

Principe et du fonctionnement du plethysmographie MiniBOX plus de PulmOne

Quelques Equations de la Mécanique Ventilatoire, issue de la mécanique des fluides régissent les Explorations Fonctionnelles Respiratoires : la loi de (Boyle) Mariotte en est la « Pierre de fondation ».

Ainsi, $PV = NRT$, le produit du Volume et de la Pression à un instant « t » en conditions stationnaires, c'est-à-dire sans perte de quantité de matière, ni perte de charge est une constante . Cette équation permet de mesurer un volume si l'on mesure une variation de pression ;

Ainsi, $P_1V_1 = P_2V_2$, cette équation, que l'on retrouve en biochimie de la dilution : $C_1V_1 = C_2V_2$, permet de mesurer une variation pression et/ou de calculer une variation de volume dans un système bi-compartimental, un volume dans un autre tel un volume pulmonaire dans un patient dans une boîte close (la pléthysmographie en boîte) ou un volume pulmonaire relié à un vase d'expansion connu (la pléthysmographie en caisson);

Loi de Boyle et Mariotte : $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$

$$P \times V = (P + \Delta P) \times (V + \Delta V)$$

La Thermodynamique

La Loi de Conservation de la Quantité de Matière, **Guillaume Amontons**

à température Constante + à basses Pressions

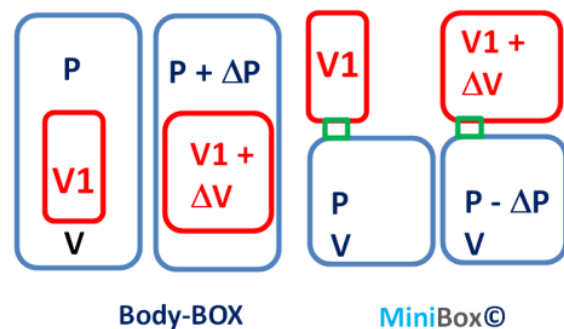
dit : $PV = \text{Constante}$

Pléthysmographie:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

Biochimie:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$



enfin $P = E_{rs} \times V + R_{rs} \times Q$ (+ ϵ x Elastance). , où E_{rs} est l'inverse de la Compliance du système thoraco-pulmonaire, R_{rs} est la résistance des voies aériennes, l'élastance étant négligeable en physiologie humaine ? Cette équation montre que l'inverse de la compliance,

c'est-à-dire la récompense en volume est proportionnelle à la pression appliquée, et que les résistances des VAS est fonction des différents débits qui y circulent

Le pléthysmographe en caisson, le PulmOne MiniBox + est décrit par Berger K *et al.*, CHEST 2021 (fév). Il repose sur la mise en continuité des volumes pulmonaires d'un patient, à définir. Il s'agit d'Explorations Fonctionnelles ventilatoires d'un patient vis-à-vis avec volume de référence rigide : un caisson de 16,3 l. Entre ce caisson et le patient sont placés 1. une valve d'occlusion, et 2. un pneumotachographe. Dans un pléthysmographe « en boîte » il existe, puisque nécessaire, également ces deux dispositifs. Le pléthysmographe à caisson MiniBOX +- PulmOne effectue des occlusions brèves par sa valve des voies aériennes, mesure en continue les débits par l'équation $Q = \Delta P/R$, la résistance étant « *propriétaire* » et connue et linéaire au niveau de la bouche, tout comme la pléthysmographie « en boîte » ce modèle physique est complété par des ajustements statistiques.

Pour le pneumologue, le physiologiste le problème fondamental est de mesurer un Volume Pulmonaire absolu : la Capacité Pulmonaire Totale, c'est-à-dire les volumes mobilisables accessibles par la spirométrie, pour lesquels un pneumotachographe (spiromètre) suffit *plus* les volumes non-mobilisables : le Volume Résiduel, VR résultant de la mécanique thoraco-pulmonaire du patient à évaluer

La spirométrie mesure les variations de volume par l'équation $\Delta V = \int Q(t)/dt$, puis intégration sur le temps de n' variations de pression au travers du pneumotachographe divisé par la Résistance du capteur (connue car propriétaire). Mais la spirométrie ne définit pas, et le physiologiste ne peut le décréter, à elle seule, où le volume à mesurer est situé sur l'axe absolu des volumes, il n'y a pas de $V = 0$

Ainsi la Spirométrie mesure des volumes mobilisés au travers du capteur de pression (ou de débit) : *i.e.* la Capacité Vitale (CVF), Volume expiré Maximal en la première seconde (VEMS) ou nième seconde tel le VEM-6 secondes , CV inspiratoire dite CV lente (CVL) etc...

La plethysmographie est la méthode permettant de mesurer un volume pulmonaire absolu permet d'avoir accès au VR (Volume Résiduel), volume restant dans le poumon au-delà d'une expiration complète ; la CRF (Capacité Résiduelle Fonctionnelle), volume restant dans

le poumon après une ventilation normale au volume courant (VT), et donc le Volume Gazeux Intra-Thoracique (VGT), et donc enfin par sommation la Capacité Totale Pulmonaire (CPT).

La méthode « *historique* », avant la disponibilité technologique de capteurs de pression à précision suffisante et échantillonnages informatiques élevés était la dilution à l'Helium, où l'équation était $C1V1 + C2 CV2$; si un volume V1 d'Hélium à une concentration C1 d'Hélium était injecté dans un système clôt poumon-dispositif, la concentration d'Hélium finale mesurée C2 permettait de calculer le volume V2 du poumon total. Avec cette analogie du fait des capteurs piezzo-électriques l'équation $P1V1 = P2V2$ est désormais utilisée (comparateur et non référence) dans un même système clôt à 2 compartiments : c'est sur ce principe que repose à la fois le pléthysmogramme « en boîte » et le pléthysmogramme « en caisson » MiniBox+-PulmOne

De par la loi de (Boyle-)Mariotte, puisque $PV = nRT$ et PV est une constante, donc $P1V1 = P2V2$

Parce qu'on ne peut pas mesurer directement le volume de gaz présent dans les poumons du patient à sa CRF ou à son VR, on peut appliquer une variation de pression (ou occlure le débit), et mesurer cette variation avec précision.

Toute pléthysmographie déplace un volume non mesurable « invisible » en une variation de Pression mesurable, puis un débit calculable donc un Volume intégrable sur le temps (durée).

Dans une « body-box » pléthysmographie « en boîte » classique, le patient et donc son volume pulmonaire (variable et) total sont tous deux enfermés dans une cabine étanche, où $PV = nRT$: toute variation du volume-patient par son volume pulmonaire sera traduit par une variation de pression dans la boîte close.

Le patient ventile à faible débit contre une valve fermée, ou ouverte

A sa CRF (Capacité Résiduelle Fonctionnelle), donc incluant son VR, le patient commence une INSpiration alors que sa bouche est occluse, l'effort génère une dépression intrathoracique. Son Volume Gazeux (intra-)thoracique (VGT) augmente, donc le gaz intrathoracique se détend : diminution de la Pression (intra-) Alvéolaire (PAIv), mesurable.

« Dans la boîte » en parallèle, puisque le patient occupe plus de volume puisqu'il prend du volume depuis l'extérieur de la cabine (mesuré par un pneumotachographe) et que le volume de la cabine (« box ») est constant et fermée il y a une augmentation de pression mesurable dans la cabine : $PV = nRT$:

Le Volume d'air dedans la cabine (et non de la cabine) diminue puisque le volume patient augmente, donc la pression dans la cabine augmente.

On mesure simultanément : ΔP_{Alv} (patient) et ΔP « box »

La loi de (Boyle-)Mariotte permet de recalculer le VGT (Volume Gazeux intra-Thoracique).

En première approximation :

$VGT \approx V \text{ « box »} \times \Delta P_{Alv} / \Delta P \text{ « box »}$, avec les conventions de signes appropriées.

La pléthysmographie « en boîte » (body-box) calcule un volume absolu en utilisant la sommation de n débit instantanés calculés par n mesures de changements de pression : $n' P_2 - P_1$.

Le pléthysmographe « à caisson » MiniBox +-PulmOne, n'utilise pas une cabine pour mesurer ces différences de pression dans une boîte, mais depuis un « caisson », un réservoir de volume fixe et connu extracorporel en connexion avec le volume pulmonaire-patient à mesurer

Ce plethysmographe combine : 1. un conteneur « caisson » de volume connu et fixe 16,3 l et rigide dans lequel le volume pulmonaire-patient à mesurer est connecté; 2. un spiromètre (pneumotachographe) entre le caisson et le patient et 3. une valve à fermeture rapide et 4. des capteurs de pression/débit comme dans une pléthysmographie « en boîte ».

Le volume physique conteneur + tubulures est donné à environ 16,3 l

C'est une différence d'architecture par rapport à un pléthysmographe en cabine (« Box »), mais la physique sous-jacente reste la même : celle d'un système gazeux soumis à des variations de Pressions et de Volumes.

Pendant la Ventilation normale : le (les) $Q(t)$ est (sont) mesuré(s) en *quasi*-continu par échantillonnages de $n' dP/dt$ au niveau de la bouche par le spiromètre (pneumotachographe) comme dans la pléthysmographie « en boîte : le patient ventile depuis le caisson, et les dp/dt

sont mesurées dans le caisson en continu (n'échantillons, 2 kHz) comme elles sont mesurées à l'intérieur de la cabine dans la pléthysmographie en « boîte »

Le débit est intégré sur le temps permettant le calcul des volumes mobilisés séquentiellement, et totaux : $\Delta V_L(t) = \int Q(t)dt$

Le pléthysmographe MiniBox+ mesure les variations relatives de volume(s) pulmonaire(s), tout comme la pléthysmographie « en boîte ».

Après plusieurs cycles à VT calmes normaux, la valve en amont du pneumotachographe MiniBox + déclenche automatiquement une série d'occlusions (de la valve) entre le caisson et le patient brèves pendant sa (ses) phase(s) INSpiratoire(s), en moins de 15 msec

Au moment de la fermeture : $Q = 0$ *de fait*, mais le patient développe une dépression INSpiratoire contre la valve, comme dans la pléthysmographie « en boîte »

Le volume d'Air contenu dans le caisson (réservoir) rigide est sollicité par le système pulmonaire-patient. *Ainsi* après fermeture de la valve, l'air est mobilisé depuis le caisson (conteneur/réservoir 16,3 l) rigide vers le volume pulmonaire-patient à mesurer et conséquemment entraîne une diminution de la pression dans le caisson, mesurée : le volume est ainsi calculé

On obtient une ΔP « caisson » négative, et non plus une ΔP positive comme dans la pléthysmographie « en boîte » mais de même nature physique, qui permet de calculer la quantité de gaz (volume) déplacée dans (par) le patient.

Puisque la mécanique ventilatoire est essentiellement régie par l'équation

$$P = E_{rs} \times V + R_{rs} \times Q \text{ (+ Inertance, l'inertance est négligeable)}$$

Les pressions Ventilatoires sont régies par la somme d'une composante Elastique (qui varie avec le volume (V) mobilisé : élevée *puis* faible *puis* réaugmentant)

et d'une composante Résistive, fonction du débit (Q) en son sein, où

$E_{rs} \times V$ = pression nécessaire pour distendre le système ventilatoire,

$R_{rs} \times Q$ = pression nécessaire pour faire circuler le débit dans les voies aériennes.

Ainsi pour le pléthysmogramme « en caisson » MiniBox +-PulmOne, au moment de l'occlusion : $Q = 0$, *de fait*, donc le terme $Rrs \times Q = 0$, donc $P = Ers \times$, la pression mesurée dans le système caisson/valve/spiromètre/patient devient directement informative sur la composante élastique/volumique.

C'est la même procédure physiologique qui est utilisée dans la pléthysmographie « en boîte » : une occlusion pour mesurer une pression statique ou quasi-statique du système ventilatoire.

Pour la même raison que la pléthysmographie « en boîte » nécessite un spiromètre, la pléthysmographie « en caisson » le requiert :

Puisque $PV = nRT$, il est nécessaire que le système soit clos et stable, or il ne l'est pas puisque le patient mobilise l'air depuis caisson, tout comme il mobilise de l'air depuis hors la boîte dans la pléthysmographie « en boîte ». Pour que la perte de « quantité de matière », ou « perte de charge » soit intégrée dans le calcul des volumes, il est nécessaire de connaître les débits mobilisés en plus des variations de pression absolues .

Tout pléthymographe a nécessité mathématique de connaître le débit et conséquemment les variations de volumes pulmonaire mobilisés pour calculer les volumes totaux : le VR

Le pneumotachographe (spiromètre) de tout plethysmogramme mesurent « en continu » (en pratique un échantillonnage avec une fréquence propriétaire) : $n'Q(t)$

Puis intègre tel que $\Delta V = \int Q(t)dt$, fournissant ainsi l'information dynamique « combien de volume de gaz entre ou sort du « caisson » de la MiniBOX ou de la « boîte » de la Body-Box (cabine) pendant que le caisson (réservoir) ou la boîte « BOX » mesure la variation de pression par rapport à sa pression de référence (et/ou la pression de l'échantillonnage précédent).

Pour la pléthysmographie en « BOX » ou en « Caisson » la combinaison des deux est essentielle.

Sans mesure du débit à la bouche, seule la variation de pression dans le caisson (réservoir) serait mesurée, tout comme dans la pléthysmographie « dans la boîte », le début de

l'INSpiration ne serait pas « daté » : pas de t_0 , donc impossibilité de calculer quelle quantité de gaz est ou a été déplacée ; et donc impossibilité de calculer la variation de volume pulmonaire correspondante et de faire coïncider (synchroniser) la (les) variation(s) de pression avec le (s) cycle (s) Ventilatoire (s).

Le pneumotachographe intégré dans la pléthysmographie « en caisson » fournit la variable cinématique tout comme pour la pléthysmographie « en boîte » : $V = f(Q)$; tandis que le « caisson » (réservoir) fournit la variable thermodynamique : $P = f(V)$

C'est leurs combinaisons propres qui rend le problème solvable.

Le système MiniBox utilise un pneumotachographe avec une mesure bidirectionnelle (INSpiration et EXpiration) et une fréquence d'échantillonnage de 2 kHz.

Le point subtil est que le spiromètre (pneumotachographe) en n'est pas là pour mesurer directement la CPT. Le spiromètre dans la pléthysmographie en caisson, tout comme dans la pléthysmographie « en boîte » mesure les ΔP donc calcule les ΔV et intègre la CPT, Capacité Pulmonaire Totale

Le pléthysmographe MiniBox détermine un volume absolu du patient (à partir d'un volume de référence) par la réponse du système à la série d'occlusions par une combinaison paramètres physiologiques + événements d'interruption du débit + modèle physique + ajustements statistiques.

Le calcul final de la CPT applique l'équation de (Boyle-)Mariotte et des ajustements empiriques/statistiques propriétaires, présentés et validés par le travail de Bennet K Chest 2021

Le modèle de MiniBOX +-PulmOne donne un volume de référence de 15,8 l, dans un caisson de 16,3 l permettant une plage de mesures de volumes pulmonaires allant jusqu'à 30 l théoriques, il s'agit d'une cohérence statistique du logiciel. Ce volume de référence correspond à une cohérence mathématique de métrologie, la science des mesures

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

Plus le « caisson » (réservoir) est petit plus la variation de pression en son sein est importante à la mobilisation du gaz, et cette variation de pression serait perçue par le patient : le dispositif serait perturbateur et non observateur des cycles ventilatoires du patient

À l'inverse, *plus* le « caisson » (réservoir) est grand moins la variation de pression en son sein est générée et induit une faible exactitude et reproductibilité. Le Volume de 16,3 l est le compromis choisi par PulmOne®, c'est un volume de référence métrologique, et non physiologique, comme le volume de la cabine de pléthysmographie « en boîte » l'est pour les différentes tailles et volume des patients, *i.e.* d'enfants à adultes, d'IMC 19,6 à 35

C'est l'analogie d'une balance avec son poids, ou son ressort de référence

Par la pléthysmographie « en boîte » (Body-box), ce sont les mesures de ΔP box qui infèrent les calculs de ΔV box et donc les ΔV pulmonaires-patients : il s'agit de mesures de déplacement de volume imposés par le patient dans une enceinte fermée.

Par la pléthysmographie en caisson-MiniBox® il s'agit de variations de débit à la bouche qui infèrent des variations de volumes mobilisés depuis le caisson avec en parallèle les mesures de variations de pression (ΔP) dans le caisson en réponse aux mobilisations de volume par rapports au volume de référence, lors des manoeuvres séquentielles d'occlusions (où $Q = 0$) permettant de calculer le volume pulmonaire absolu : la CPT

En conclusion ce sont les mêmes lois physiques qui régissent les deux pléthysmographies en « boîte » et en « caisson »,

Loi n°1, la Conservation de la Matière : $\Delta V = \int Q dt$, appréhendée par le pneumotachographe intégré

Loi n°2, la loi de *Boyle-Mariotte*, $PV = nRT = \text{constante}$ à température et quantité de gaz approximativement constantes, d'où la nécessité de compensation de ce(s) volume(s) mobilisés par le patients mais calculé(s) par les spiromètres :

soit dans la pléthysmographie « en boîte » par compensation d'air par sa buse inférieure,

soit par calcul par algorithme mathématique de la pléthysmographie « en caisson »

$PV = \text{constante}$ transforme une variation de pression mesurable en une variation de volume recherchée

Loi n°3, la mécanique ventilatoire, $P = E_{rs} \times V + R_{rs} \times Q$

Pendant l'écoulement (INSpiration, Expiration) $P = E_{rs} \times V + R_{rs} \times Q$, mais pendant la série d'occlusions successives de la procédure de mesures de la CPT par la MiniBox +, $Q = 0$ donc P (ou dP/dt) = $E_{rs} \times V + 0$

l'occlusion « annule » la composante résistive).

Règle (plutôt qu'une loi) n°4, nécessité d'une synchronisation

Le système de mesure par pléthysmographie « Body-Box, et « Caisson » doit savoir (considérer) les dates et zéro du(des) cycle(s) ventilatoire(s) du patient, ce qui implique les mesures continues (de fait en échantillonnage propriétaires, 50 Hz pour MiniBOX +) des débits (Q) par les pneumotachographes (spiromètres) inclus dans les pléthysmographes (en *boite* et en *caisson*)

Règle n°5 (plutôt qu'une loi), un volume de référence doit être connu, le volume de la boîte pour les « Body-box », le caisson pour la « MiniBOX » : $\approx 15,8 \text{ l}$ (16,3 l) pour pouvoir convertir : ΔP caisson ou ΔP boîte en information volumique.

La métrologie (voire la philosophie) des « Body-box » se résume en : « On fait gonfler le patient dans une boîte et on mesure la pression dans la boîte où il y a le patient. »

La métrologie (voire la philosophie) de la PulmOne-MiniBox+ : « On fait dépressuriser/pressuriser un volume d'air connu en caisson par l'effort ventilatoire du patient et on mesure débit et pression dans le système caisson-patient ». C'est une pléthysmographie « externalisée : le patient n'a plus besoin d'être enfermé dans le volume de référence, la boîte, ni assis, *il peut même être debout ou couché pour mesurer son VR et sa CPT.*

Si il fallait comparer les exactitudes, justesses, précisions, reproductibilités entre les pléthysmographies « en boîte » et « en caisson » il faudrait les comparer à l'absolu, à sa savoir la pléthysmographie de dilution à l'Hélium puisque son référentiel est $C1V1 = C2V2$ et la diffusion de l'Hélium au travers de la barrière alvéolo-capillaire est *epsilon*ienne

Abstract physique

La pléthysmographie en caisson (PulmOne MiniBOX+) mesure simultanément la réponse en pression du volume de référence et la dynamique du débit/volume pulmonaire, lors de multiples interruptions très brèves, pour reconstruire un volume pulmonaire absolu.

Cette architecture (caisson connu, valve, pneumotachographe, patient) permet d'obtenir une mesure de CPT (CHEST 2021 ; comparable à la body-box) sans enfermer le patient dans une cabine.

Berger K et al., Validation of a Novel Compact System for the Measurement of Lung Volumes, CHEST, 1er février 2021, DOI [10.1016/j.chest.2021.01.052](https://doi.org/10.1016/j.chest.2021.01.052).