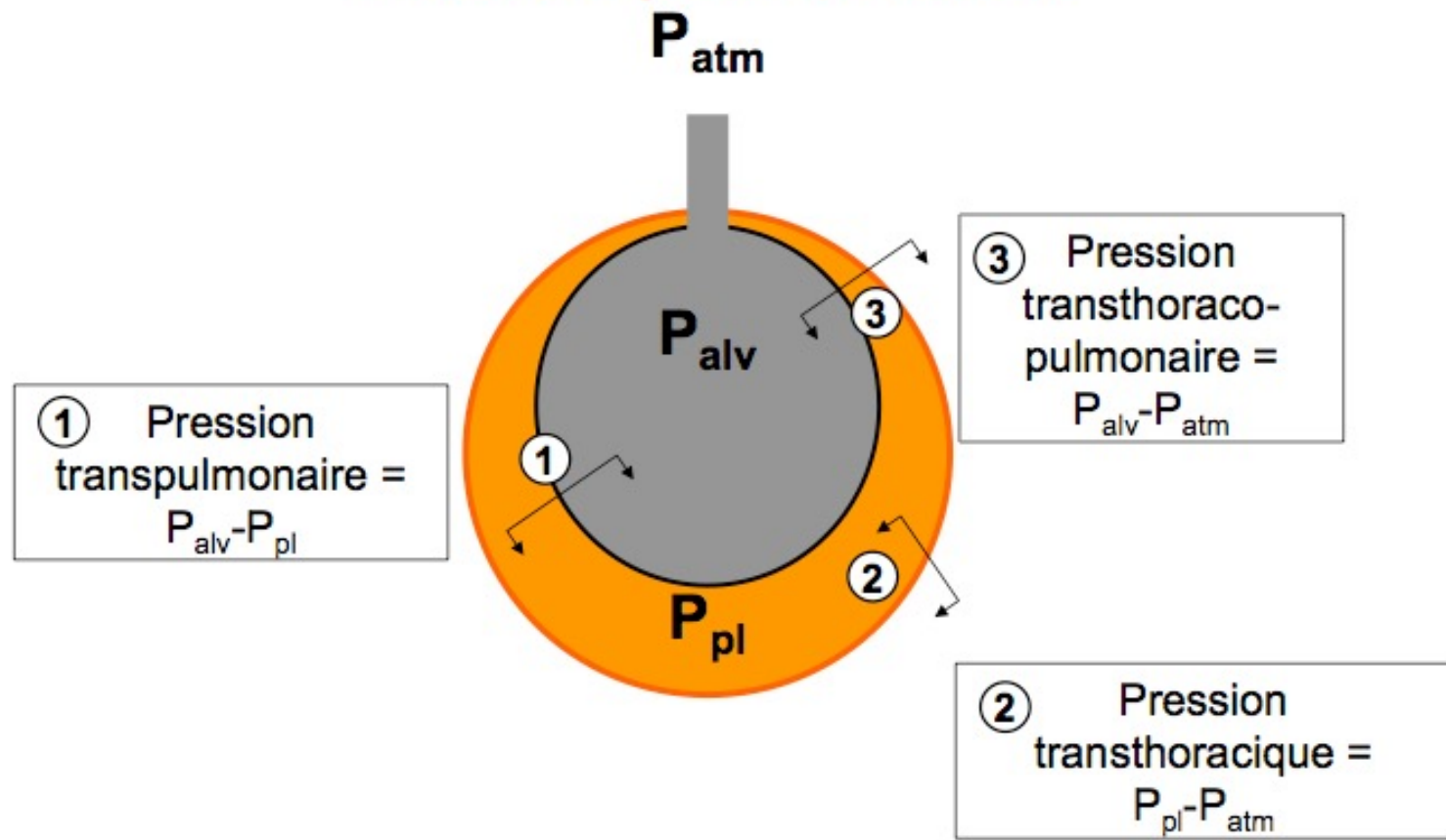
Propriétés mécaniques

- Propriétés élastiques
 - Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires
 - Généralités
 - Elasticité thoracique
 - Elasticité pulmonaire
 - Compliance thoraco-pulmonaire
 - Mesure
 - Analyse

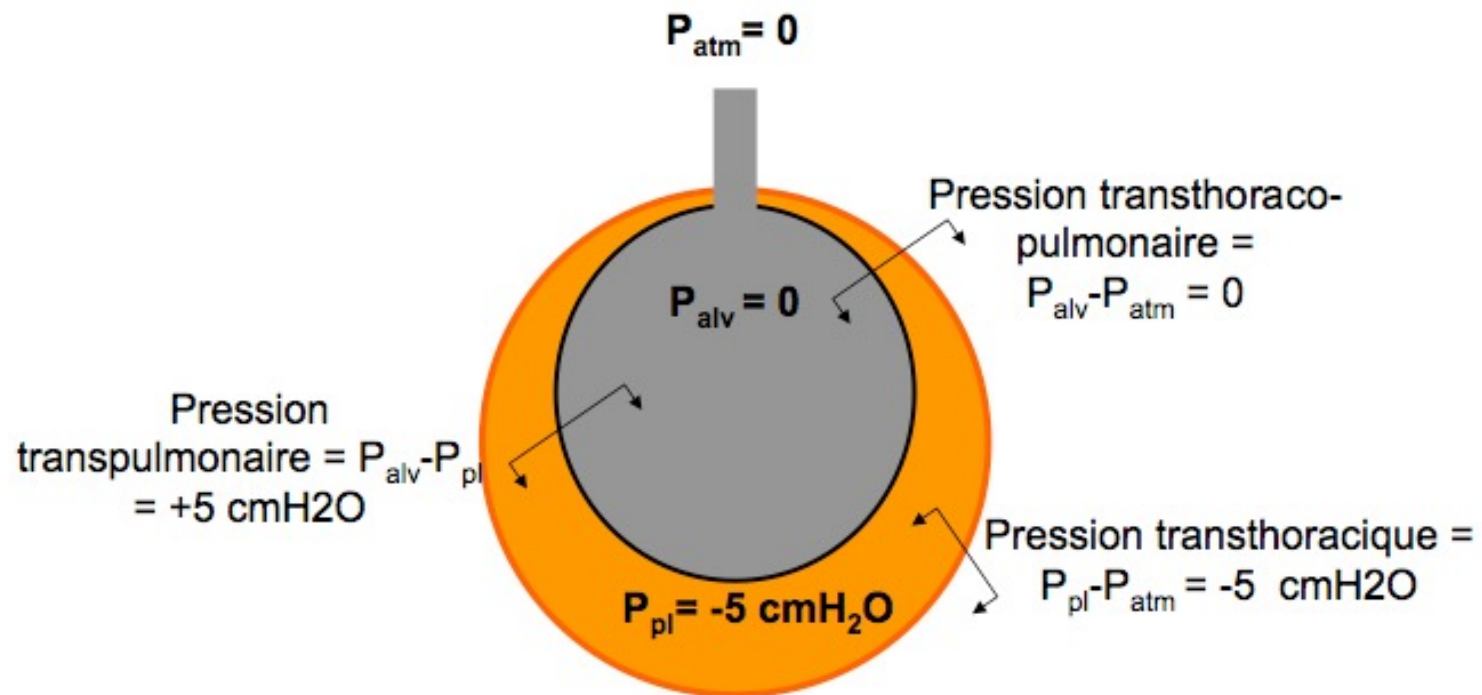
Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Système respiratoire
 - **Volume** impliqué
 - volume pulmonaire
 - **Pressions** impliquées
 - pression atmosphérique (P_{atm})
 - pression alvéolaire (P_{alv})
 - pression pleurale (P_{pl})

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires



Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires



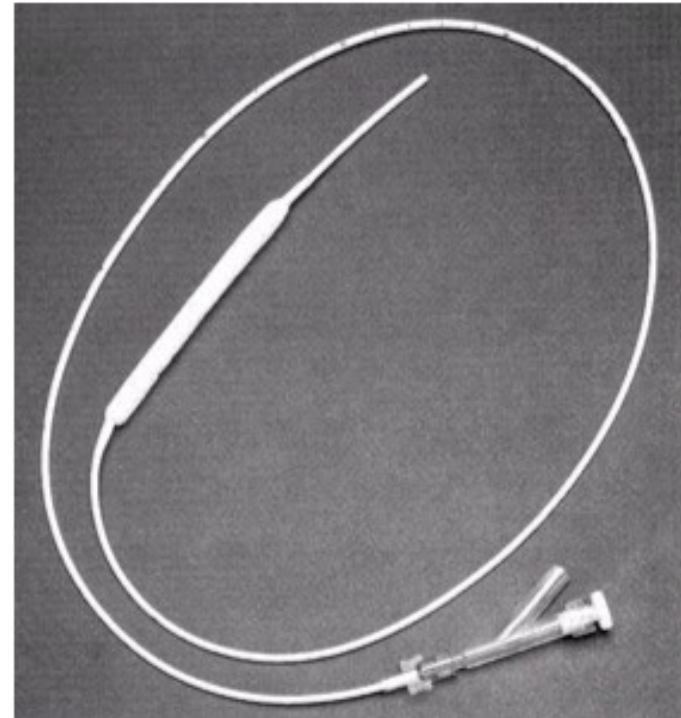
CRF: Pression transmurale du système thoraco-pulmonaire = 0

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Système respiratoire
 - Volume pulmonaire → Spirométrie
 - Pressions
 - pression atmosphérique → Baromètre
 - pression alvéolaire → P buccale au cours d'une apnée
 - pression pleurale → P œsophagienne

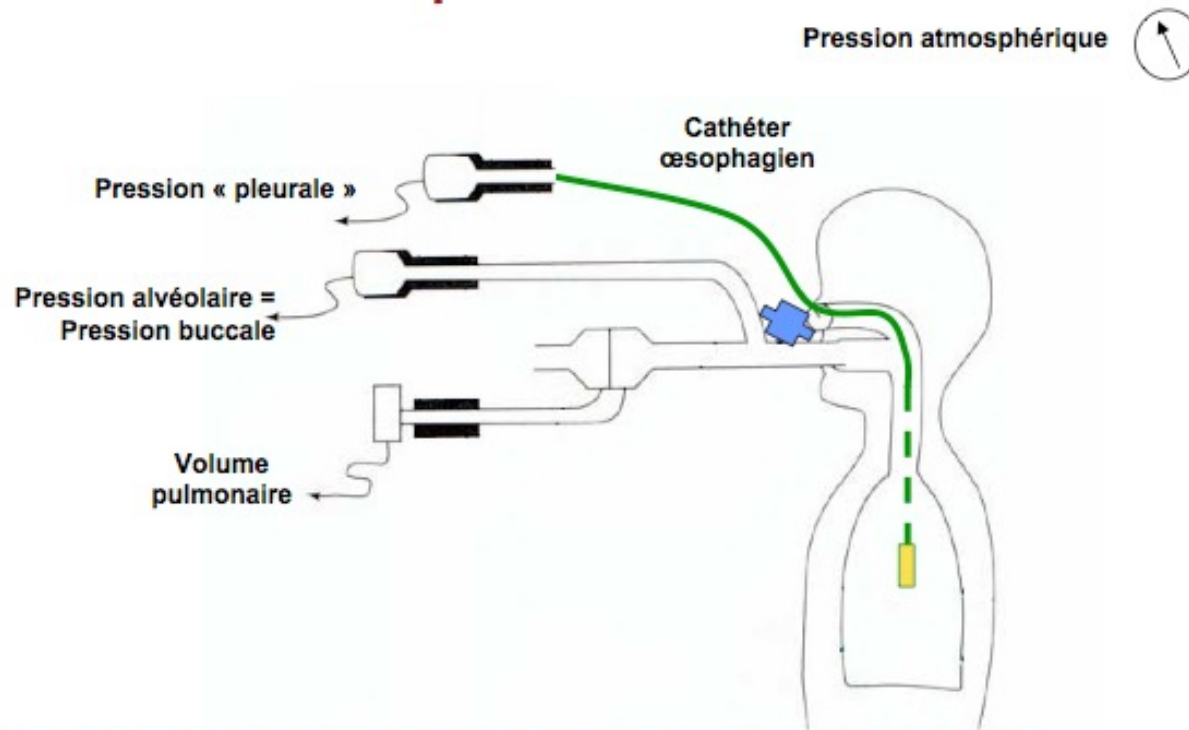
Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Variations de pression pleurale → variations de pression intra-œsophagienne



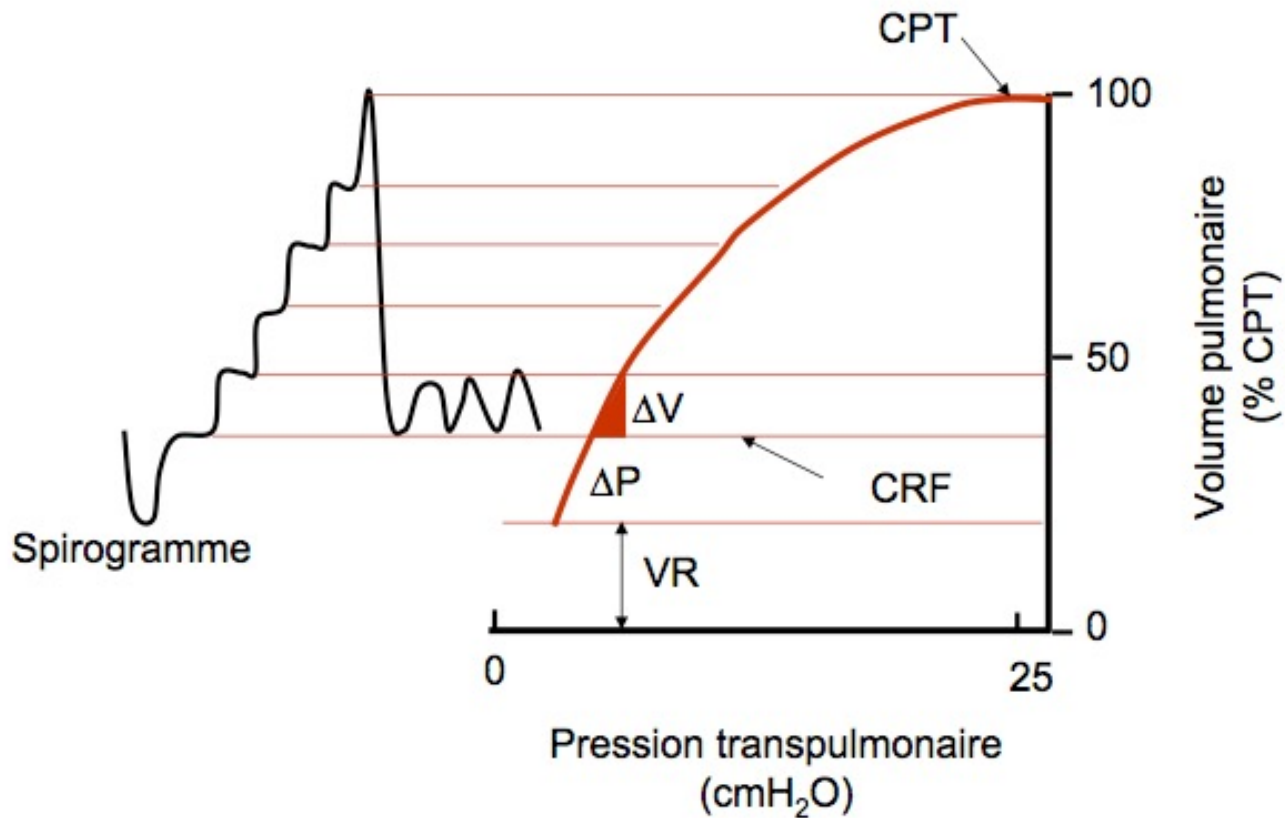
Cathéter de pression
œsophagienne

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires



- Variations du volume pulmonaire par paliers, du VR à la CPT
- A chaque palier, courte apnée ($\rightarrow P_{BO} = P_{alv}$)

Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

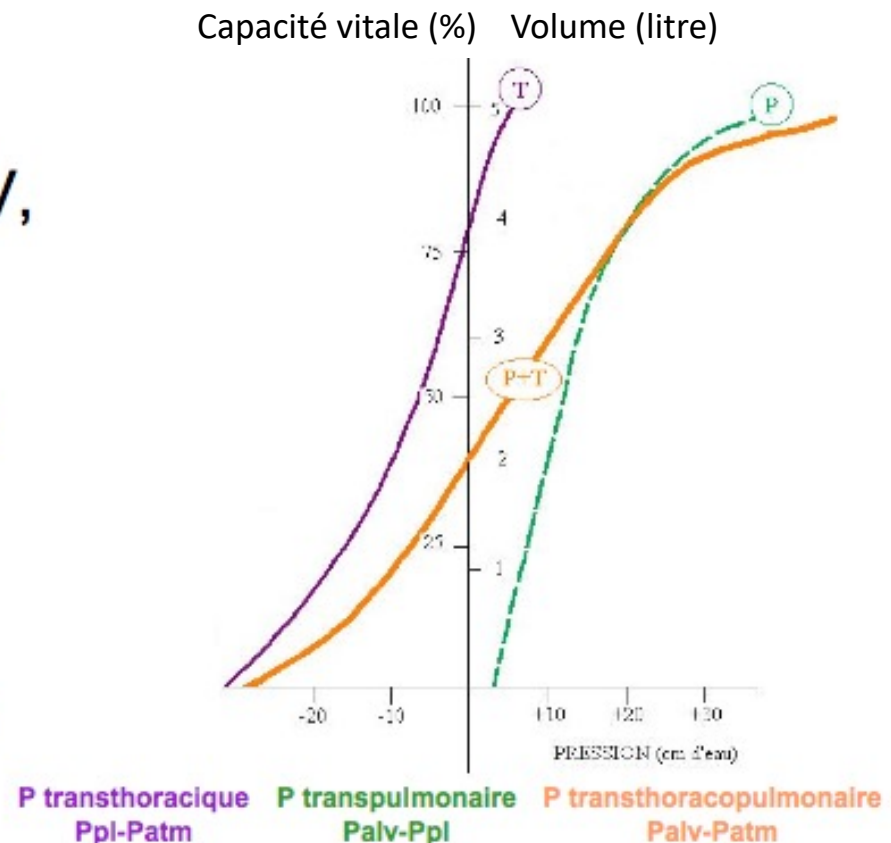


Relation pression/volume dans le système thoraco-pulmonaire

- A chaque palier de volume, on connaît: V , P_{pl} , P_{alv}

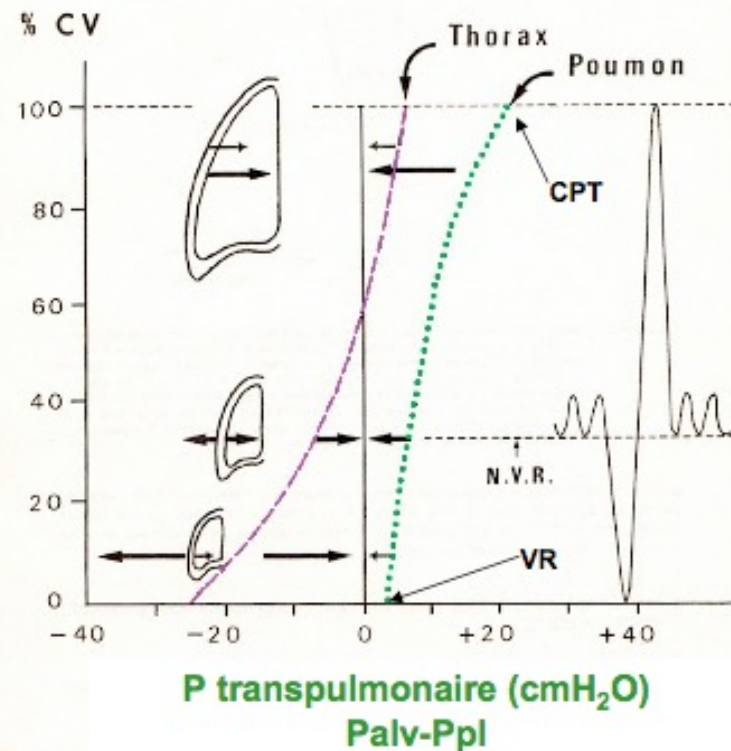
↳ on calcule la courbe pression-volume

- du poumon (P)
- du thorax (T)
- du système (P+T)



Relation pression/volume dans le système thoraco-pulmonaire

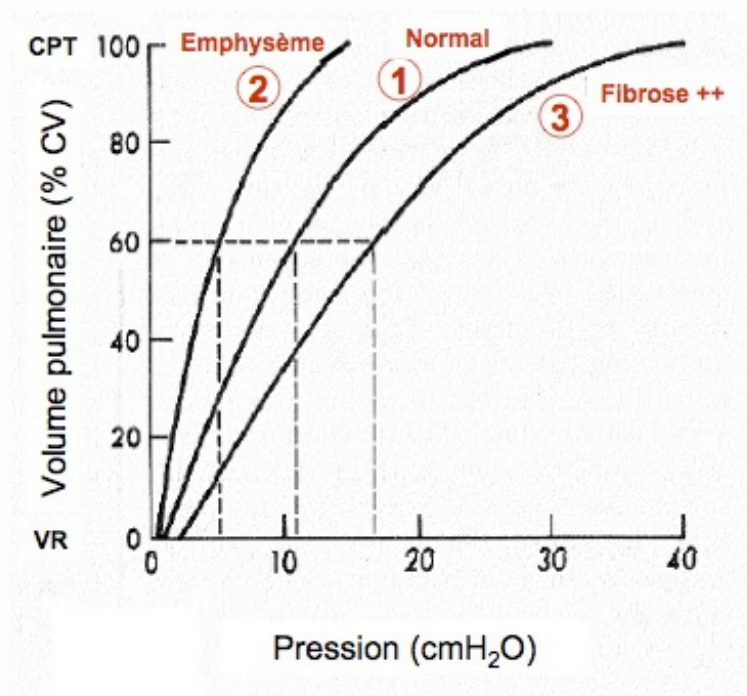
- Compliance **pulmonaire**
 - volume de relaxation du poumon < VR
 - limite élastique atteinte pour 30 cmH₂O à la CPT
 - $C_{pulm} = 200 \text{ ml/cmH}_2\text{O}$
 - augmentée ou diminuée dans plusieurs pathologies respiratoires



Relation pression/volume dans le système thoraco-pulmonaire

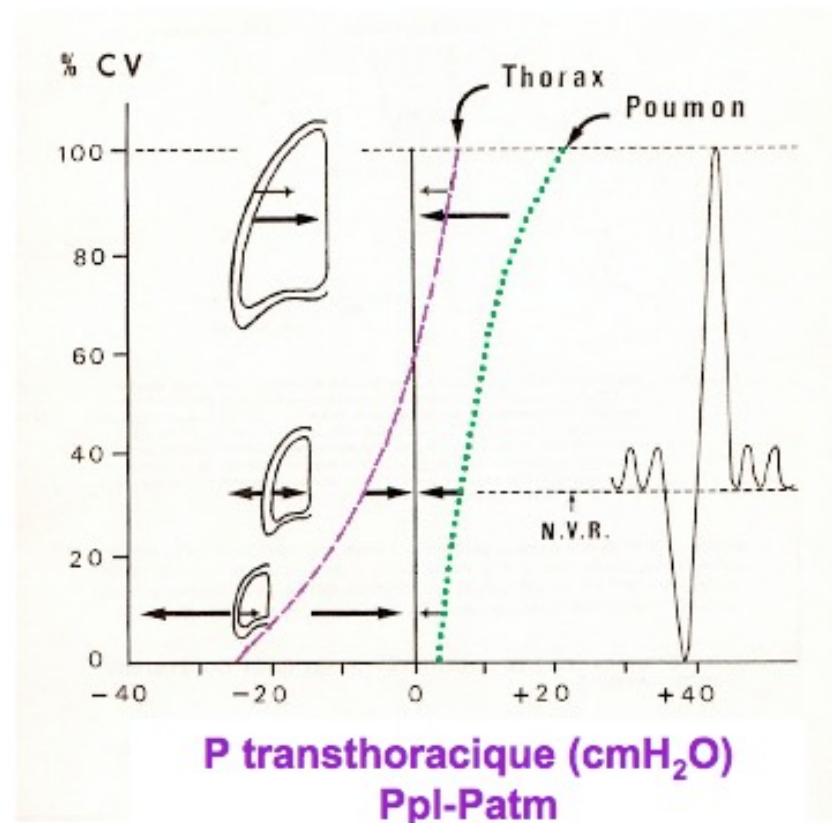
- Compliance pulmonaire en pathologie

1. Sujet **normal**: 200 ml/cmH₂O
(2,5 cmH₂O pour mobiliser un V_T de 500 ml)
2. Sujet atteint d'un **emphysème**: 300 ml/cmH₂O
(1,7 cmH₂O pour mobiliser un V_T de 500 ml)
3. Sujet atteint d'une **fibrose** pulmonaire sévère: 10 ml/cmH₂O (50 cmH₂O pour mobiliser un V_T de 500 ml)



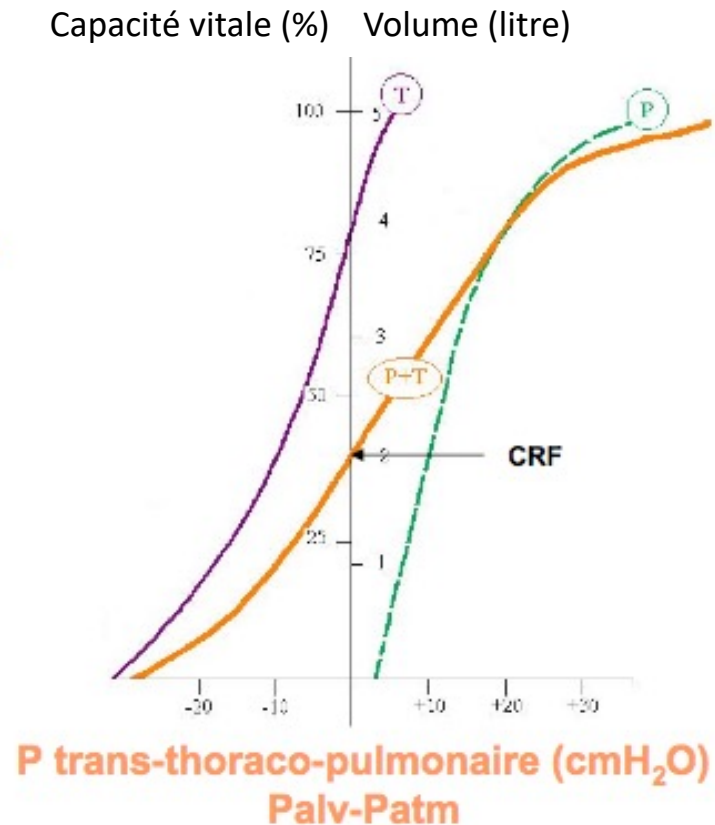
Relation pression/volume dans le système thoraco-pulmonaire

- Compliance **thoracique**
 - volume de relaxation du thorax = 60% de la CV
 - $C_{\text{thor}} = 200 \text{ ml/cmH}_2\text{O}$
 - diminuée dans plusieurs pathologies (cypho-scoliose, atteinte des muscles respiratoires, obésité, etc...)



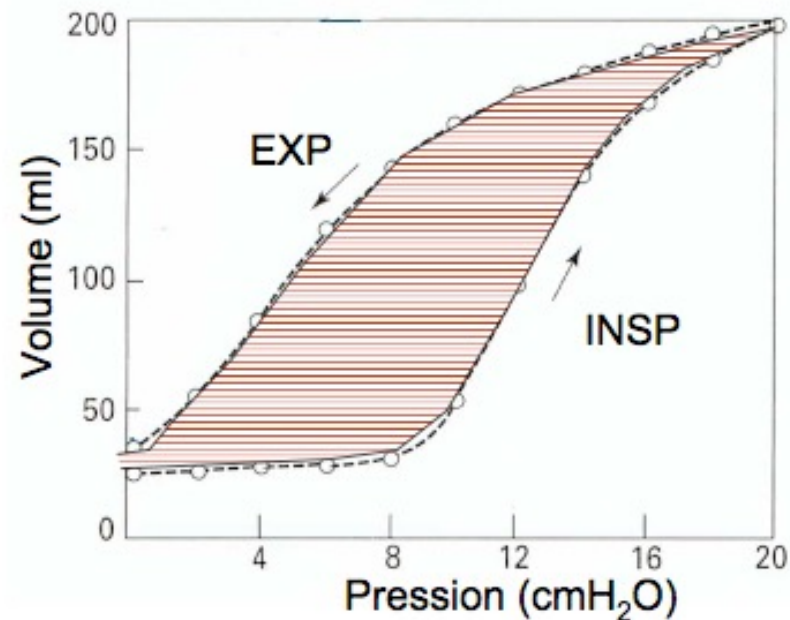
Relation pression/volume dans le système thoraco-pulmonaire

- Compliance **thoraco-pulmonaire**
 - volume de relaxation du système thoraco-pulmonaire = CRF
 - $1/C_{TOT} = 1/C_{PULM} + 1/C_{THOR}$
 - $C_{TOT} = 100 \text{ ml/cmH}_2\text{O}$
 - affectée par modification de chacune des courbes



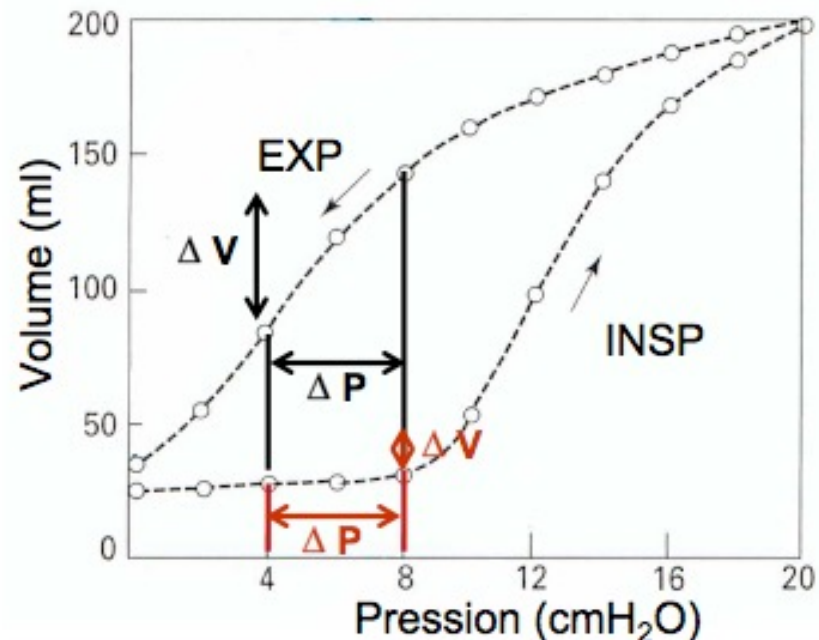
Relation pression/volume dans le système thoraco-pulmonaire

- Courbe pression-volume
INSP $\neq$ courbe pression-
volume EXP
- **Hystérésis** = propriété
d'un système physique qui
ne revient pas à son état
initial quand on produit
une force exactement
inverse de celle qui l'a
déformé



Relation pression/volume dans le système thoraco-pulmonaire

- Hystérésis
 - INSP: En augmentant la pression de + 4 cmH₂O, on augmente de volume pulmonaire de 10 ml
 - EXP: En diminuant la pression de 4 cmH₂O, on diminue le volume pulmonaire de 50 ml



Propriétés élastiques thoraco-pulmonaires

- Elasticité thoraco-pulmonaire et ventilation pulmonaire
 - Pour une activité musculaire (ΔP) donnée
 - ΔV obtenu ($= V_T$) sera d'autant plus grande que la compliance sera élevée
 - Pour un V_T (ΔV) donné
 - l'activité musculaire sera d'autant plus importante que la compliance sera basse

Oxymétrie de pouls

L'oxymètre de pouls (ou saturomètre) permet de mesurer de façon simple, fiable, non invasive et continue la saturation artérielle de l'hémoglobine.

$$SaO_2 = HbO_2 / Hb \text{ totale}$$

La valeur donnée par l'oxymètre de pouls est appelée « Saturation pulsée de l'hémoglobine en oxygène, ou SpO_2 », pour la distinguer de la saturation artérielle de l'hémoglobine en O_2 , mesurée par les gaz du sang (SaO_2).

Définitions

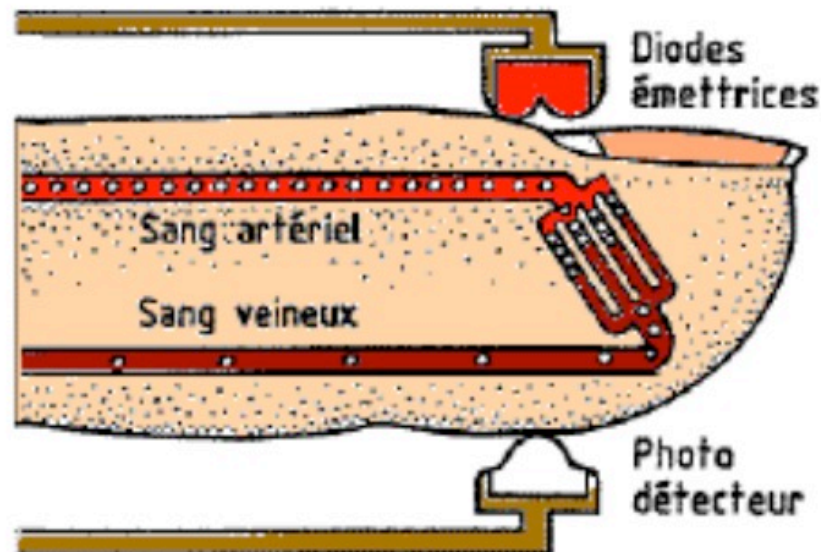
SaO₂	Saturation de l'hémoglobine en oxygène mesurée par prélèvement de sang artériel.
SpO₂	Saturation de l'hémoglobine en oxygène mesurée par oxymétrie de pouls. Le «P» signifie saturation pulsée.
PaO₂	Pression partielle en oxygène dans le sang artériel. C'est la quantité d'oxygène transportée par le sang et délivrée au aux organes.
Capnie	Pression partielle en dioxyde de carbone (CO ₂) dans le sang artériel. C'est la quantité de CO ₂ présente dans le sang.

Présentation du matériel

L'appareil se compose de deux parties :

- le moniteur qui est un boîtier indépendant ou intégré dans un autre appareillage permet le réglage de la mesure et de ses limites d'alarmes et affiche parfois la courbe de pléthysmographie (onde pulsatile) ;
- le capteur qui prend généralement la forme d'un doigtier.

Il existe d'autres modèles, réutilisables ou non, de formes et de consistance variées : pince à doigts ou à nez en plastique rigide, doigtier souple, bandes autocollantes pour le doigt ou la main (pédiatrie), le nez ou l'oreille.



Chap 1.3 – Paramètres mesurables

Le capteur contient deux diodes émettant une lumière rouge qui doit être située face à une zone réceptrice facilement identifiable.

Les meilleurs résultats sont obtenus en plaçant l'émetteur sur l'ongle (mnémonique : rubis sur l'ongle). L'écran comprend l'affichage des paramètres mesurés (saturation et fréquence des pulsations) et une courbe.

Le chiffre affiché n'a de valeur que s'il y a affichage d'une courbe (pour les appareils qui en sont munis).

Principe de la mesure

Le principe repose sur l'émission de deux lumières (rouge et infrarouge), respectivement de 660 et 940 nm, et de la mesure de leur absorption par le flux pulsatile.

L'absorption de la lumière rouge et infrarouge sera variable selon qu'elle rencontrera de l'hémoglobine réduite (Hb) non oxygénée ou de l'oxyhémoglobine (HbO₂).

L'oxymètre de pouls calcule la saturation du flux pulsatile, en éliminant les valeurs correspondant au sang veineux et capillaire. Le résultat est très bien corrélée à la saturation artérielle mesurée par gaz du sang (SaO₂).

Limites de la mesure

4.1. Limites liées à la nécessité de percevoir un signal pulsatile

L'oxymètre de pouls ne fonctionne pas en cas d'arrêt circulatoire ou de patient sous circulation extra-corporelle (CEC : débit continu, pas de débit pulsatile). Il fonctionne mal ou pas du tout dans toutes les situations où le sang circule mal là où est placé le capteur : hypotension artérielle, bas débit sanguin, vasoconstriction (hypothermie, utilisation de vasoconstricteurs). Si on place un brassard à pression artérielle sur le même bras que le capteur, l'oxymètre de pouls ne fonctionne pas pendant la mesure.

Le signal est parasité par les mouvements du patient. La saturation donnée par l'oxymètre de pouls n'a aucune valeur si la courbe du signal est mauvaise.

C'est donc bien souvent dans les situations les plus critiques que l'appareil ne donne aucun résultat.

Limites de la mesure

4.2. Utilisation de colorants

L'injection de bleu de méthylène ou de carmin indigo abaissent faussement la valeur donnée par l'oxymètre de pouls de façon temporaire. Le vernis à ongle et les néons puissants peuvent fausser la mesure.

L'hyperbilirubinémie en revanche est sans effet sur la mesure de la SpO_2 .

4.3. Présence d'une hémoglobine anormale

En cas d'intoxication par le monoxyde de carbone (CO), l'oxymètre de pouls ne fait pas la différence entre l'hémoglobine combinée à l'oxygène (HbO_2) et celle combinée au CO ($HbCO$). La saturation lue sur l'oxymètre de pouls est faussement élevée.

Exemple : un patient intoxiqué au CO a 40 % de son hémoglobine combinée à du CO ($[HbCO] = 40\%$). Cette $HbCO$ est lue à 90 % comme de l' HbO_2 , donc interprétée comme 36 % d' HbO_2 . Si le reste de son hémoglobine est réellement combinée à de l' O_2 , l'oxymètre de pouls affichera une valeur de 96 %, faussement rassurante.

Problèmes d'interprétation

5.1. Différence entre la SpO_2 et la PaO_2

L'oxymètre de pouls ne donne pas la PaO_2 (pression partielle de l' O_2 dans le sang artériel), mais la SaO_2 . Ces deux valeurs sont liées par une relation non linéaire (courbe sigmoïde de Barcroft). Une chute de la SaO_2 de 97 à 90 % n'a pas la même signification qu'une chute de 92 à 85 %.

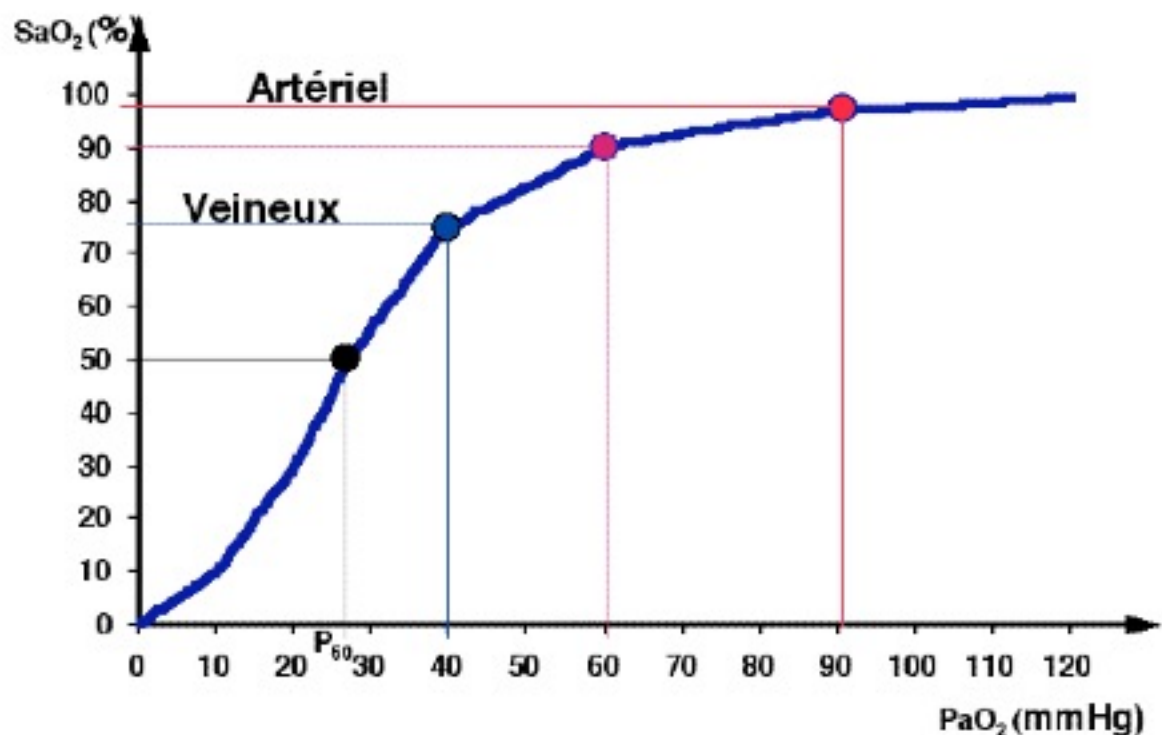
La précision des oxymètres de pouls étant de l'ordre de 2 %, l'écart entre la valeur réelle et la valeur mesurée peut avoir une grande importance quand la saturation se situe dans la zone de grande pente de la courbe (en-dessous de 90 %, qui est le « genou » de la courbe).

Par conséquent, il ne faut pas fixer la limite inférieure de l'alarme à 90 % mais plutôt à 93 ou 94 %.

L'oxymètre de pouls ne détecte pas l'hyperoxémie : que la PaO_2 soit à 100 mmHg (13,3 kPa) ou à 600 mmHg (80 kPa), la SaO_2 sera à 100 %. En néonatalogie il peut donc être intéressant de régler l'alarme haute à 97 % pour éviter l'hyperoxémie (fibroplasie rétro-lentale pouvant conduire à la cécité).

SaO_2	PaO_2
100 %	> 150 mmHg
97 %	100 mmHg
90 %	60 mmHg
80 %	48 mmHg
75 %	40 mmHg
50 %	27 mmHg

Chap 1.3 – Paramètres mesurables



Point artériel : pour une PaO₂ de 91 mmHg (12,1 kPa), la SaO₂ est de 97 %. C’est la partie plate de la courbe, la SaO₂ n’augmente presque plus malgré de grandes augmentations de la PaO₂. L’hyperoxie n’est pas détectée par l’oxymètre de pouls.

Point « 90-60-90 » : la PaO₂ (et donc la SaO₂) diminue avec l’âge. Comme on se situe dans une partie à faible pente de la courbe, une chute de la PaO₂ de 90 à 60 mmHg (8 kPa) n’entraîne qu’une chute de 7 % de la SaO₂. Par exemple, un patient de 90 ans aura une PaO₂ à 60 mmHg et une SaO₂ à 90 % : c’est le point « 90-60-90 » (90 ans, PaO₂ = 60 mmHg, SaO₂ = 90 %). Ce point est le « genou » de la courbe : en-dessous de 90 % de SaO₂, la pente de la courbe est importante, et une chute de la PaO₂ entraîne une forte chute de la SaO₂.

Point veineux : le sang veineux a une PvO₂ autour de 40 mmHg (5,3 kPa) pour une SaO₂ à 75 %.

P50 : la P50 est la PO₂ pour laquelle la SaO₂ est à 50 %. Dans des conditions normales de pH, PCO₂ et température, P50 = 27 mmHg (3,6 kPa).

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

5.2. Différence entre TaO₂ et SpO₂.

Idéalement, il faudrait connaître le transport artériel de l'O₂ (TaO₂), soit la quantité d'O₂ transportée par minute :

$$\text{TaO}_2 = Q_c \times \text{CaO}_2 = Q_c \times [\text{Hb}] \times \text{SaO}_2$$

Le transport artériel de l'O₂ est égal au produit du débit cardiaque (Q_c) par le contenu artériel en O₂ (CaO₂). Si on néglige l'O₂ dissout, le TaO₂ est donc égal au produit du débit cardiaque par la concentration de l'hémoglobine [Hb] et par la SaO₂. Sur ces trois valeurs, l'oxymètre de pouls n'en fournit qu'une seule.

En cas d'anémie ou d'hémodilution majeure, la mesure peut être faussement rassurante chez un patient hypoxique faute de transport d'oxygène efficace. En exagérant on pourrait dire que s'il n'y a plus qu'un seul globule rouge dans l'organisme, mais qu'il est bien oxygéné, l'oxymètre de pouls affichera « 100 % », alors que le patient va mourir (en supposant que ce globule ait la bonne volonté de passer devant le capteur).

Chap 1.3 – Paramètres mesurables

5.3. La SpO_2 peut être différente de la SaO_2 .

L'oxymètre de pouls mesure une saturation périphérique, et effectue une moyenne (en général sur une dizaine de secondes). Il affiche en fait un résultat correspondant à la situation d'il y a dix secondes. Quand la SaO_2 chute brutalement, on peut constater un décalage entre le moment où le patient bleuit (cyanose) et le moment où la SpO_2 donnée par l'oxymètre de pouls commence à descendre. L'inverse se produit quand la saturation remonte rapidement.

5.4. Cas particuliers

Lors de l'intubation, si le patient a des poumons sains et a eu une bonne oxygénation, en cas d'intubation oesophagienne, la SpO_2 met plusieurs minutes à descendre en-dessous de 93 %.

L'intubation sélective (lorsque la sonde est poussée trop loin, intubation d'une bronche souche, généralement la droite), n'est pas détectée si les poumons sont sains et la FiO_2 supérieure à 30 %.

EN PRATIQUE, NOUS RETIENDRONS

1. Le saturomètre permet la mesure de la saturation artérielle en oxygène par voie transcutanée (SpO_2) au chevet du patient.
2. La mesure obtenue peut être considérée comme un cinquième paramètre vital à intégrer au raisonnement clinique.
3. La SpO_2 améliore la qualité de l'appréciation clinique d'une dyspnée mais elle ne remplace pas un examen clinique.
4. La SpO_2 ne reflète pas la ventilation alvéolaire et ne renseigne pas sur la capnie.
5. Une SpO_2 inférieure à 94 % est un indice de gravité chez l'enfant et justifie une hospitalisation en urgence.
6. Le saturomètre est un outil abordable financièrement qui trouve sa place dans une trousse de médecin généraliste.