

Dynamique respiratoire

Dr. Grégoire Gex
Service de Pneumologie
HUG – Hôpital du Valais

gregoire.gex@hug.ch

Objectifs d'apprentissage

- Comprendre comment sont générés les débits d'air dans les voies aériennes
- Connaitre et comprendre les déterminants du débit d'air dans les voies aériennes, à savoir les différents facteurs qui influencent la Pression alvéolaire et les résistances des voies aériennes.
- Comprendre les facteurs influençant le travail statique et dynamique de la respiration.

Plan de cours

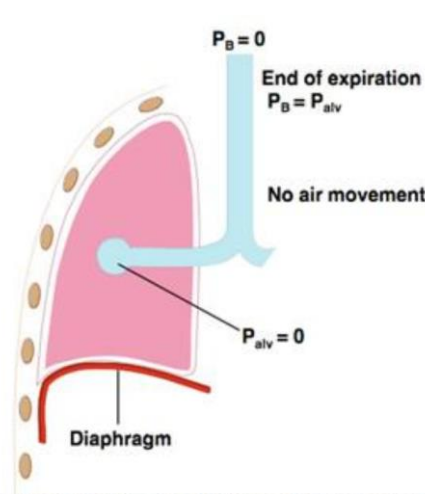
- Déterminants du débit d'air dans les voies aériennes
 - Déterminants de la Pression alvéolaire dynamique
 - Impact des muscles
 - Impact du volume pulmonaire
 - Impact de la compliance pulmonaire
 - Impact de la compliance thoracique
 - Déterminants de la Résistance des voies aériennes
 - Anatomie
 - Impact du volume pulmonaire
 - Impact des muscles lisses bronchiques
 - Impact du flux laminaire vs turbulent
 - Impact de la densité/viscosité de l'air
 - Compression dynamique des bronches
 - Situation en inspiration forcée
- Energétique de la respiration
 - Travail statique
 - Travail dynamique
- Le cycle respiratoire

Déterminants du débit d'air dans les voies aériennes

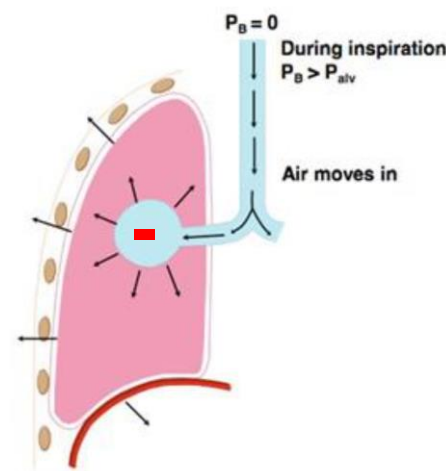
Le débit d'air est causé par un gradient de pression

$$\text{Débit d'air} = \frac{\text{Pression alvéolaire} - \text{Pression ext.}}{\text{Résistance totale voies aériennes}}$$

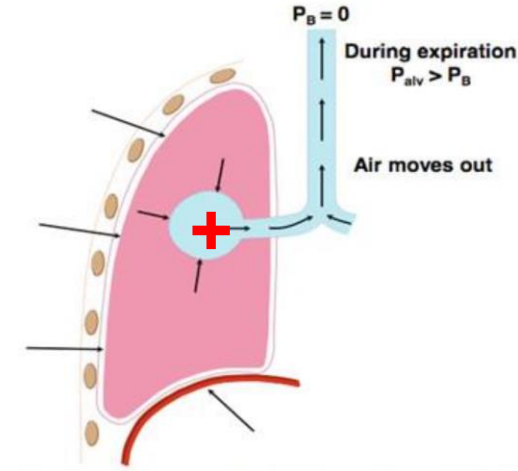
- P_{alv} : modifiable par muscles et forces de rappel élastique du syst. Poumon-Thorax
- $P_{\text{ext.}}$: = $P_{\text{barométrique}}$, considérée 0 cmH₂O, car P_{baro} est présente partout, y compris sur P_{alv}
- **Résist. totale VA** : générée par lèvres, dents, langue, larynx, trachée, bronches, bronchioles,... = infini si glotte fermée



$P_{\text{alv}} = 0$: Pas de débit

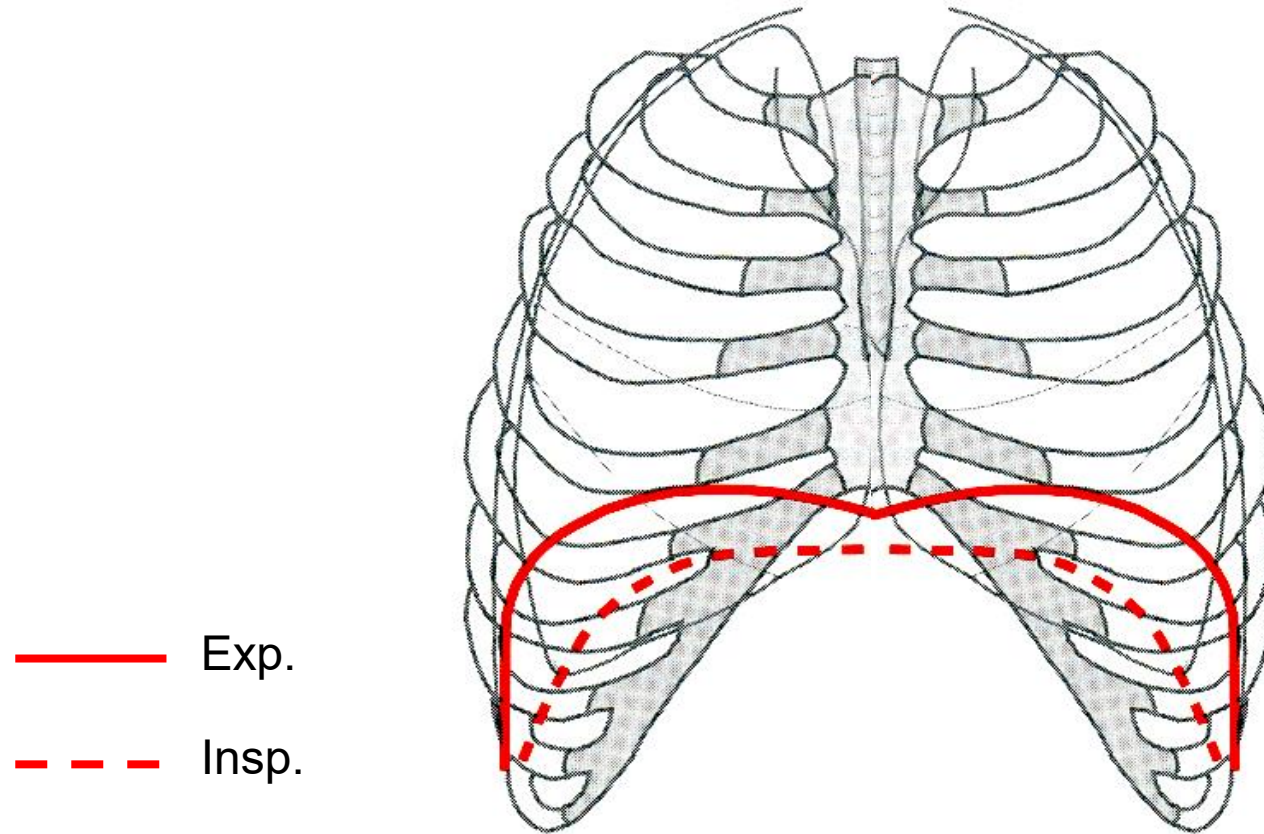


$P_{\text{alv}} < 0$: Inspiration



$P_{\text{alv}} > 0$: Expiration

L'abaissement actif du diaphragme crée la pression négative ds thorax



Déterminants de la Pression alvéolaire

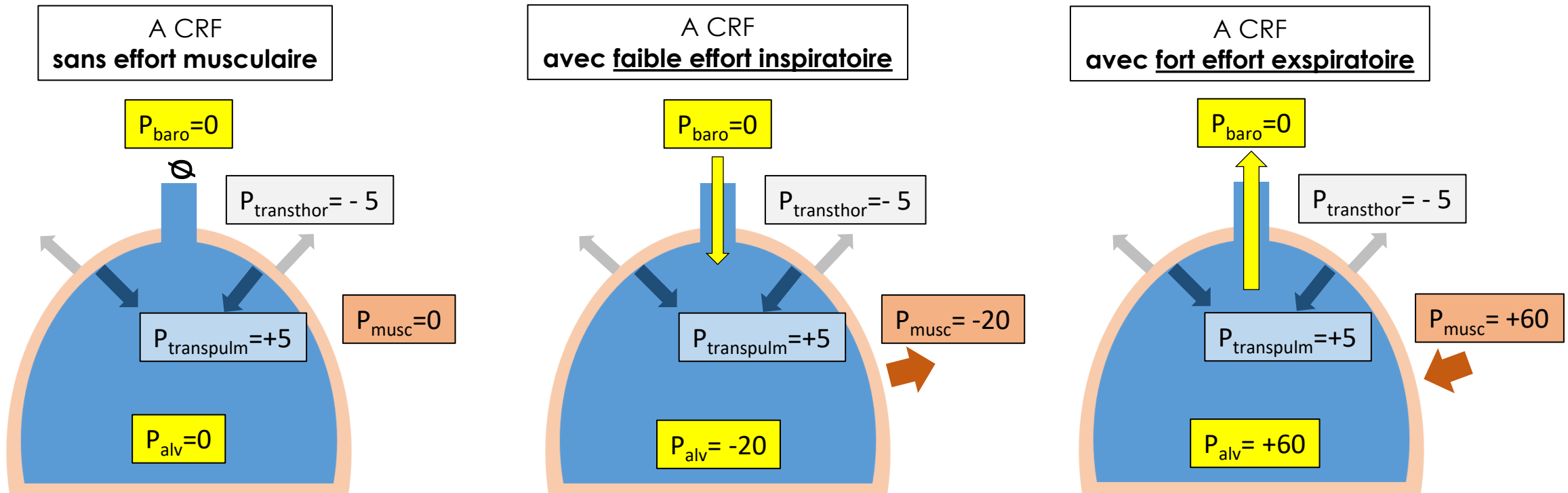
$$\text{Débit d'air} = \frac{\text{Pression alv.} - P_{\text{baro}}}{\text{Résistance voies aériennes}}$$

Déterminants de $P_{\text{alvéol.}}$: Impact des **muscles**

En dynamique (en cas de débit d'air), la P_{alv} est une pression mesurée ponctuellement lors d'une fraction de seconde (« arrêt sur image »). Elle change constamment.

$$P_{\text{alv}} = P_{\text{musc}} + P_{\text{transpulm}} + P_{\text{transthor}}$$

P_{musc} P générée par les muscles
 $P_{\text{transpulm}}$ P générée par la force de rappel du poumon
 $P_{\text{transthor}}$ P générée par la force de rappel du thorax



Déterminants de $P_{\text{alvéol.}}$: Impact du **volume pulmonaire**

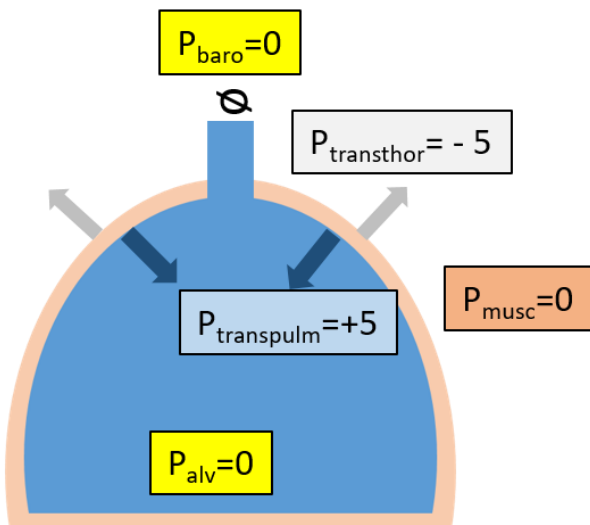
$$P_{\text{alv}} = P_{\text{musc}} + P_{\text{tanspulm}} + P_{\text{transthor}}$$

P_{musc} P générée par les muscles
 P_{tanspulm} P générée par la force de rappel du poumon
 $P_{\text{transthor}}$ P générée par la force de rappel du thorax

} Dépend du **vol. pulm.**

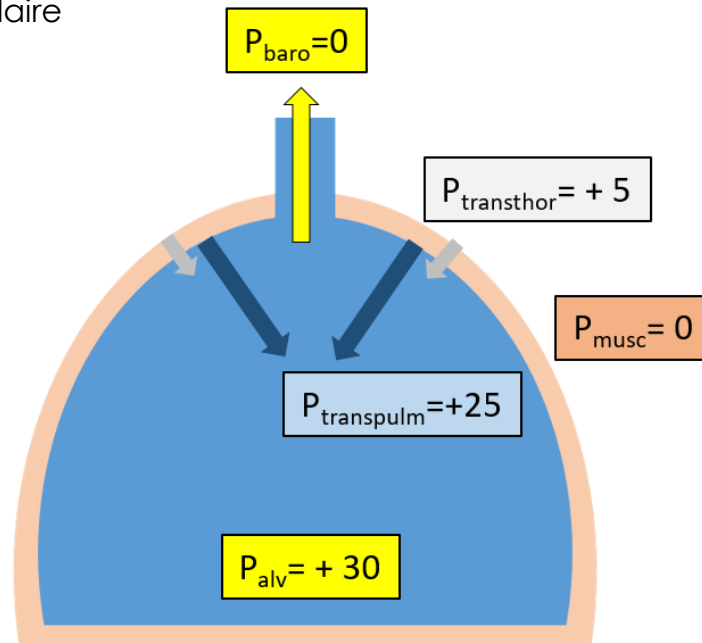
A CRF
sans effort musculaire

A la CRF, les forces de rappel pulm et thor. s'annulent (point d'équilibre). Sans effort musculaire, il n'y a pas de débit d'air.



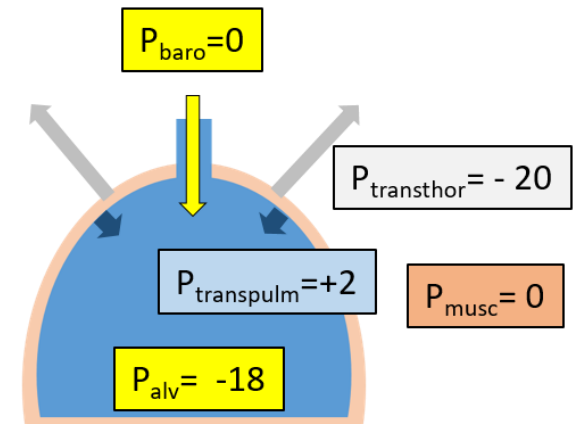
Grand volume, proche CPT
sans effort musculaire

A grand volume, la résultante des forces de rappel Poum. + Thor. causent une expiration. Le syst. veut retourner à son pt d'équilibre (CRF), même sans effort musculaire



Petit volume, proche de VR
sans effort musculaire

A petit volume, la résultante des forces de rappel Poum. + Thor. causent une inspiration. Le syst. veut retourner à son pt d'équilibre (CRF), même sans effort musculaire



Déterminants de $P_{\text{alvéol.}}$: Impact de **compliance pulm.**

$$P_{\text{alv}} = P_{\text{musc}} + P_{\text{transpulm}} + P_{\text{transthor}}$$

P_{musc} P générée par les muscles
 $P_{\text{transpulm}}$ P générée par la force de rappel du poumon ← Dépend **compliance pulm.**
 $P_{\text{transthor}}$ P générée par la force de rappel du thorax

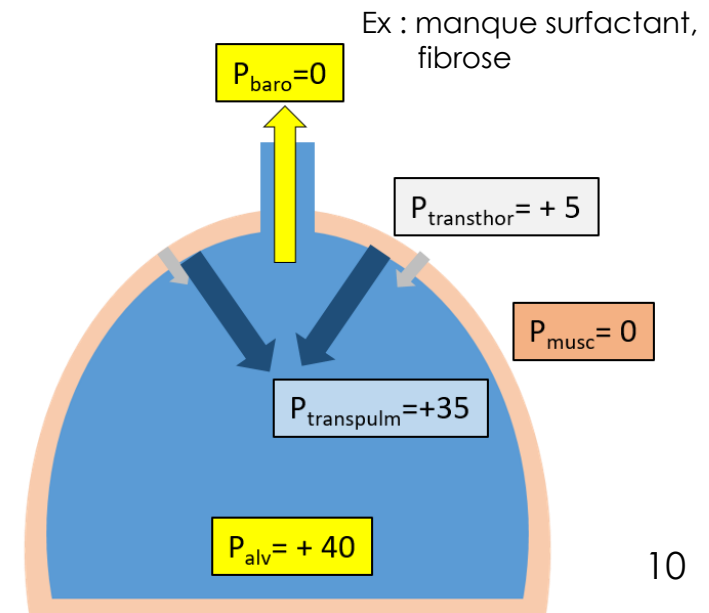
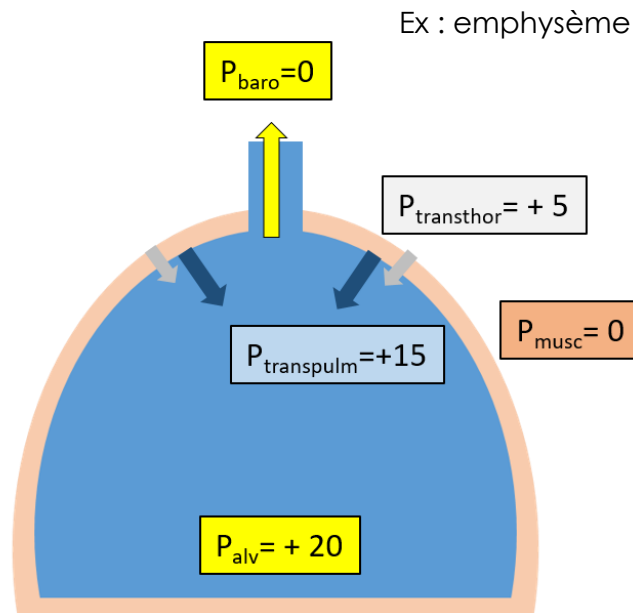
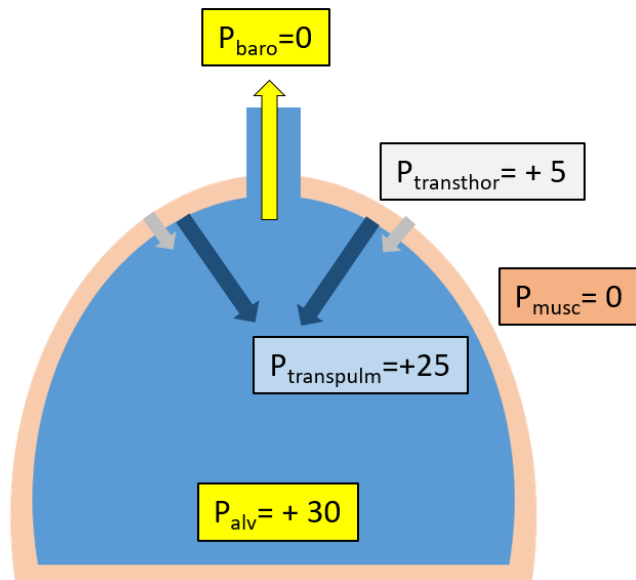
Grand volume, proche CPT
Compliance pulmonaire normale
 sans effort musculaire

Grand volume, proche CPT
Compliance pulmonaire élevée
 sans effort musculaire

Grand volume, proche CPT
Compliance pulmonaire basse
 sans effort musculaire

Faible force de rappel pulm., donc $P_{\text{transpulm}}$ plus faible, aide moins à l'expiration
 → Expiration moins forte

Forte force de rappel pulm., donc $P_{\text{transpulm}}$ plus forte, aide davantage à l'expiration
 → Expiration plus forte



Déterminants de $P_{\text{alvéol.}}$: Impact de **compliance thoracique**

$$P_{\text{alv}} = P_{\text{musc}} + P_{\text{transpulm}} + P_{\text{transthor}}$$

P_{musc} P générée par les muscles
 $P_{\text{transpulm}}$ P générée par la force de rappel du poumon
 $P_{\text{transthor}}$ P générée par la force de rappel du thorax

← Dépend **compliance thorax**

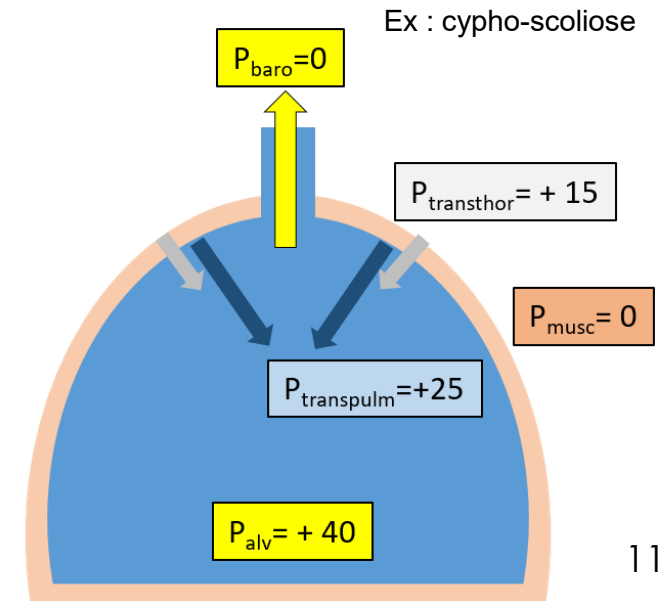
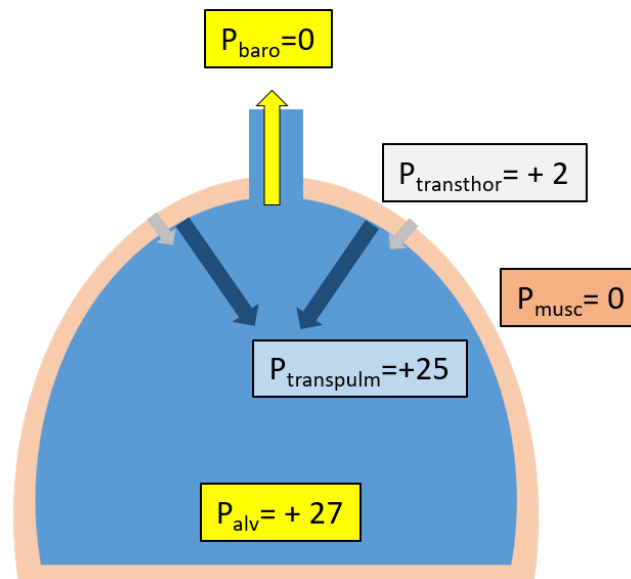
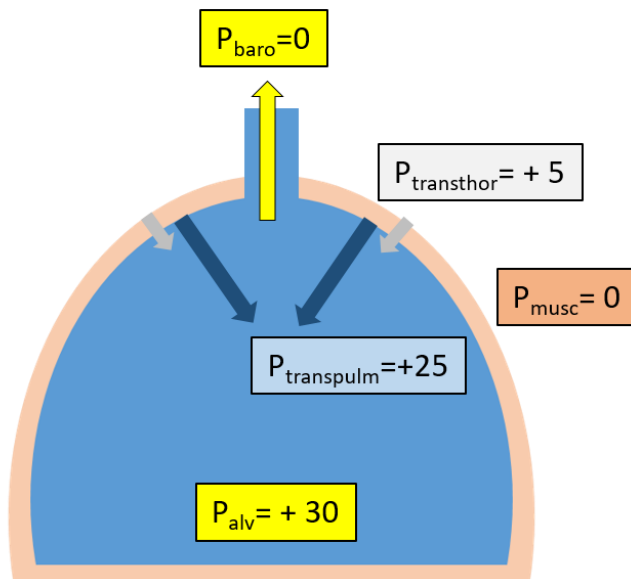
Grand volume, proche CPT
Compliance pulmonaire normale
 sans effort musculaire

Grand volume, proche CPT
Compliance thoracique élevée
 sans effort musculaire

Grand volume, proche CPT
Compliance thoracique basse
 sans effort musculaire

Faible force de rappel thorax, donc $P_{\text{transthor}}$ plus faible, aide moins à l'expiration
 → Expiration moins forte

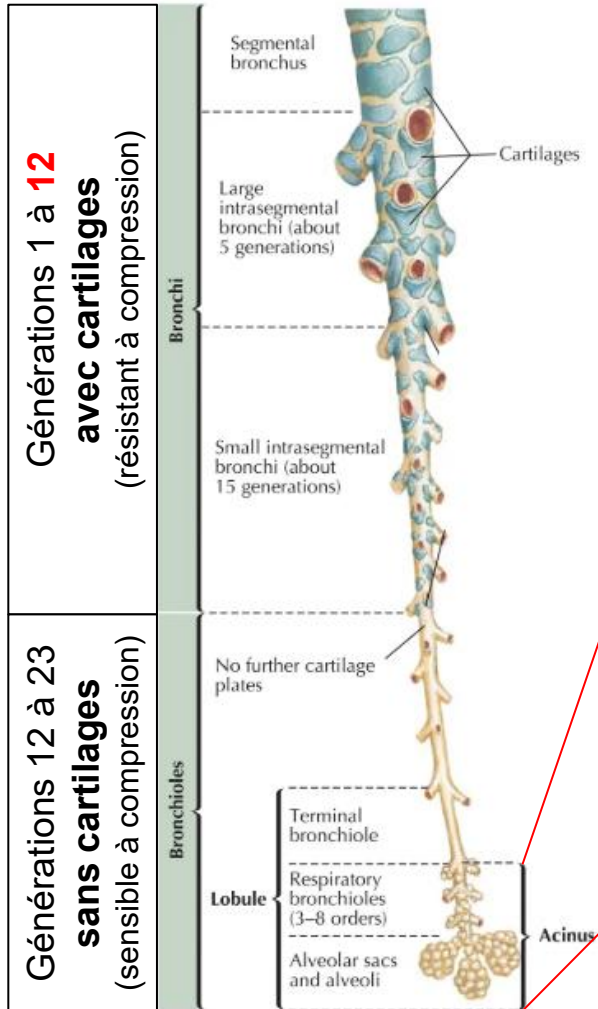
Forte force de rappel thorax., donc $P_{\text{transthor}}$ plus forte, aide davantage à l'expiration
 → Expiration plus forte



Déterminants de la Résistance des voies aériennes

$$\text{Débit d'air} = \frac{\text{Pression alv.} - \text{Pbaro}}{\text{Résistance voies aériennes}}$$

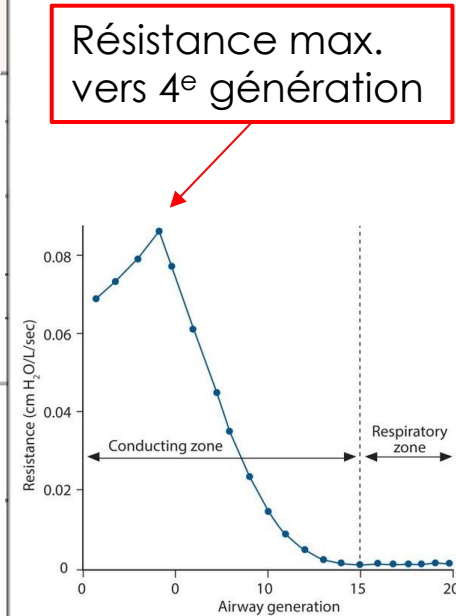
Résist_{voies aér.} : Diamètre - Impact de l'anatomie



Generation	Diameter, cm	Total cross sectional area, cm ²	Vitesse air	Résist. totale
Trachea	0	1.80	Diam. total stable 2-3 cm ²	Résist. totale augmente
Bronchi	1	1.22		
	2	0.83		
	3	0.56		
Terminal bronchioles	4	0.45	Diam. total augmente exponentiellement jusqu'à 1m ²	Résist. totale diminue exponentiellement
	5	0.35		
	16	0.06		
Respiratory bronchioles	17			
	18			
	19	0.05		
Alveolar ducts	T ₃			
	T ₂			
	T ₁			
Alveolar sacs	T	0.04		

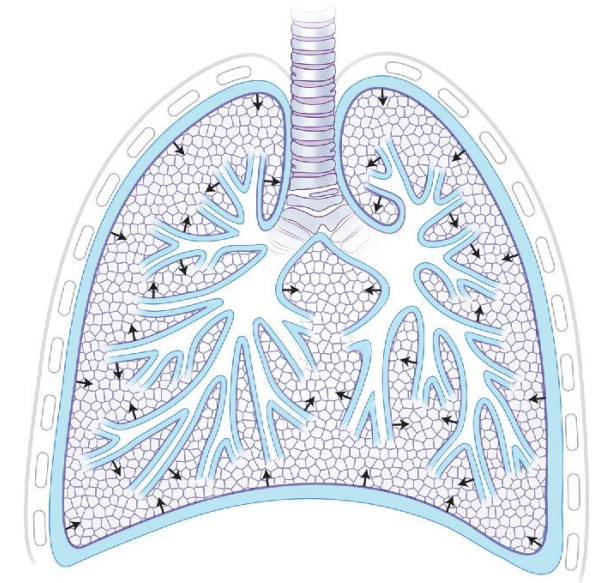
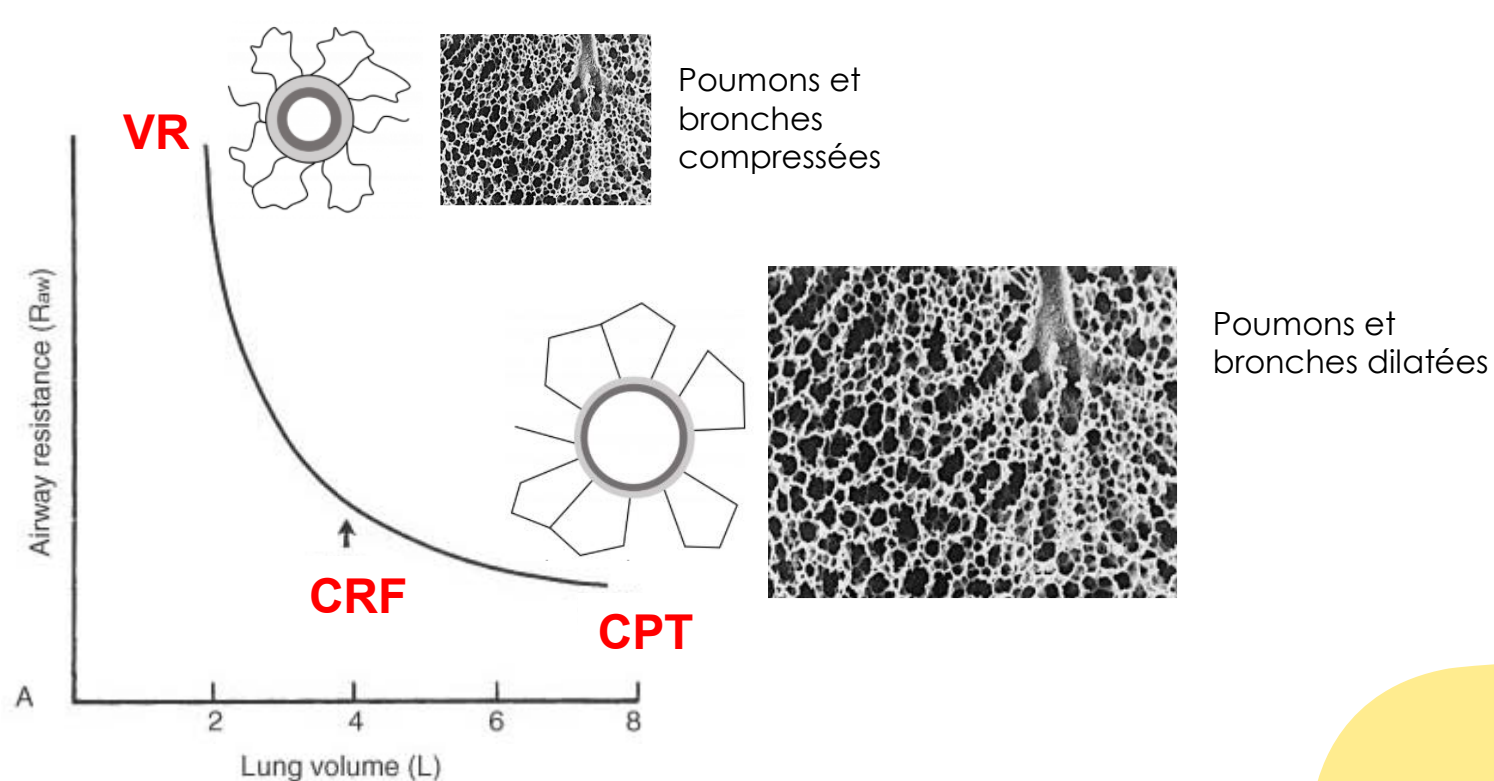
Génération 1 à 16
Zone de conduction
sans échange gazeux
(= espace mort anatom. = 100-150 ml)

Génération 17 à 23
Zone respiratoire
avec échanges gazeux



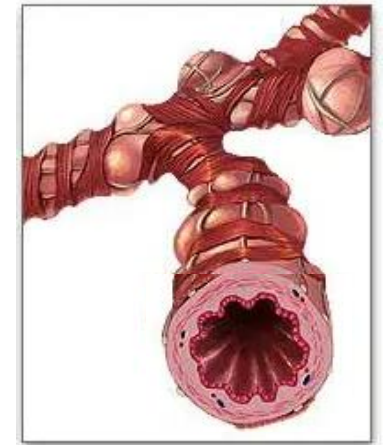
Résist_{voies aér.} : Diamètre - Impact du Volume pulmonaire

- Les bronches et bronchioles sont dilatées par la traction radiale du tissu pulmonaire environnant
- La traction radiale dépend de la force de rappel élastique du poumon, qui dépend du volume pulmonaire
 - A haut volume, traction radiale élevée → diamètre bronchique élevé
 - A bas volume, traction radiale basse → diamètre bronchique bas
 - (Au volume résiduel, certaines voies aériennes peuvent se fermer, notamment aux bases du poumon)



Résist_{voies aér.} : Diamètre – Impact des mm lisses bronchiques

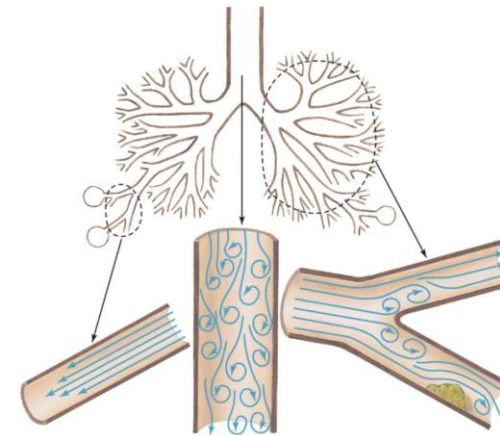
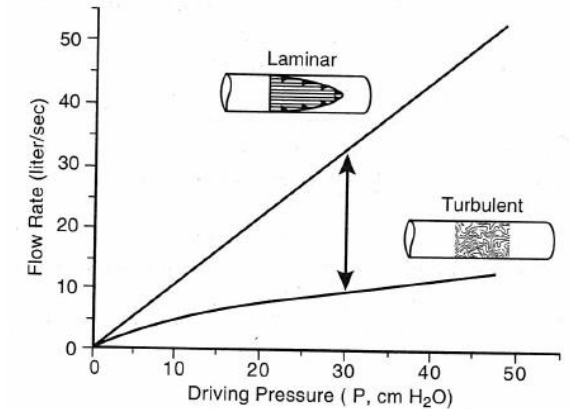
- La modification du tonus de base des muscles lisses bronchiques est utile dans 3 buts :
 - Protéger les poumons d'une agression :
 - Ex : réflexe suite à irritants inhalés dans trachée et grosses branches (nerf vague)
 - Diminuer la ventilation de zones pulmonaires ventilées inutilement (effet espace mort) :
 - Ex : effet direct de ↓ PCO₂ dans le gaz aléolo-bronchiolaire
 - Diminuer les résistances bronchiques à l'effort ou en cas de danger
 - Ex : catécholamines circulantes
- 3 systèmes de contrôles :
 - Système sympathique (uniquement humoral : adrénaline circulante) :
Récepteurs B₂-adrénergiques : relâchent mm. lisses bronchiques → bronchodilatation
 - Système parasympathique (uniquement nerf vague) :
Récepteurs muscariniques : contractent mm. lisses bronchiques → bronchoconstriction
 - Effets physiques et chimiques directs sur les muscles lisses (encore mal connu)



Résist_{voies aér.} : Impact du Flux laminaire vs turbulent

- La formule Débit = $\Delta P/R$ ne s'applique en réalité que aux flux laminaires
- En flux turbulent, le principe reste le même mais beaucoup d'énergie est perdue et le Débit ne dépend plus que de $\sqrt{\Delta P}$
 - Si le flux devient turbulent, un débit identique nécessite un plus grand $\Delta(P_{\text{alv.}} - P_{\text{baro}})$ (le coût énergétique augmente). En résumé : **flux turbulent** → ↑ **Résist_{voies aér.}**
- Facteurs favorisant un flux turbulent :
 - Diamètre bronchique important
 - Vitesse de l'air important
 - Embranchements aigus
 - Forte densité et faible viscosité de l'air

Ex : 3 premières générations de bronches
- Répartition des flux :
 - Génération 1-3 : flux turbulent
 - Génération 3-10 : flux transitionnel
 - Génération 11-23 : flux laminaire
- Le flux turbulent est plus efficace pour mobiliser les sécrétions (ex : expiration forcée)



Résist_{voies aér.} : Impact de la densité/viscosité gazeuse

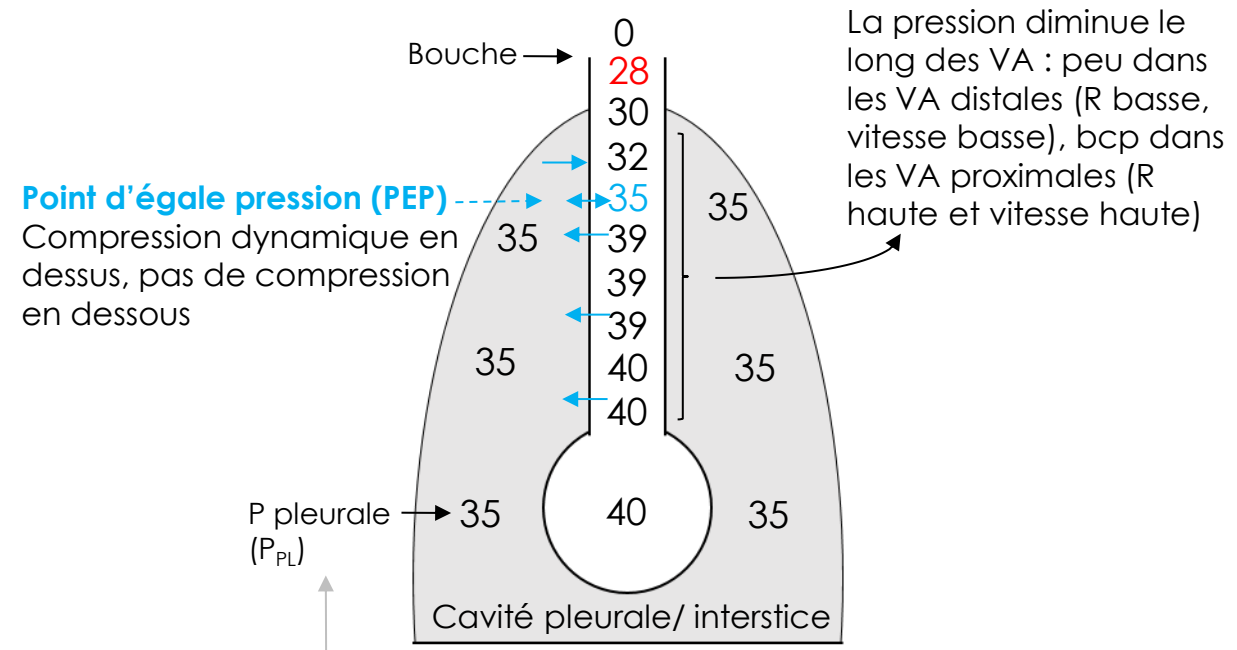
- La densité du gaz inhalé (et très peu sa viscosité) influence la résistance à l'écoulement de l'air, surtout en modifiant la part de flux turbulent :
 - Gaz très dense (ex : plongée sous-marine) : Résistances augmentent
 - Gaz moins dense (ex : haute altitude ou mélange Helium-O₂) : Résistances diminuent



Mélange 21% O₂ + 79% Helium utilisé aux soins intensifs pour diminuer la Résist_{voies aér.}

Résist_{voies aér.} : Compression dynamique des VA

- La compression dynamique des bronches survient **lors d'une expiration forcée**, aux niveaux où la Pression transbronchique (P_{TB}) devient négative (Pression ext. > Pression int.).
- Cette situation est **due à la diminution progressive de la pression à l'intérieur des bronches** lors d'une expiration forcée, principalement pour 2 raisons :
 - Dissipation P par résistances bronchiques
 - Diminution P quand le débit s'accélère (en raison de la diminution de la surface totale des bronches) quand on s'approche des bronches proximales (loi de Bernoulli : la pression diminue dans un flux si sa vitesse est plus rapide)



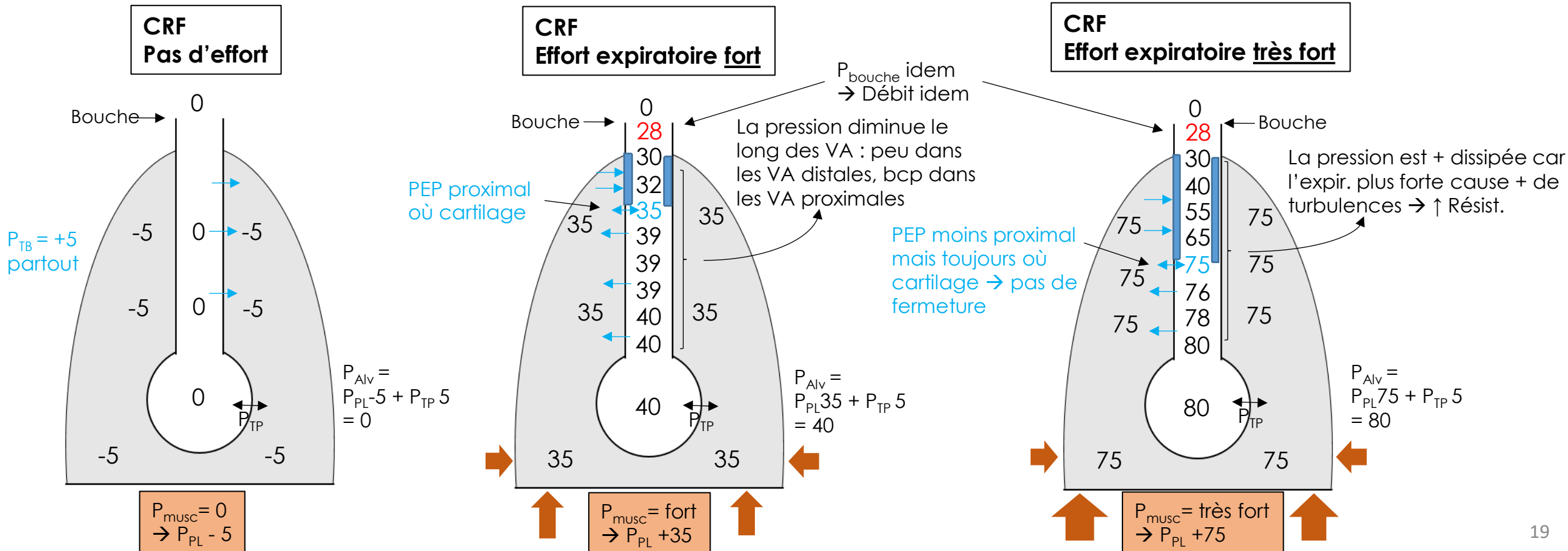
Rappel : la pression pleurale ou intra-pleurale se transmet dans l'interstice pulmonaire, y compris le tissu péri-bronchique

- $P_{TB} = P_{TP} -$ Perte de pression en amont de la voie aérienne

Rappel : $P_{transpulm}$ correspond à la force de rappel élastique qui maintient les bronches ouvertes (les alvéoles adjacentes aux bronches tirent dessus).

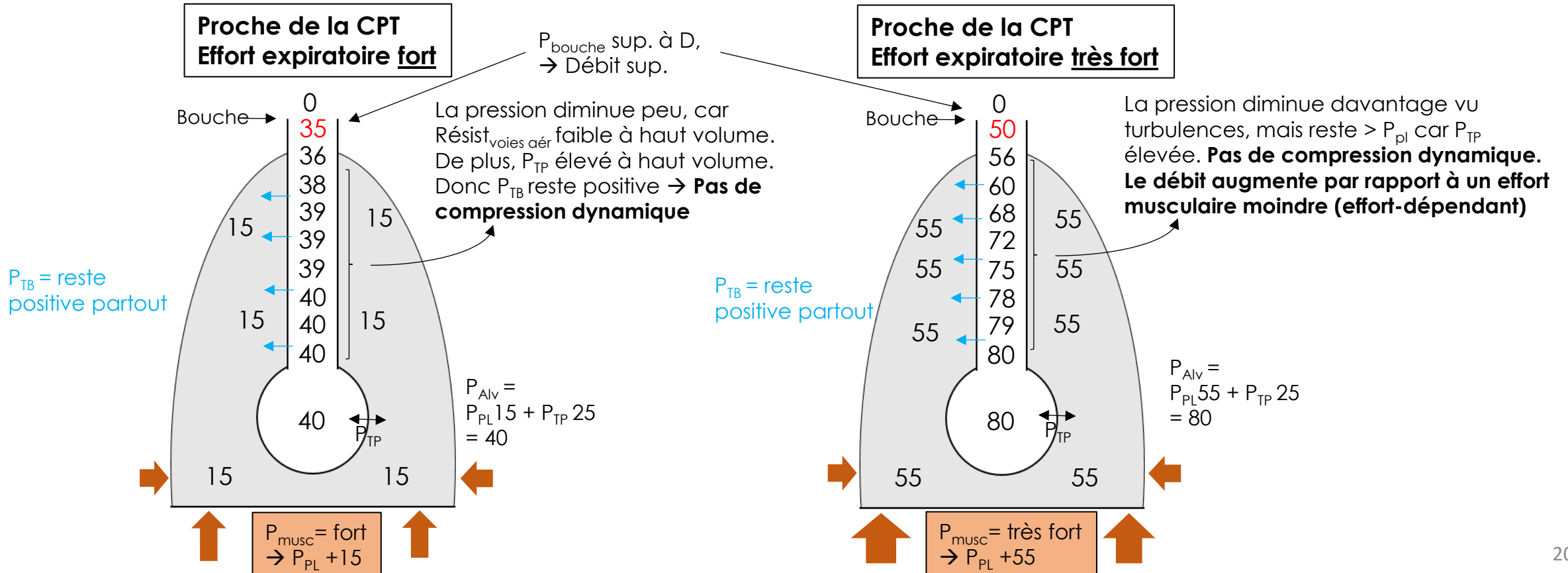
Résist_{voies aér.} : Compression dynamique des VA

- Lorsqu'il y a compression dynamique des VA à l'expiration forcée, l'augmentation de l'effort musculaire expiratoire n'augmente plus le débit expiratoire** (expiration « effort-indépendant »), car l'augmentation de la P_{alv} est compensée par une augmentation en miroir de la Résist_{voies aér.}



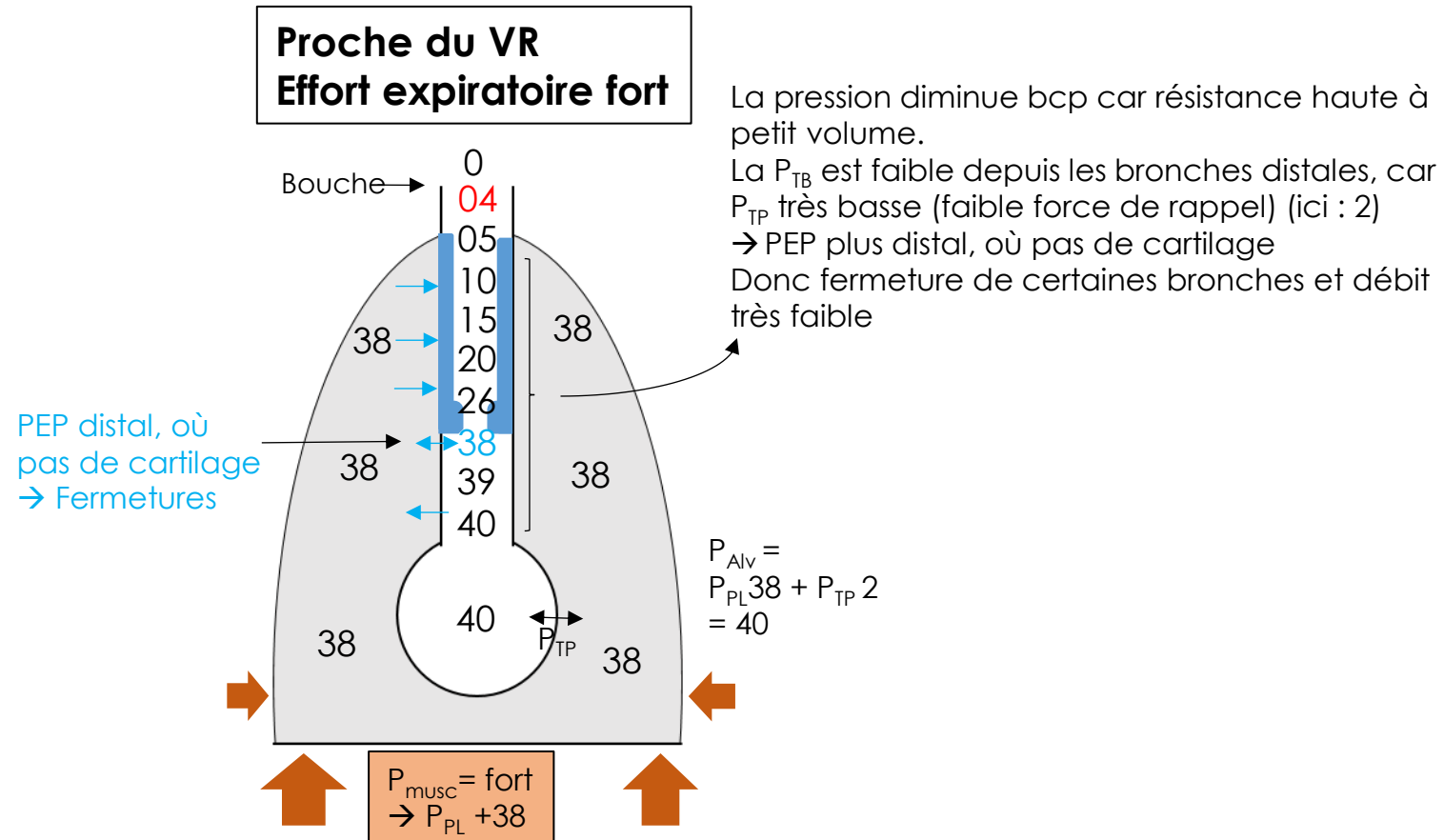
Résist_{voies aér.} : Compression dynamique des VA

- A hauts volumes** (proche de CPT), la Résist_{voies aér.} est très faible et la P_{TP} est élevée, de sorte qu'il n'y a **pas de compression dynamique** des VA à l'expiration forcée ($P_{TB} = P_{TP} -$ Perte de pression en amont de la voie aérienne). L'**augmentation de l'effort musculaire expiratoire augmente le débit expiratoire**.



Résist_{voies aér.} : Compression dynamique des VA

- A petits volumes** (proche de VR), la Résist_{voies aér.} est très haute et la P_{TP} est basse, de sorte que la **compression dynamique commence très bas, en distalité, où il n'y a pas de cartilages**. Sans cartilages, **les bronchioles comprimées se ferment**.



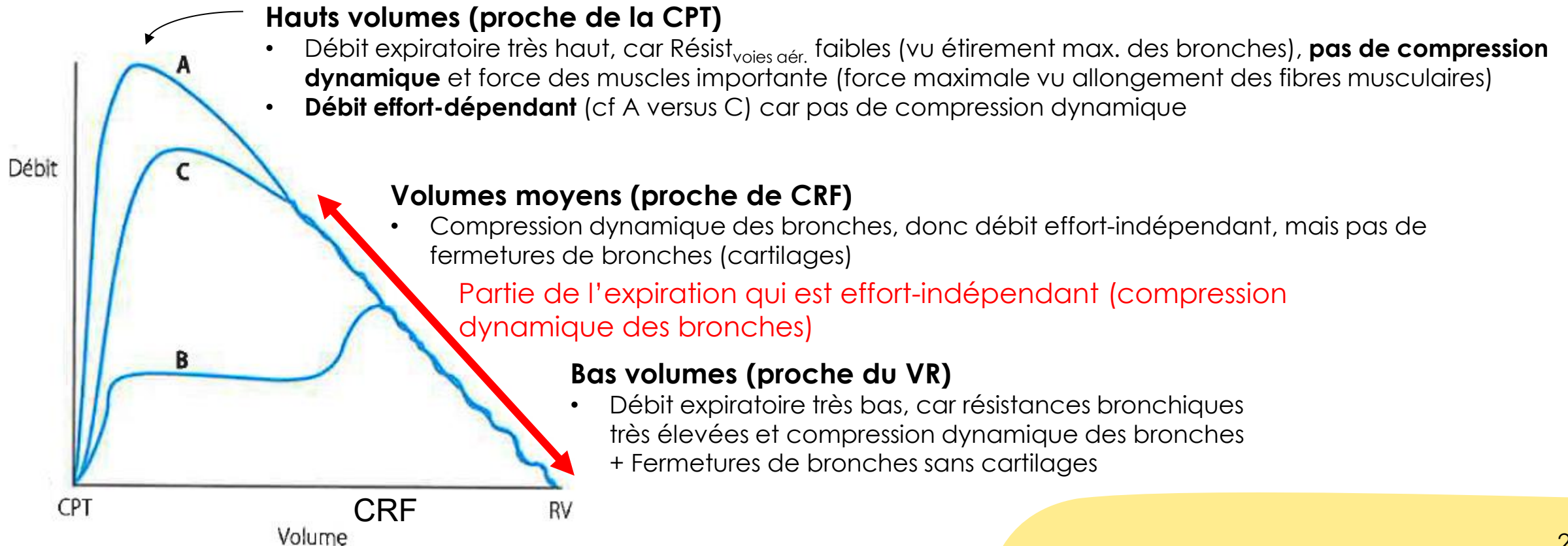
Résist_{voies aér.} : Compression dynamique des VA

Après inspiration maximale (CPT) :

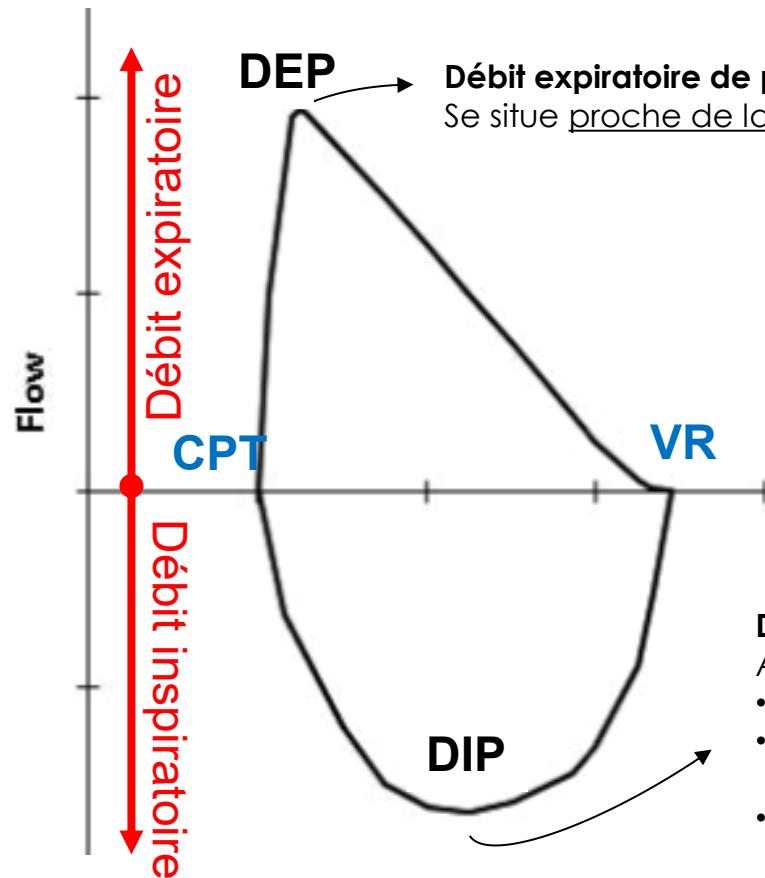
A : expiration forcée maximale

B : expiration initialement lente, puis forcée

C : expiration forcée sous-maximale



Résist_{voies aér.} : Situation à l'inspiration forcée



DEP → Débit expiratoire de pointe (peakflow expir.) :
Se situe proche de la CPT (cf. dia précédente)

L'inspiration forcée n'est pas en miroir de l'expiration forcée

Débit inspiratoire de pointe (peakflow inspir.) :

A mi-chemin entre le VR et la CPT :

- Pas au tout début de l'inspiration près de VR, car les résistances bronchiques y sont très élevées
- Pas proche de la CPT, où les résistances bronchiques sont très basses, car les muscles inspiratoires y sont très raccourcis et donc faibles (loi de Starling)
- A noter l'absence de compression dynamique des bronches. Au contraire, les pressions générées à l'inspiration dans le thorax sont négatives, ce qui tend à dilater les bronches dans le thorax.

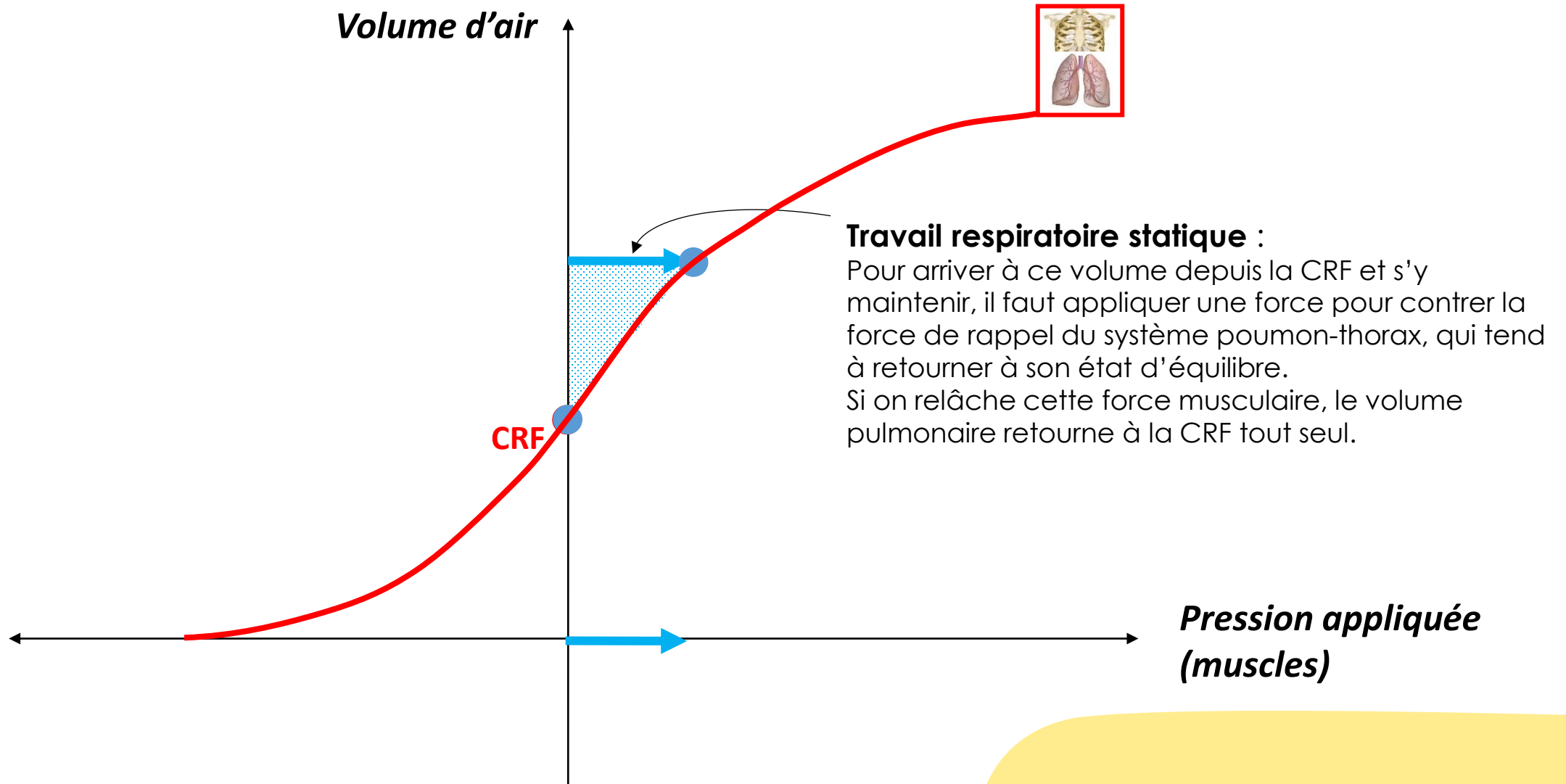
Energétique de la respiration

(travail respiratoire statique et dynamique)

Energétique de la respiration

- Dès que le système poumon-thorax quitte la CRF (point d'équilibre), cela demande de l'énergie.
- L'énergie utilisée pour la respiration sert à contrer :
 1. Résistance élastique (statique) : $2/3$ de l'énergie
 2. Résistance non-élastique (dynamique) : $1/3$ de l'énergie
 - Résistance des voies aériennes à l'écoulement de l'air (80%)
 - Résistance visqueuse à la déformation des tissus (20%) (négligé pour simplification)
- Conséquence d'une augmentation des Résistances :
 - Augmentation du travail respiratoire (cave épuisement)
 - Dyspnée

Travail respiratoire statique : contre résistances élastiques



Travail respiratoire dynamique

Volume d'air



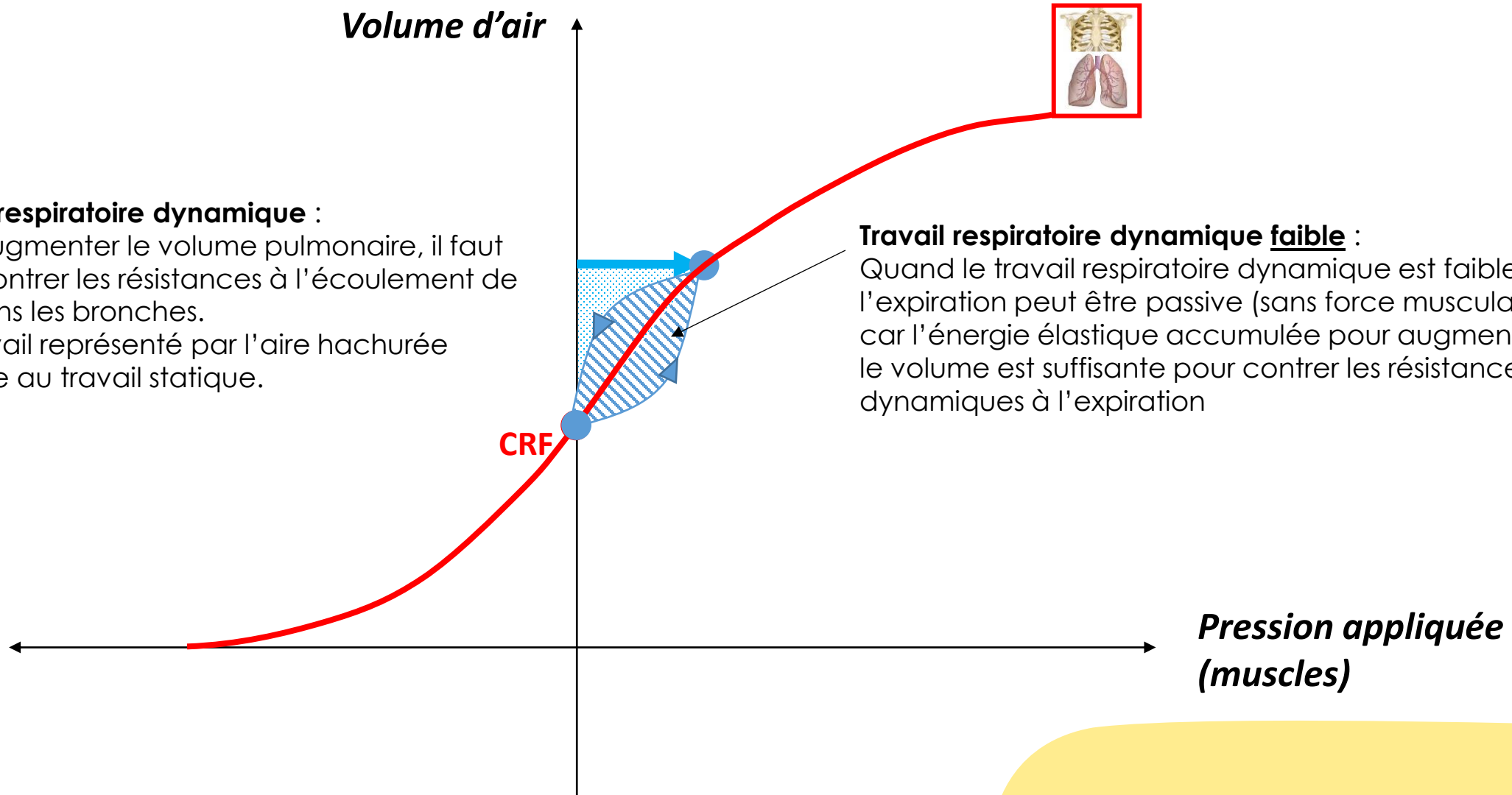
Travail respiratoire dynamique :

Pour augmenter le volume pulmonaire, il faut aussi contrer les résistances à l'écoulement de l'air dans les bronches.

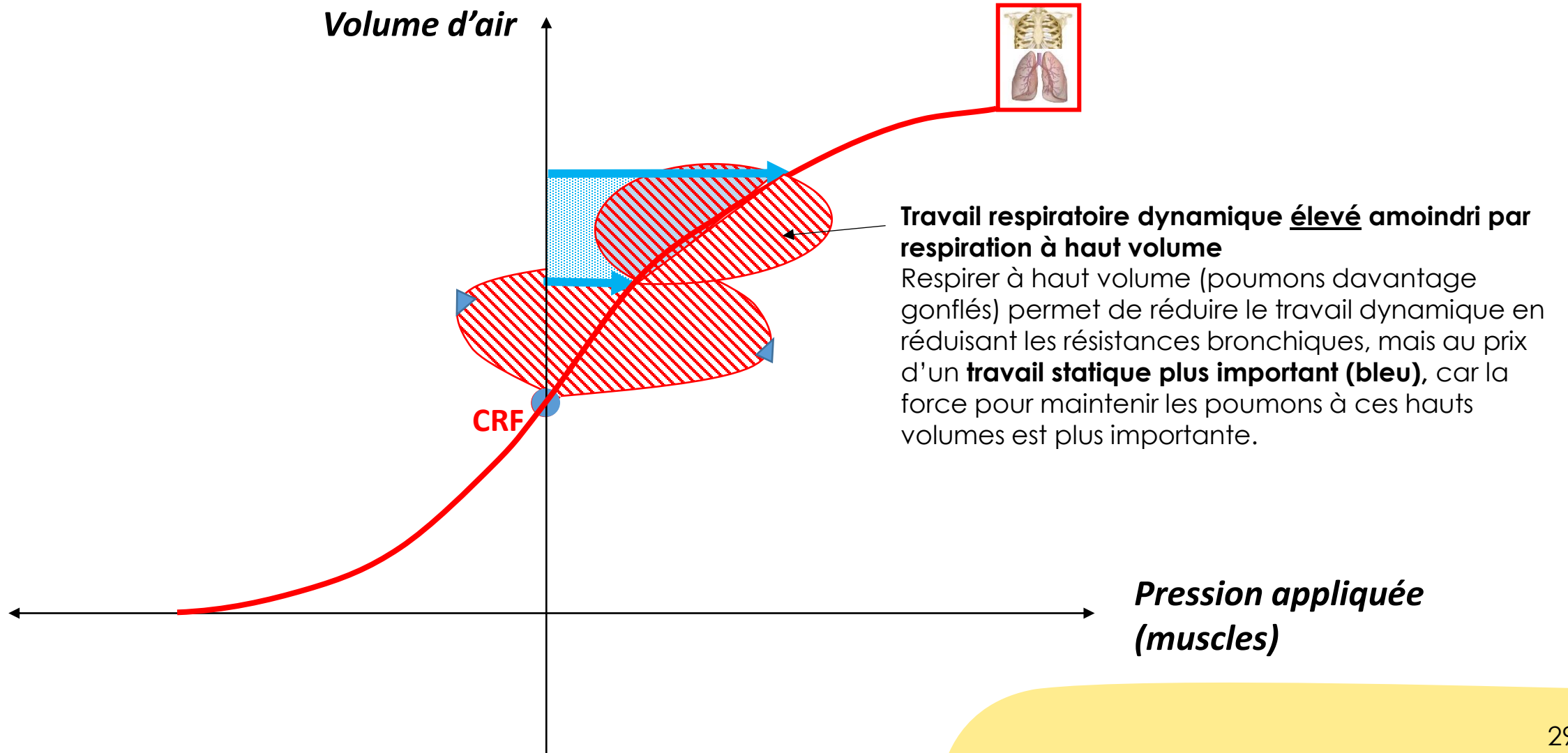
Ce travail représenté par l'aire hachurée s'ajoute au travail statique.

Travail respiratoire dynamique faible :

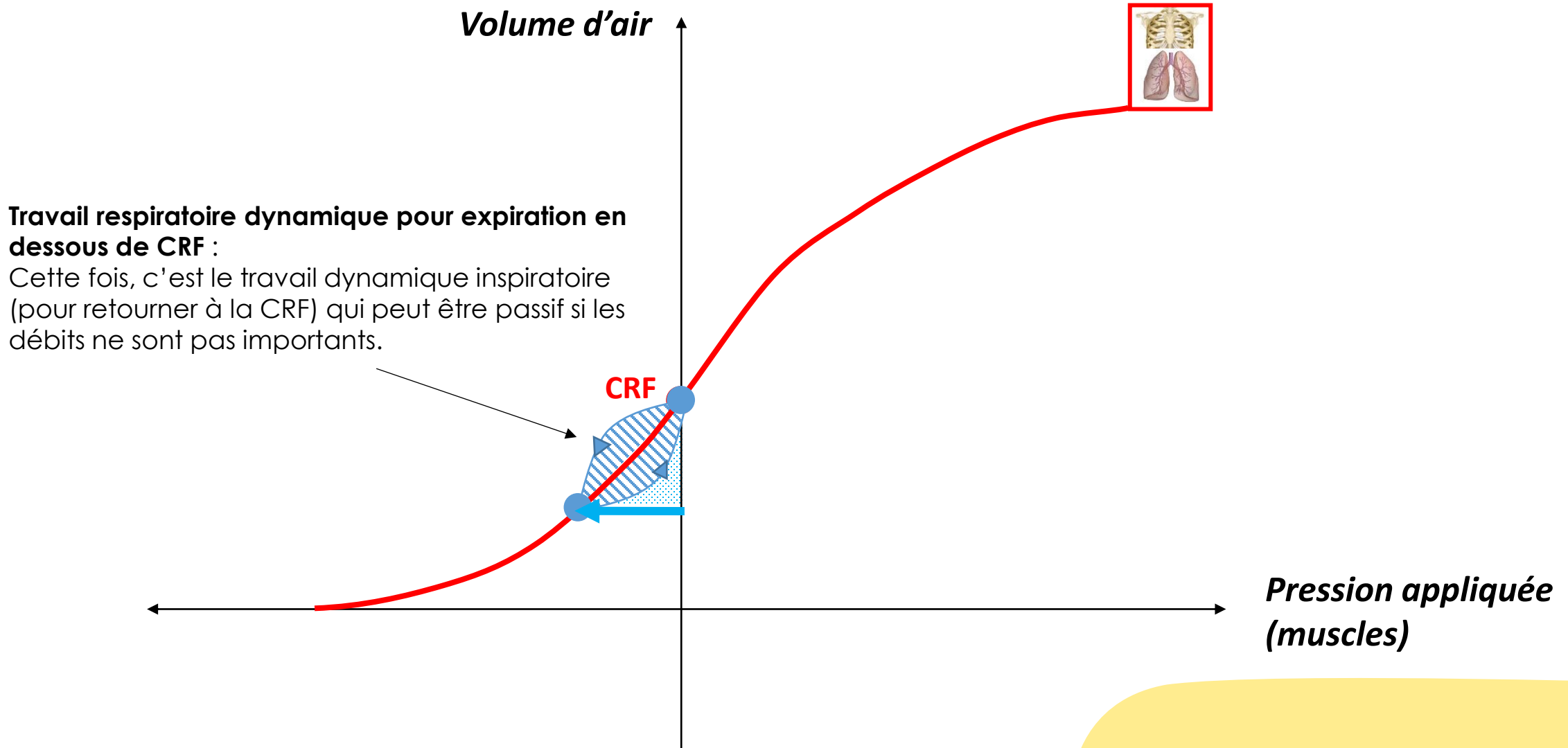
Quand le travail respiratoire dynamique est faible, l'expiration peut être passive (sans force musculaire), car l'énergie élastique accumulée pour augmenter le volume est suffisante pour contrer les résistances dynamiques à l'expiration



Travail respiratoire dynamique

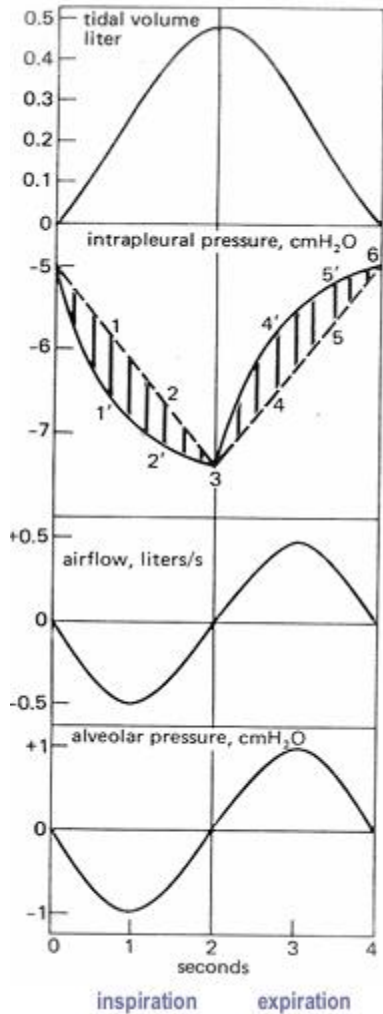


Travail respiratoire dynamique



Cycle respiratoire

Le cycle respiratoire spontané

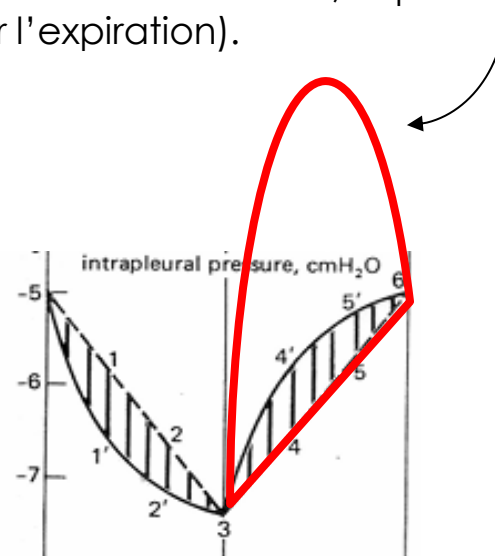


A l'inspiration, les mm. génèrent une P_{alv} négative (ici $-1 \text{ cmH}_2\text{O}$) et ainsi fournissent le travail statique (en pointillé) et le travail dynamique (en hachuré) nécessaires pour générer un débit d'air.

En fin d'inspiration, le volume pulmonaire est plus grand de 0.5 L. La pression intra-pleurale est passé de $-5 \text{ cmH}_2\text{O}$ à $-8 \text{ cmH}_2\text{O}$, vu que la force de rappel du poumon est plus importante à plus grand volume.

L'expiration est passive : la pression intra-pleurale revient à $-5 \text{ cmH}_2\text{O}$, le point d'équilibre.

Si les muscles expiratoires s'étaient contractés, la pression intra-pleurale serait devenue positive (ex : à effort pour accélérer l'expiration).



L'essentiel en bref

- Les débits d'air dans les VA sont générées par une différence de pression entre les alvéoles et l'extérieur de la bouche, qui est produite par les muscles et/ou par les forces de rappel élastiques du système poumon-thorax.
- Les résistances des VA sont importantes dans les bronches proximales, puis deviennent très faibles dans les bronchioles distales.
- Les résistances bronchiques sont très élevées à petit volume pulmonaire (proche de VR) et faibles à grand volume pulmonaire (proche de CPT).
- Les résistances bronchiques dépendent également des muscles lisses bronchiques, du flux laminaire vs turbulent et de la densité de l'air.
- La compression dynamique des bronches survient à l'expiration forcée à moyen et bas volume pulmonaire. Elle rend le débit expiratoire « effort-indépendant ».
- Le travail respiratoire à effectuer par les mm. respiratoires comprend le travail statique et le travail dynamique.
- A haut volume pulmonaire, le travail dynamique diminue, mais le travail statique est plus important.

Sources

- West - Physiologie respiratoire - 2e Ed - 2022
- West - Pulmonary pathophysiology - 10th. Ed - 2022
- Conti F - Fisiologia medica vol. 2 (2nd Edition) - 2010
- Polycopié de Pierre Haab - 2000
- Leff & Schumacker – Respiratory Physiology: Basics and Applications

Rem : Certaines images et parties de graphiques ont été repris des cours des précédents enseignants (F. Lador, M. Pons), avec mes remerciements