

Mesure des volumes pulmonaires

Séminaire « Bases de physiologie respiratoire » - Phase socle
Vendredi 20 janvier 2023

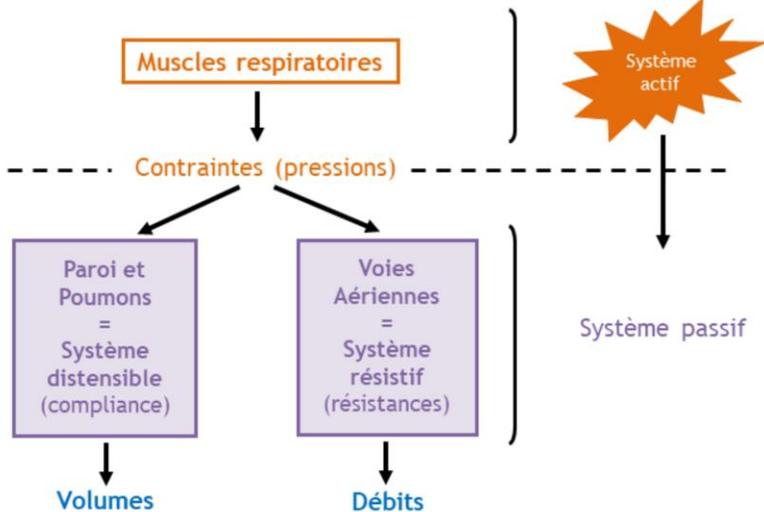
Dr Thomas GILLE, MCU-PH
UFR SMBH, Université Sorbonne Paris Nord
thomas.gille@aphp.fr

Plan

- I. Intérêt des explorations fonctionnelles respiratoires (EFR) de repos**
- II. Principes et mesures**
 - A. Volumes
 - B. Résistances et conductances
- III. Interprétation des résultats**
 - A. Aspects méthodologiques
 - B. Volumes
 - 1. Trouble ventilatoire restrictif
 - 2. Distension
 - C. Résistances et conductances
 - D. Trouble ventilatoire mixte

Intérêt des EFR de repos

Mécanique ventilatoire



Indications des EFR de repos

- Examens permettant d'explorer **le fonctionnement** et **l'efficacité** de l'appareil respiratoire

Indications

- **Bilan étiologique** en cas de **symptômes respiratoires** (dyspnée, toux)
- **Diagnostic d'une anomalie fonctionnelle** :
 - maladie respiratoire
 - maladie extra-pulmonaire susceptible de retentir sur l'appareil respiratoire
- **Dépistage d'une anomalie fonctionnelle** en cas de **maladie respiratoire familiale**
- **Quantification de la sévérité de l'atteinte fonctionnelle** :
 - évaluation initiale
 - évolution (spontanée, sous traitement, après une procédure chirurgicale)
- **Évaluation pré-opératoire** de la fonction respiratoire (chirurgie thoracique +++)
- **Retentissement fonctionnel respiratoire de diverses conditions environnementales** :
 - tabagisme et exposition à d'autres aérocontaminants
 - traitement potentiellement pneumotoxique
 - contraintes mécaniques ou barométriques (ex : plongée sous-marine)
- **Mesure de la réactivité bronchique** lors de tests de provocation bronchique

Explorations de routine

Air ambiant

Ventilation totale
Ventilation alvéolaire moyenne

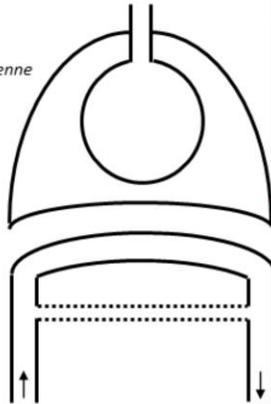
Gaz alvéolaire moyen

Distribution ventilation
Membrane alvéolo-cap.
Distribution perfusion

Gaz du sang artérialisé

Shunts anatomiques

Gaz du sang aortique



Commande ventilatoire

- . Gazométrie artérielle
- . Test de provocation d'hyperventilation

Appareil thoraco-pulmonaire

- . Volumes pulmonaires
 - . Débits des voies aériennes
 - . Conductances des voies aériennes
 - . Bronchomotricité
(test de réversibilité, provocation méthacholine)
 - . Muscles respiratoires
(P_{Imax}, P_{Emax}, SNIP, spirométrie de décubitus)
- } Spirométrie + pléthysmographie

- . Capacité de transfert du CO (DLCO)
± du NO (DLNO)

- . Gazométrie artérielle
en air ambiant ou sous O₂

Etude globale

- . Epreuve d'exercice

Explorations spécialisées

Air ambiant

Ventilation totale
Ventilation alvéolaire moyenne

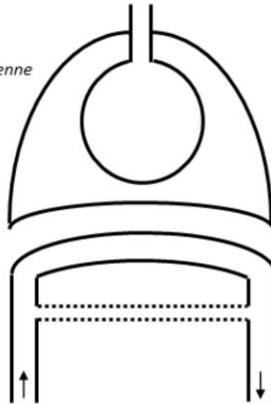
Gaz alvéolaire moyen

Distribution ventilation
Membrane alvéolo-cap.
Distribution perfusion

Gaz du sang artérialisé

Shunts anatomiques

Gaz du sang aortique



Commande ventilatoire

- . P_{O_2} , I_{ms}
- . Réponse ventilatoire au CO_2 et/ou à l'hypoxie

Appareil thoraco-pulmonaire

- . Compliance pulmonaire
(oscillométrie d'impulsion, ballonnet œsophagien)
- . EMG diaphragmatique

- . Mesure du NO exhalé

Réalisation des EFR

Conditions de réalisation

- Sujet avec état respiratoire stable
- Sujet conscient et coopérant, apte à comprendre les consignes
- Sujet pouvant se tenir en position assise ou debout, pouvant réaliser des cycles respiratoires « forcés »
- Prise préalable d'antalgiques en cas de douleur buccale ou thoraco-abdominale
- Noter tous les traitements pouvant interagir avec l'appareil respiratoire
- Eviter juste avant les épreuves : alcool ou autres psychotropes, tabac, jeûne, repas copieux, exercice intense

Contre-indications

- Pneumothorax récent
- Hémoptysie récente
- Tuberculose bacillifère
- Pathologie respiratoire aiguë (ex : pneumopathie infectieuse) ou décompensée (ex : crise d'asthme)
- Infarctus récent, pathologie cardiaque aiguë ou décompensée
- Asthénie majeure, incapacité de comprendre ou de réaliser les tests
- Douleur buccale ou thoraco-abdominale mal soulagée par les antalgiques
- Incontinence urinaire d'effort

Attention aux traitements inhalés si test de réversibilité envisagé

Réalisation des EFR

Conditions de réalisation

- Sujet avec état respiratoire stable
- Sujet conscient et coopérant, apte à comprendre les consignes
- Sujet pouvant se tenir en position assise ou debout, pouvant réaliser des « forcés »
- Prise préalable d'antalgiques en cas de douleur buccale
- Noter tous les traitements pouvant interagir
- Eviter juste avant les épreuves un exercice intense

Contre-indications

- Pneumopathie infectieuse ou décompensée (ex : crise d'asthme)
- Pathologie cardiaque aiguë ou décompensée
- Incapacité majeure, incapacité de comprendre ou de réaliser les tests
- Douleur buccale ou thoraco-abdominale mal soulagée par les antalgiques
- Incontinence urinaire d'effort

**EFR = examen de l'état stable
chez patient conscient et coopérant**

Attention aux traitements inhalés si test de réversibilité envisagé

Principes et mesures

Volumes

Deux types de volumes

Volumes mobilisables

- **Volume courant** ou volume de Tidal (VT)
- **Volumes de réserve inspiratoire et expiratoire** (VRI et VRE)
- Leur somme constitue la **capacité vitale** (CV)

→ Mesurables en spirométrie simple

Volumes non mobilisables

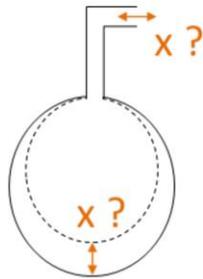
- **Volume résiduel** (VR) = volume gazeux contenu dans le poumon à la fin d'une expiration maximale
- **Capacité résiduelle fonctionnelle** (CRF) = volume gazeux contenu dans le poumon à l'état de repos, c'est-à-dire à la fin d'une expiration normale
- La somme VR + CV = **capacité pulmonaire totale** (CPT)

→ Non mesurables en spirométrie

CRF : position d'équilibre du système thoraco-pulmonaire, lorsque la pression de rétraction pulmonaire est égale à la force d'expansion de la paroi thoracique.

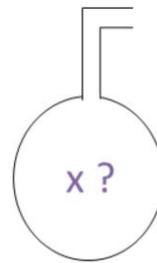
Mesure des volumes

Deux types de mesures de volumes



Volumes mobilisés

- Spirométrie



Volumes absolus

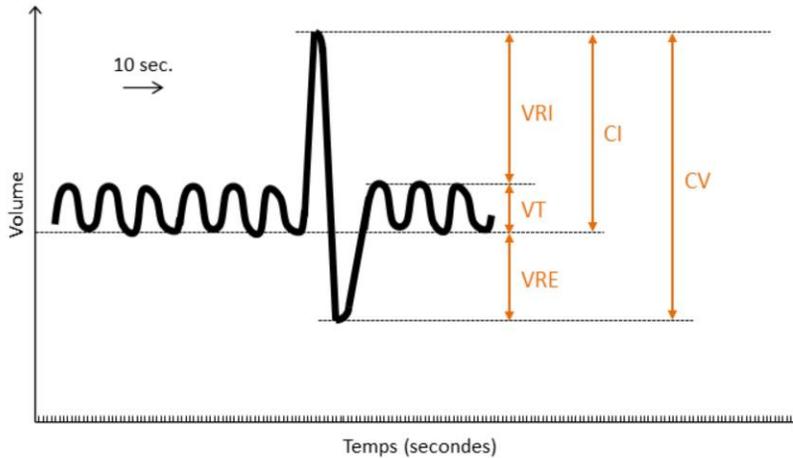
- Pléthysmographie
- Dilution à l'hélium

La **spirométrie** simple permet de mesurer les volumes mobilisables (et également les débits). **C'est l'examen pivot des EFR.**

Le VR est un volume non mobilisable, la CRF et la CPT qui contiennent le VR sont partiellement non mobilisables : pour les mesurer, il faut utiliser une technique supplémentaire.

Volumes pulmonaires mobilisables

Ils sont directement mesurables par spirométrie simple



Ce tracé volume / temps est appelé un spirogramme.

VT : volume courant (≈ 500 ml).

VRI : volume de réserve inspiratoire (≈ 2500 ml).

VRE : volume de réserve expiratoire (≈ 1500 ml).

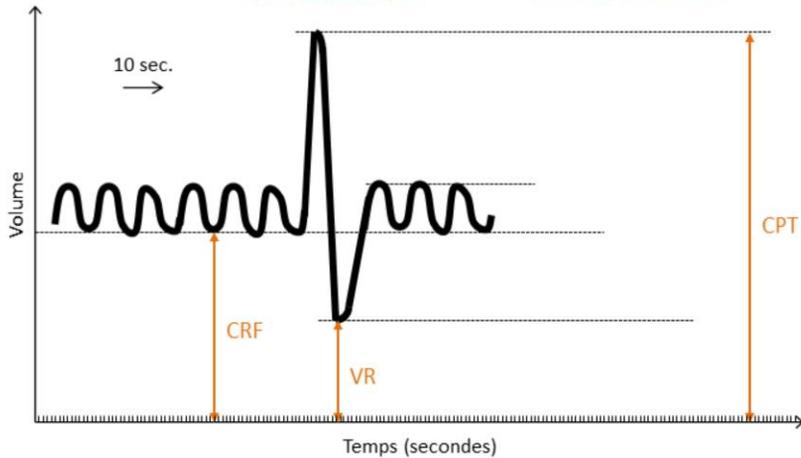
CI : capacité inspiratoire (≈ 3000 ml).

CV : capacité vitale (≈ 4500 ml).

Les valeurs des volumes sont données à titre indicatif pour un sujet « moyen » mais il existe en fait une grande variation en fonction du sexe, de la taille et de l'âge.

Volumes pulmonaires non mobilisables

Ils ne peuvent pas être mesurés par une spirométrie simple :
nécessité d'une pléthysmographie ou d'une dilution à l'hélium



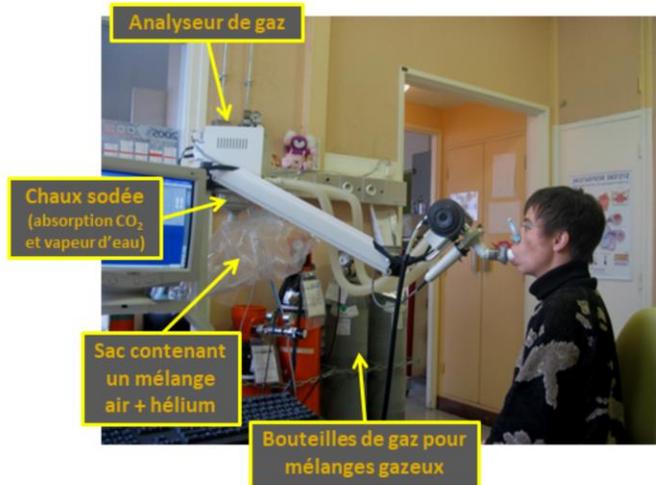
VR : volume résiduel (≈ 1500 ml), entièrement non mobilisable.

CRF : capacité résiduelle fonctionnelle (≈ 3000 ml).

CPT : capacité pulmonaire totale (≈ 6000 ml).

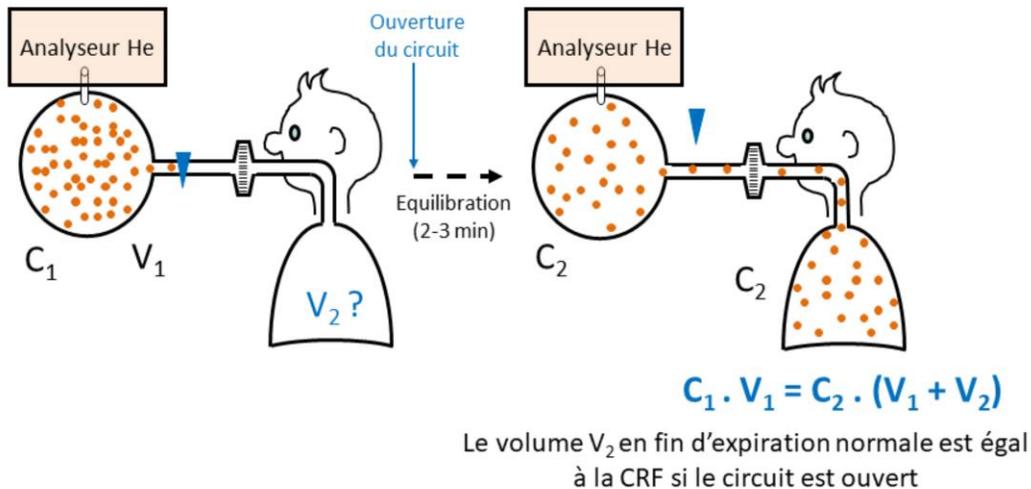
Les valeurs des volumes sont données à titre indicatif pour un sujet « moyen » mais il existe en fait une grande variation en fonction du sexe, de la taille et de l'âge.

Dilution à l'hélium



L'hélium ne traverse quasiment pas la barrière alvéolo-capillaire et va se répartir entre les voies aériennes et le système (les tuyaux)

Dilution à l'hélium



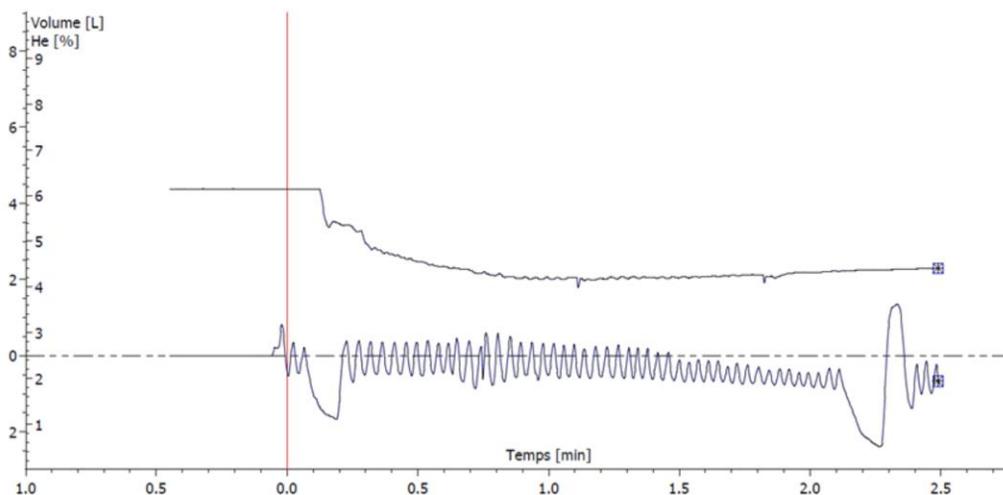
Le volume V_2 en fin d'expiration normale correspond à la CRF.
(le volume V_1 du système est connu, les concentrations C_1 et C_2 sont mesurées par l'analyseur de gaz)

Attention : un trouble de ventilation important risque d'entraîner une sous-estimation de la CRF (ex : bulles d'emphysèmes non ou mal ventilées, ou même une obstruction sévère avec ventilation très hétérogène). A l'inverse, le volume gazeux thoracique mesuré par pléthysmographie prend en compte tous les territoires pulmonaires, y compris ceux qui ne sont pas ou peu ventilés.

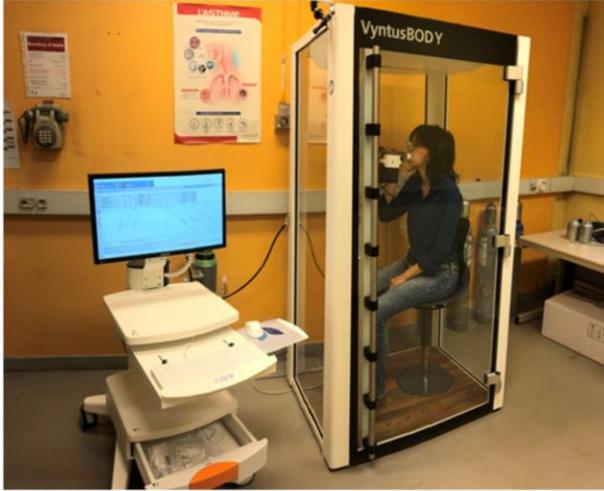
Par ailleurs, la dilution à l'hélium ne permet pas de mesurer les résistances des voies aériennes.

En pratique, on réserve la dilution à l'hélium aux rares patients présentant une contre-indication spécifique à la pléthysmographie (claustrophobie, obésité majeure, plâtre ou fixateur externe du membre inférieur...) ou réalisant mal les manœuvres d'occlusion.

Dilution à l'hélium



Pléthysmographie



Le pléthysmographe est une cabine étanche et indéformable équipée de **capteurs de pression** très sensibles

Elle permet de mesurer la **CRF**, et après l'avoir couplée à une spirométrie d'en déduire les valeurs du **VR** et de la **CPT**

Le calcul repose sur la loi de Boyle-Mariotte : **$P \cdot V = \text{constante}$** (pour une température constante)

Elle permet également de mesurer **les résistances des voies aériennes**

Mesure de la CRF et des résistances des voies aériennes par pléthysmographie corporelle totale.

On peut ensuite calculer les autres volumes non mobilisables :

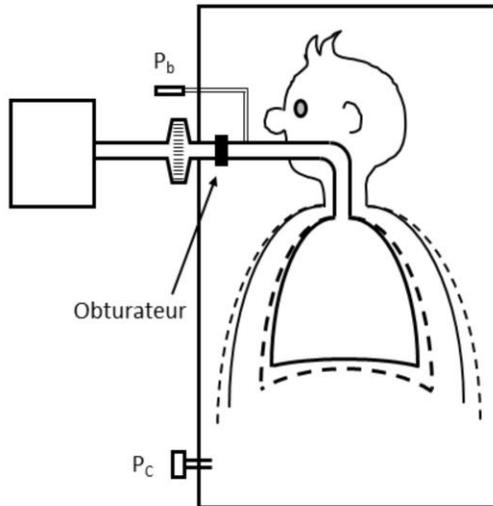
$$\mathbf{VR = CRF - VRE}$$

$$\mathbf{CPT = VR + CV}$$

On va également calculer les conductances spécifiques des voies aériennes :

- la valeur des conductances totales est l'inverse de la valeur des résistances totales,
- pour calculer les conductances spécifiques, on rapporte les conductances totales au volume pulmonaire.

Pléthysmographie : occlusion



Un capteur de pression buccale (P_b) et un capteur de pression dans la cabine (P_c)

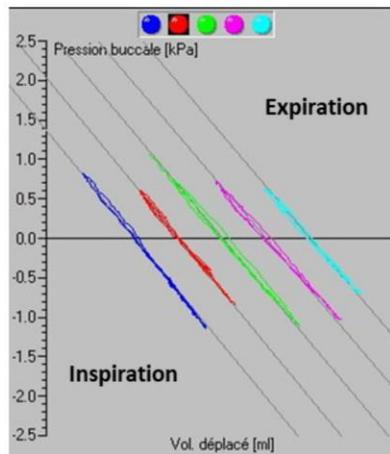
Mesure en circuit fermé (occlusion) :

- Compression-détente du gaz dans la cabine, **les variations de pression correspondent aux variations de volume thoracique**
- Egalisation de la pression buccale avec la pression alvéolaire (P_A) car pas de débit, on peut donc mesurer les **variations de P_A**

On obtient une **courbe d'occlusion** dont la **pente est fonction de la valeur de CRF**

On demande au patient de réaliser des mouvements respiratoires contre une occlusion des voies aériennes (comme si on lui plaquait une main sur la bouche). L'occlusion est déclenchée au moment où le sujet est à sa CRF, c'est donc ce volume qui est mesuré.

Pléthysmographie : VGT



P . V = constante (Loi de Boyle-Mariotte)

$$P_0 \cdot V_0 = (P_0 + \Delta P_A) \cdot (V_0 + \Delta V_A)$$

$$P_0 = P_{\text{bouche}} (P_b)$$

$V_0 = \text{VGT}$: volume gazeux thoracique (\approx CRF)

$$\text{VGT} = - (\Delta V_A / \Delta P_A) \cdot P_b$$

→ VGT est fonction de la pente de la courbe d'occlusion

Quand P_b devient négative => mouvement inspiratoire (majoration de la dépression pleurale).

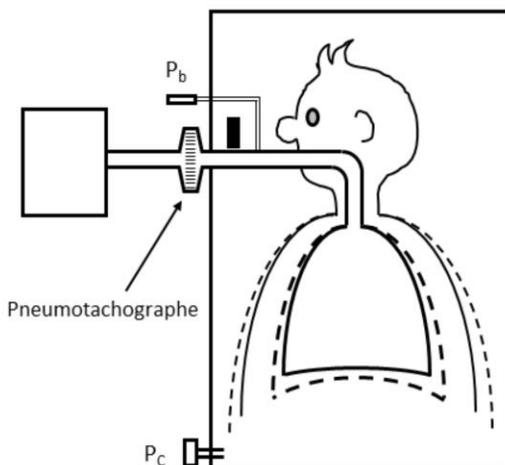
Le VGT dépend donc de la relation entre dV_A et dP_A , c'est à dire de la pente de la courbe d'occlusion.

Cette méthode de détermination de la CRF est plus fiable qu'une spirométrie avec dilution à l'hélium car elle ne méconnaît pas d'éventuelles zones mal ventilées.

Principes et mesures

Résistances et conductances

Pléthysmographie : résistances



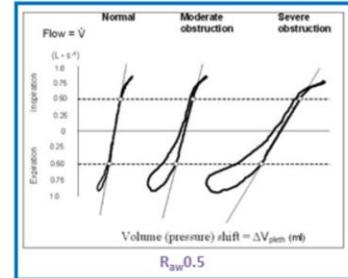
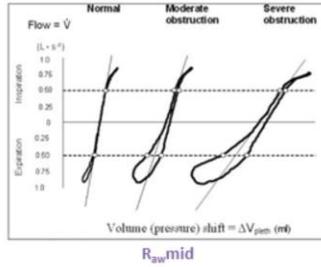
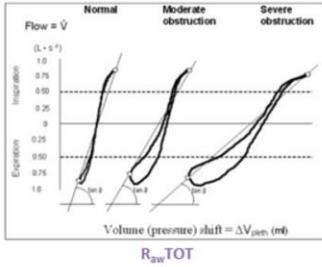
$$R = (P_b - P_A) / \dot{V}$$

La mesure des résistances nécessite de connaître la relation $\dot{V} / \Delta P_A$:

- Relation $\dot{V} / \Delta V \rightarrow$ fournie par les courbes de résistances (circuit ouvert)
- Relation $\Delta P_A / \Delta V \rightarrow$ fournie par les occlusions

Il faut avoir fait une courbe d'occlusion auparavant pour pouvoir mesurer les résistances (impossible avec la dilution à l'hélium).

Pléthysmographie : résistances

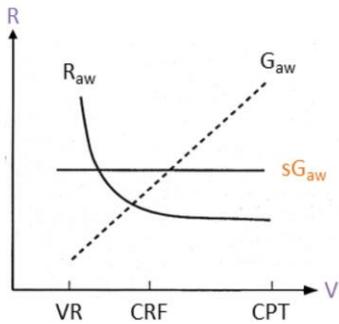


Résistances des voies aériennes (R_{aw}) proportionnelles à la pente des courbes de résistances

La pente la plus fiable est celle comprise entre 0,5 et -0,5 l/s de débit ($R_{aw0.5}$), on ne tient pas compte de la forme sigmoïde à débits plus élevés

Bisgaard & Nielsen, *Chest* (128) 2005

Résistances et conductances totales et spécifiques



$$R_{aw}$$

$$sR_{aw} = R_{aw} \cdot VGT$$

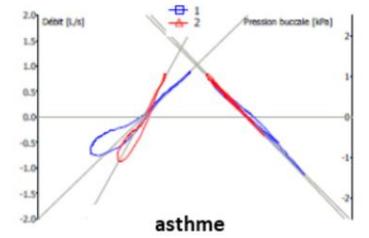
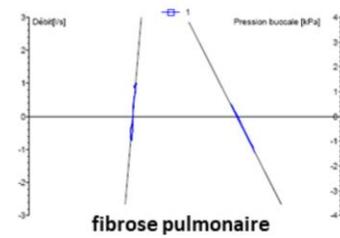
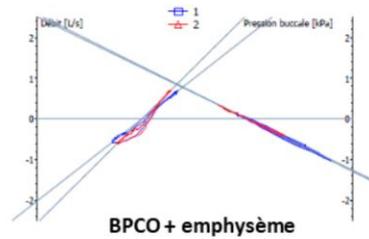
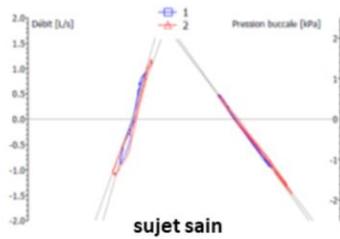
$$G_{aw} = 1 / R_{aw}$$

$$sG_{aw} = G_{aw} / VGT$$

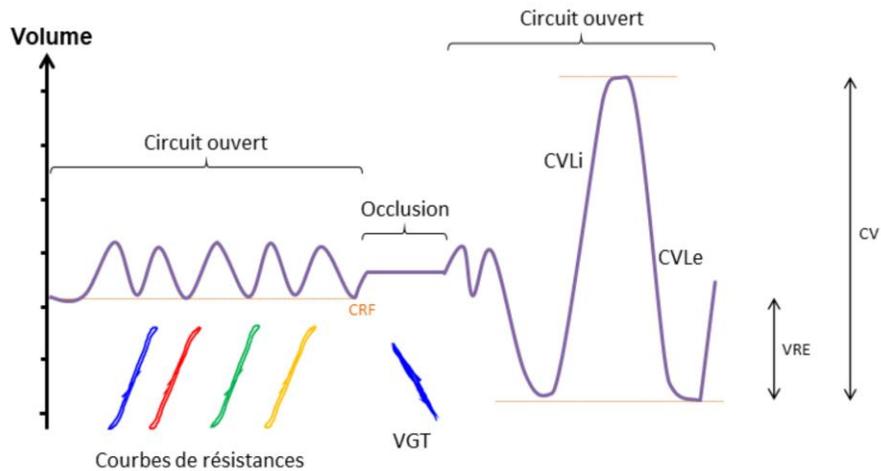
Les **conductances spécifiques (sG_{aw})** sont les plus représentatives de l'anatomie des voies aériennes

Elles sont normales si elles sont **> 100 % théorique**

Courbes de résistances



Séquence des manœuvres

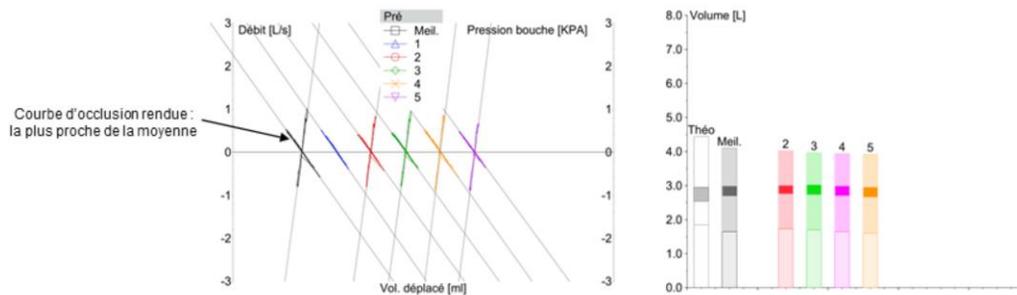


La CRF pléthysmographique correspond au VGT corrigé : selon l'espace mort du circuit que le logiciel prend en compte, et selon le décalage entre le VGT mesuré lors de l'occlusion et le niveau réel de la CRF.

Occlusions : critères de qualité

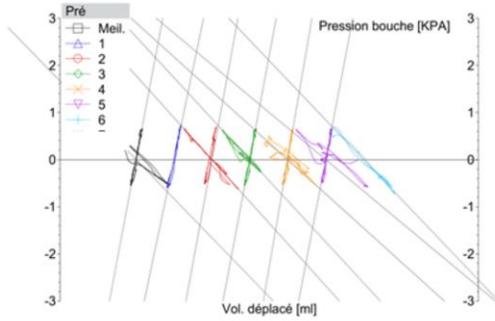
- VGT/CRF : **au moins 3 mesures reproductibles**
 - Vérification manuelle des pentes
 - Variation < 5-10 % entre les courbes conservées
 - On rend la **moyenne des CRF conservées**
 - il faut **éliminer les occlusions de mauvaise qualité**
 - Savoir ne rien rendre plutôt qu'une valeur peu fiable (jusque 10 % des examens)
- **Vérifier la cohérence des volumes non mobilisables rendus** (composites)
 - **VR rendu : CRF moyenne – meilleur VRE**
 - **CPT rendue : VR rendu + meilleure CV**
 - CPT et VR rendus comparés aux CPT et VR des différentes occlusions (en général OK si le meilleur VRE correspond ≈ à la meilleure CV)

Occlusions : critères de qualité

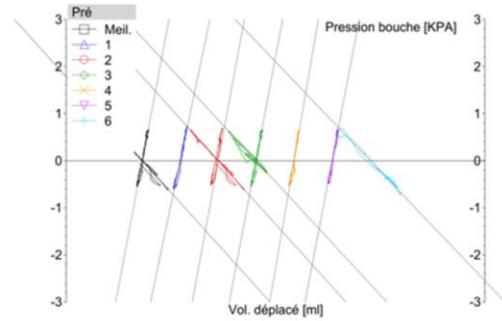


	Théo	LIN	Meil. 1	% pred	Es 1	Es 2	Es 3	Es 4	Es 5	Es 6	Es 7
CV max	2.38	1.69	2.46	103.1	2.32	2.30	2.27	2.29	2.32	2.33	2.43
VR	1.85	1.27	1.64	89.0	1.54	1.73	1.69	1.65	1.60		
CPT	4.44	3.45	4.10	92.9	3.86	4.03	3.97	3.94	3.92		
CI	1.69	1.69	1.40	82.5	1.30	1.26	1.23	1.24	1.26		
VRE	0.69	0.69	1.06	153.4	1.02	1.04	1.04	1.05	1.06		
VR%CPT	41.1	31.5	40.1	97.6	39.9	43.0	42.7	41.9	40.8		
CRFpl	2.54	1.71	2.70	106.6	2.56	2.77	2.74	2.70	2.66		
CRFpl%	55.5	45.7	66.0	118.8	66.3	68.7	69.0	68.6	67.9		

Sélection des courbes



	Théo	LIN	Meil. 1	% pred	Es 1	Es 2	Es 3	Es 4	Es 5	Es 6
CRFpl	2.59	1.77	3.88	149.8	3.47	3.33	4.33	4.68	3.59	

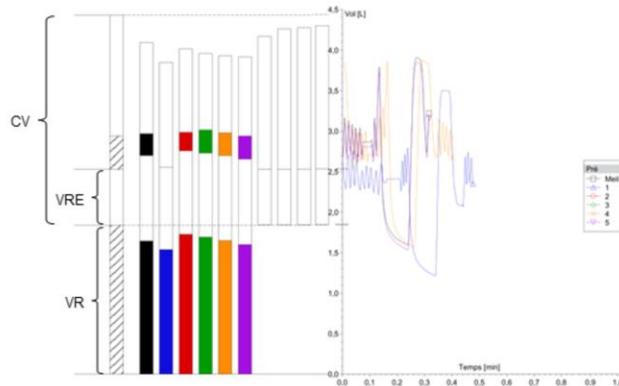


	Théo	LIN	Meil. 1	% pred	Es 1	Es 2	Es 3	Es 4	Es 5	Es 6
CRFpl	2.59	1.77	3.46	133.6	3.47	3.33	×	×	3.59	

CVL : critères de qualité

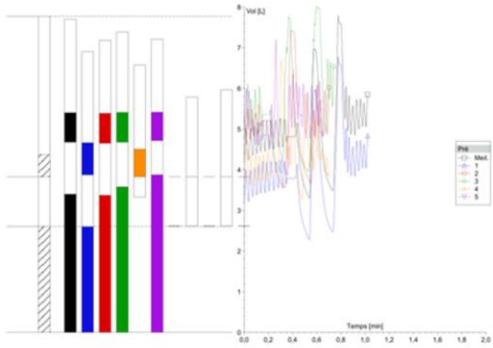
- Au moins **3 mesures reproductibles**
 - Ecart < 150-200 ml ou 10 %
 - La meilleure valeur est rendue

	Mes.1	% pred	ES 1	ES 2	ES 3	ES 4	ES 5
CV max	2.46	103	2.32	2.30	2.27	2.29	2.32
CVI	2.32	97	2.32	2.30	2.27	2.29	2.32
CV EX	2.32	97		2.15	2.23	2.29	2.32



Mauvaise reproductibilité

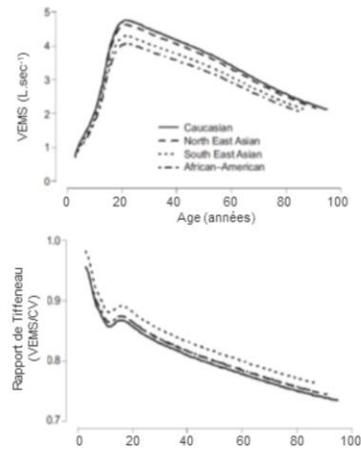
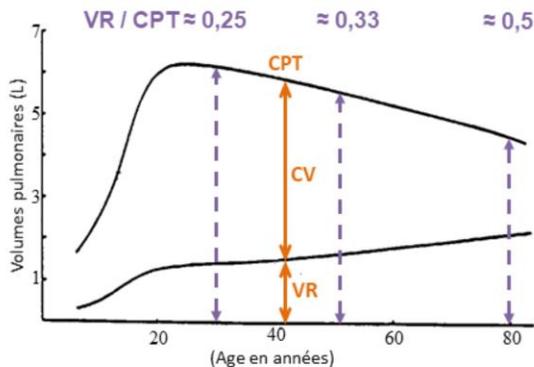
	Mes. 1	% Pred.	Es 1	Es 2	Es 3	Es 4	Es 5
CV	4.32	88	4.32	3.82	3.81	3.25	3.34
CVI	4.32	88	4.32	3.82	3.27	2.62	2.42
CVE	3.81	78	3.47	3.74	3.81	3.25	3.34
CI	3.03	82	3.03	2.53	2.71	2.75	2.49
VRE	1.29	105	1.28	1.29	1.11	0.51	0.85



Interprétation des résultats

Aspects méthodologiques

Variations au cours de la vie



L'expression des résultats en valeur absolue est insuffisante

Les volumes pulmonaires varient au cours de la vie. Les volumes mobilisables et non mobilisables augmentent de la naissance jusqu'à la fin de la croissance (environ 20 ans). Après cela, la CV et la CPT diminue progressivement avec le vieillissement du système thoraco-pulmonaire alors que le VR continue d'augmenter (mais plus lentement que lors de la phase de croissance).

Des plus grands poumons génèrent des plus grands débits, ainsi les débits aériens déclenchés par des mouvements respiratoires forcés maximaux augmentent eux aussi entre la naissance et la fin de la croissance (seul le VEMS est représenté ici). Par la suite, ils diminuent également.

On note que la CV augmente plus vite que le VEMS lors de la croissance, et que le VEMS va diminuer plus vite que la CV après 20 ans : ainsi le rapport de Tiffeneau (correspondant au ratio du VEMS sur la CV) va décroître tout au long de la vie (hormis un « rebond » à l'adolescence).

Stratégies d'interprétation

- **Longitudinale**

- La valeur mesurée est comparée à la meilleure valeur personnelle du sujet
Exemple : suivi d'un sujet exposé à un risque professionnel

- **Transversale**

- La valeur mesurée est comparée à celles observées dans la population saine (absence de tabagisme, absence de pathologie cardio-respiratoire connue)
Exemple : première exploration d'un sujet symptomatique



**Repose sur des valeurs normatives
et une définition de la normalité**

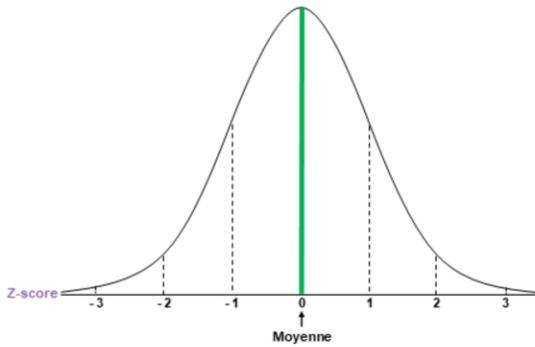
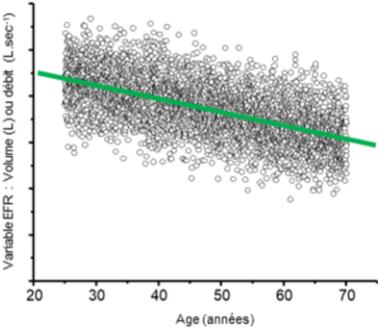
Les variables mesurées au cours des EFR sont exprimées en **valeur absolue** et en **pourcentage des valeurs de référence du patient**.
Elles sont interprétées en fonction du contexte clinique et de la qualité de l'exécution de l'épreuve.

Valeurs de référence (théoriques)

- **Compilation de variables EFR de sujets « sains » :**
 - Pas d'intoxication tabagique
 - Pas de maladie cardio-respiratoire connue
- **Modèle mathématique** prenant en compte des **variables explicatives** :
 - **Âge**
 - **Taille**
 - **Sexe**
 - ± Ethnie
- Répartition des valeurs individuelles :
 - **Moyenne**
 - Distribution : **Z-score** (\approx écart-type) → **déviatio**n par rapport à la moyenne

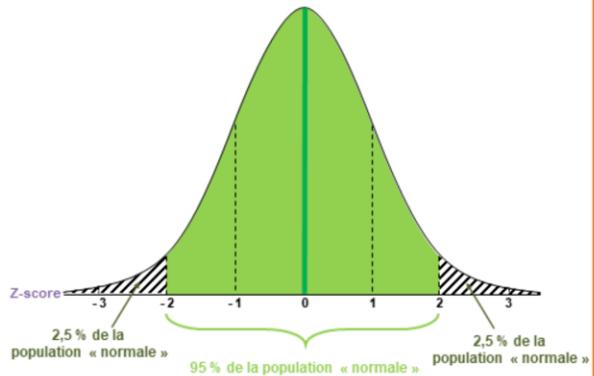
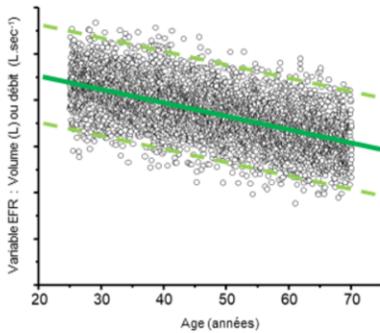
Valeurs de référence = valeurs théoriques = valeurs attendues

Valeur théorique moyenne



Distribution de la population saine

Pour une variable EFR donnée, 90 % des valeurs de la population « normale » (ou « saine ») sont réparties entre -2 et +2 de Z-score



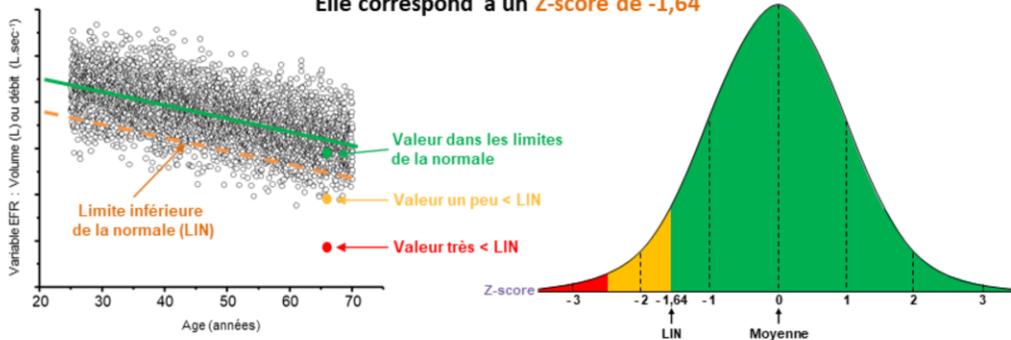
En vérité la répartition de la population pour les variables EFR n'est pas strictement gaussienne (= ne suit pas strictement une loi normale), mais une manipulation mathématique permet de calculer le Z-score qui représente la déviation par rapport à la moyenne (c'est-à-dire à peu près l'équivalent de l'écart-type si la répartition avait été gaussienne).

Lorsqu'un sujet se situe au niveau de la théorique moyenne pour une variable EFR donnée, le Z-score est de zéro (pas de déviation).

Limite inférieure de la normale

La **limite inférieure de la normale (LIN)** est la valeur telle que seuls 5 % des sujets « normaux » de même âge / taille / sexe ont une valeur inférieure à cette valeur

Elle correspond à un **Z-score de -1,64**



Un Z-score < -1,64 est donc généralement pathologique

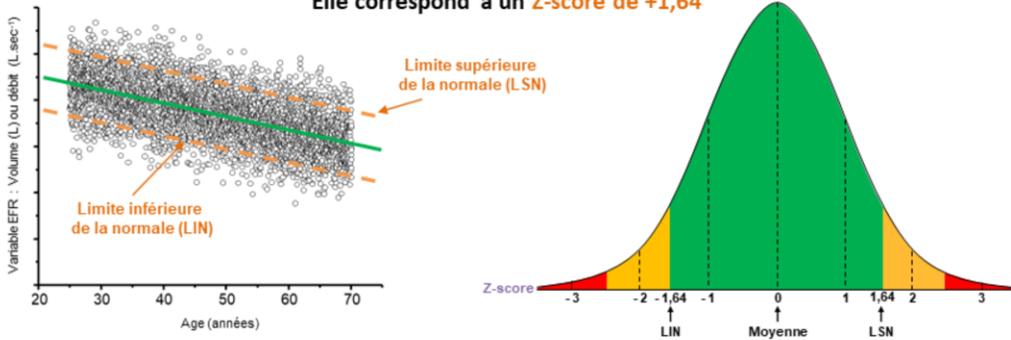
Les anomalies du système respiratoire vont en général entraîner des **diminutions** de certaines variables EFR, ainsi on va surtout s'intéresser à la **limite inférieure de la normale (LIN)**.

Pour une variable EFR donnée chez un sujet, une valeur < LIN est généralement pathologique dans la grande majorité des cas (même s'il y a 5 % de la population « normale » qui peut présenter cette valeur). En pratique, plus on s'éloigne de la LIN (plus le Z-score est bas), plus la probabilité que le sujet présente de manière constitutionnelle une valeur aussi petite est faible ou inexistante, et donc plus la probabilité que cela corresponde bien à une **diminution pathologique** de la variable concernée est importante.

Limite supérieure de la normale

La **limite supérieure de la normale (LSN)** concerne uniquement les variables en rapport avec les volumes non mobilisables (VR, CRF, CPT, rapport VR/CPT)

Elle correspond à un **Z-score de +1,64**



Il n'y a pas de LSN pour les volumes mobilisables ni pour les débits

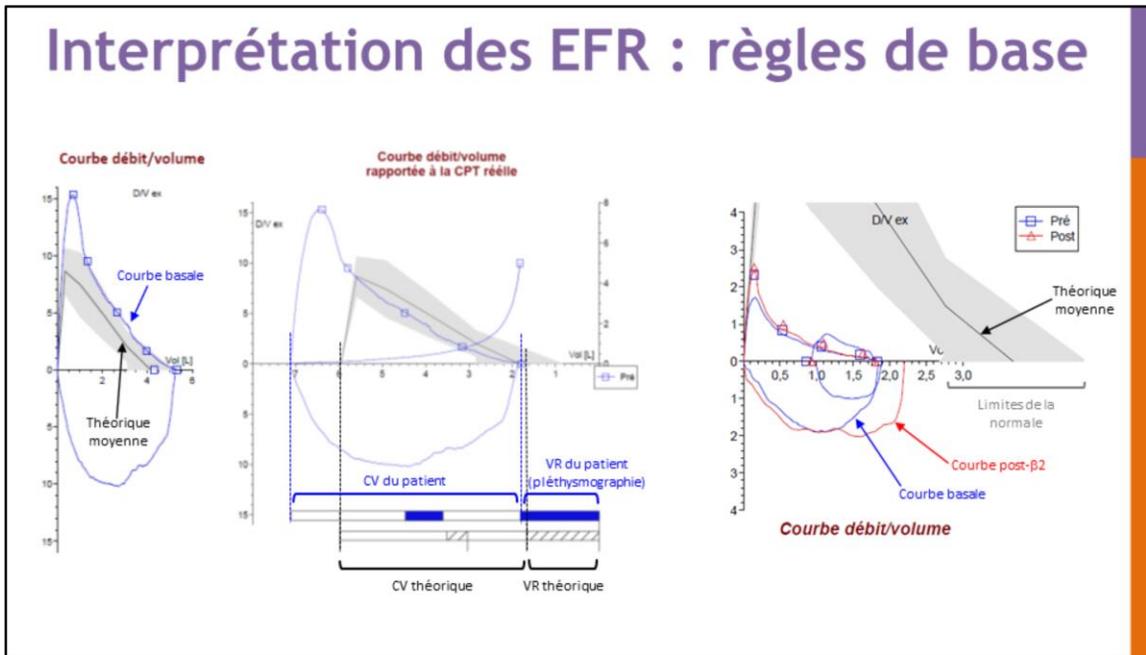
Un Z-score $> +1,64$ est généralement pathologique si on considère les volumes non mobilisables ou le rapport VR/CPT.

En revanche, un Z-score positif est normal quelle que soit sa valeur si on considère les volumes mobilisables ou les débits.

Interprétation des EFR : règles de base

- 1- Première étape = **vérifier l'exécution**
- 2- Regarder les **courbes** avant les **chiffres**
- 3- Commencer par les **volumes**
 - CPT
 - autres volumes (répartition homogène ?)
- 4- Résistances/conductances spécifiques
- 5- **Débits**
 - Tiffeneau
 - VEMS basal, VEMS post-bronchodilatateurs
 - ~~débits instantanés~~ (= forme de la courbe)
- 6- Terminer par la **diffusion**
- 7- **Comparer** avec les **EFR précédentes**

Interprétation des EFR : règles de base



La représentation de la courbe débit/volume rapportée à la CPT réelle permet de suspecter une distension pulmonaire associée (courbe déviée à gauche) ou au contraire un trouble ventilatoire restrictif (courbe déviée à droite).

La représentation de la courbe débit/volume « ramenée à zéro » permet de mieux évaluer la forme de la courbe (notamment s'il existe une concavité) et de comparer courbe basale et courbe post-bronchodilatateurs.

Interprétation des EFR : règles de base

	Théo.	LIN	Basal	% Théo.	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Z-Score
Capacité vitale Pleth.	[L]	4.31	3.39	5.31	123							1.78
Vol. Residuel Pleth.	[L]	1.68	1.00	1.81	108							0.34
Cap. Pulm. Totale Pleth.	[L]	5.94	4.79	7.12	120							1.69
CRF pléthysmo.	[L]	3.04	2.05	3.61	119							0.95
VR % CPT pleth.	[%]	27.61	18.63	25.45	92							-0.40
CV Forcée Expi	[L]	4.14	3.14	5.20	126							1.74
VEMS	[L]	3.50	2.67	4.27	122							1.49
VEMS % CV MAX	[%]	80.9	69.1	81.9	101							0.14
DEMM 25/75	[L/s]	4.36	2.65	4.11	94							-0.23
Débit de Pointe Expiratoire	[L/s]	8.65	6.66	13.59	157							4.08

Valeur prédite ou théorique moyenne pour chaque variable (en fonction de l'âge, de la taille et du sexe)

Valeur du patient mesurée pour chaque variable, courbe « basale » ou « pré » (= sans bronchodilatateur)

Valeur mesurée / valeur théorique moyenne x 100
Ici par exemple pour le VEMS : $4,27 / 3,50 \times 100 = 122\%$ de la théorique

ATTENTION, il ne faut pas confondre la valeur absolue du Tiffeneau (pourcentage de la CV expiré dans la première seconde) et le pourcentage de la théorique.

Dans cet exemple, les Tiffeneau est de 82 % en valeur absolue : $VEMS / CV \text{ max} = 4,27 / 5,31 = 0,82 = 82\%$

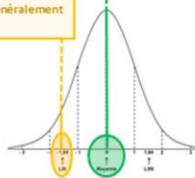
Sa valeur est de 101 % de la valeur théorique : $82 / 81 = 1,01 = 101\%$

Interprétation des EFR : règles de base

	Théo.	LIN	Basal	% Théo.	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Z-Score
Capacité vitale Pleth.	[L]	4.31	3.39	5.31	123							1.78
Vol. Residuel Pleth.	[L]	1.68	1.00	1.81	108							0.34
Cap. Pulm. Totale Pleth.	[L]	5.94	4.79	7.12	120							1.69
CRF pléthysmo.	[L]	3.04	2.05	3.61	119							0.95
VR % CPT pleth.	[%]	27.61	18.63	25.45	92							-0.40
CV Forcée Expi	[L]	4.14	3.14	5.20	126							1.74
VEMS	[L]	3.50	2.67	4.27	122							1.49
VEMS % CV MAX	[%]	80.9	69.1	81.9	101							0.14
DEMM 25/75	[L/s]	4.36	2.65	4.11	94							-0.23
Débit de Pointe Expiratoire	[L/s]	8.65	6.66	13.59	157							4.08

Un Z-score < -1,64 correspond à une valeur inférieure à la limite inférieure de la normale (LIN) : seuls 5 % des sujets sains de même âge / taille / sexe sont situés en deçà de cette valeur, elle est donc généralement pathologique

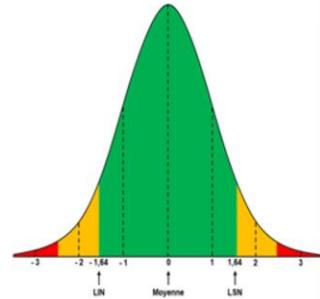
Valeur prédite ou théorique moyenne pour chaque variable (en fonction de l'âge, de la taille et du sexe)



Z-score : déviation par rapport à la moyenne

Interprétation des EFR : règles de base

	Théo.	LIN	Basal	% Théo.	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Z-Score
Capacité vitale Pleth.	[L]	4.31	3.39	5.31	123							1.78
Vol. Residuel Pleth.	[L]	1.68	1.00	1.81	108							0.34
Cap. Pulm. Totale Pleth.	[L]	5.94	4.79	7.12	120							1.69
CRF pléthysmo.	[L]	3.04	2.05	3.61	119							0.95
VR % CPT pleth.	[%]	27.61	18.63	25.45	92							-0.40
CV Forcée Expi	[L]	4.14	3.14	5.20	126							1.74
VEMS	[L]	3.50	2.67	4.27	122							1.49
VEMS % CV MAX	[%]	80.9	69.1	81.9	101							0.14
DEMM 25/75	[L/s]	4.36	2.65	4.11	94							-0.23
Débit de Pointe Expiratoire	[L/s]	8.65	6.66	13.59	157							4.08



3 stratégies d'interprétation possibles (à peu près équivalentes) :

- Comparaison valeur mesurée et **LIN** (ou LSN)
- **Valeur du Z-score** = importance de la déviation de la valeur mesurée par rapport à la moyenne
- Comparaison valeur mesurée et valeur théorique (« normale ») = **pourcentage de la théorique** (mais il faut connaître pour chaque variable à quelle pourcentage de la théorique correspond la $LIN \pm la LSN$)

Interprétation des EFR : règles de base

		Théo.	LIN	Basal	% Théo.	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Z-Score	Post	Post%Th	% Var.
Capacité vitale Pleth.	[L]	2.76	2.07	2.41	87				-0.83							
Vol. Résiduel Pleth.	[L]	1.79	1.21	3.83	214				5.83							
Cap. Pulm. Totale Pleth.	[L]	4.70	3.72	6.24	133				2.57							
CRF pléthymo.	[L]	2.62	1.80	5.01	191				4.78							
VR % CPT pleth.	[%]	38.34	28.75	61.36	160				3.95							
Conductances spécifiques [1/(KPA*5)]		1.04	1.04	0.35	34											
CV Forcée Expi	[L]	2.67	1.96	2.18	82				-1.15				2.39	89	10	
VEMS	[L]	2.26	1.63	1.12	50				-2.99				1.15	51	3	
VEMS % CV MAX	[%]	78.3	67.6	46.4	59				-4.90				47.9	61	3	
DEMM 25/75	[L/s]	2.97	1.57	0.48	16				-2.93				0.51	17	6	

Valeur prédite ou théorique moyenne pour chaque variable (en fonction de l'âge, de la taille et du sexe)

Valeur du patient mesurée après l'inhalation de bronchodilatateurs (courbe « post »)

Valeur mesurée post-β2 / valeur théorique moyenne x 100
Ici par exemple pour le VEMS : $1.15 / 2.26 \times 100 = 51\%$ de la théorique

Pourcentage de variation : $(\text{valeur post-}\beta 2 - \text{valeur basale}) / \text{valeur basale} \times 100$
Ici par exemple pour le VEMS : $(1.15 - 1.12) / 1.12 \times 100 = +3\%$

Interprétation des résultats

Volumes

Volumes pulmonaires

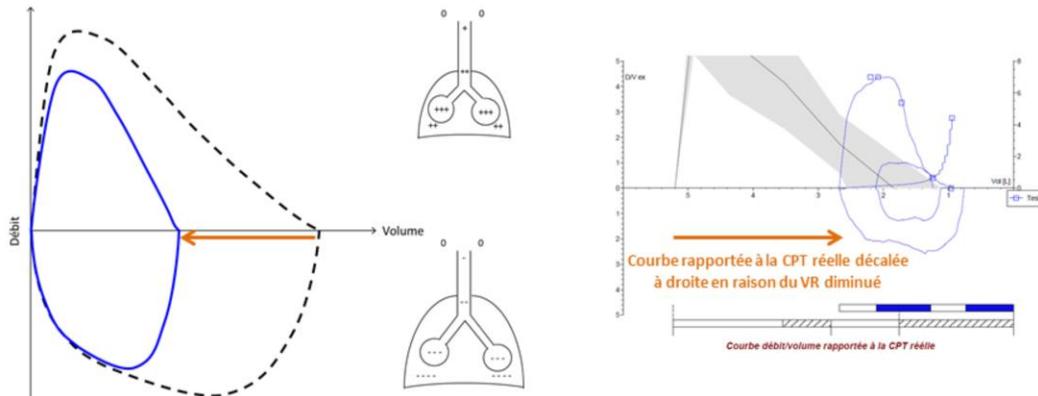
- **Capacité pulmonaire totale (CPT)**
 - Permet d'identifier un trouble ventilatoire restrictif (TVR)
 - Et d'en quantifier la sévérité
- Répartition des volumes
 - Une augmentation des volumes non mobilisables aux dépens des volumes mobilisables est évocatrice d'un trouble ventilatoire obstructif (TVO) \pm distension

Interprétation des résultats

Trouble ventilatoire restrictif (TVR)

Trouble ventilatoire restrictif (TVR)

Une courbe en cloche témoigne de la diminution des volumes mobilisables (CV), le TVR sera affirmé par la pléthysmographie sur la CPT



Critères diagnostiques de TVR

	Théo.	LIN	Basal	% Théo.	-3	-2	-1	Z-Score ₁	2	3	Z-Score	Post	Post%Th	% Var.
Capacité vitale Pleth.	[L]	3.93	3.01	2.73	69						-2.14			
Vol. Residuel Pleth.	[L]	2.77	2.10	2.04	74						-1.78			
Cap. Pulm. Totale Pleth.	[L]	6.98	5.83	4.77	68						-3.16			
CRF pléthysmo.	[L]	3.72	2.73	2.82	76						-1.50			
VR % CPT pleth.	[%]	43.99	35.01	42.78	97						-0.22			
Conductances spécifiques [1/(KPA*5)]		0.85	0.85	1.44	169									

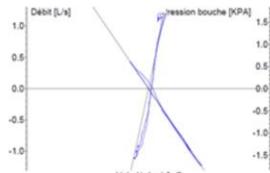
CPT < limite inférieure de la normale (LIN) ①

→ *Z-score* < -1,64 ②

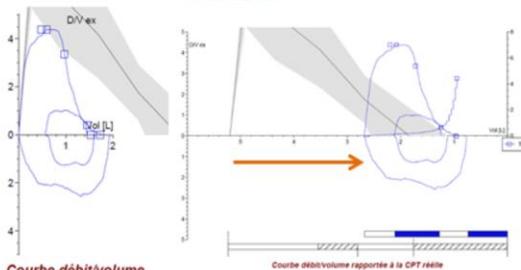
c'est-à-dire CPT < 80 % de la théorique moyenne environ ③

Attention à l'éthnie du patient (africain, asiatique) par rapport aux normes (calculées à partir d'échantillon d'individus sains de type « caucasiens »).

Exemple d'un TVR



Courbes de résistances et occlusion CRF



Courbe débit/volume

Courbe débit/volume rapportée à la CPT réelle

	Théo.	LIN	Basal	% Théo.	-3	-2	-Z-Score	1	2	3	Z-Score
Date test			09.11.10								
Heure test			14:15								
CV [L]	3.47	2.78	1.94	56							-3.64
VR [L]	1.76	1.19	0.73	42							-2.94
CPT [L]	5.30	4.31	2.67	50							-4.37
VR%CPT [%]	34.26	24.67	27.36	80							-1.18
CRFpl [L]	2.81	1.99	1.27	45							-3.07
SG [1/(KPA*s)]	1.04	1.04	1.62	156							
CVF [L]	3.38	2.68	1.73	51							-3.85
VEMS [L]	2.91	2.29	1.53	53							-3.62
Tiffeneau [%]	80.5	69.8	79.0	98							-0.24
DEMM [L/s]	3.49	2.09	1.59	46							-2.23
DPE [L/s]	6.78	5.30	4.37	64							-2.67
DEM 75 [L/s]	5.88	3.66	4.37	74							-1.12
DEM 50 [L/s]	4.15	2.34	3.36	81							-0.72
DEM 25 [L/s]	1.75	0.61	0.40	23							-1.96

→ VEMS ≠ TVO

Le TVR entraîne également une diminution du VEMS car des plus petits poumons génèrent des plus petits débits : c'est la raison pour laquelle la diminution du VEMS n'est pas un critère diagnostique du TVO → la diminution du VEMS n'est pas discriminante entre TVO et TVR.

La CV non plus n'est pas discriminante (diminuée en cas de TVR et en cas de TVO). En revanche, la CPT diminue forcément en cas de TVR, alors qu'elle restera normale voire aura plutôt tendance à augmenter en cas de TVO.

TVR homogène et inhomogène

TABLE 7 Classification of ventilatory impairments defined by lung volumes

	TLC	FRC	RV	FRC/TLC	RV/TLC	Comments
Large lungs	↑	↑	↑	Normal	Normal	Normal variant above ULN
Obstruction	Normal/↑	Normal/↑	↑	Normal/↑	↑	Hyperinflation if FRC/TLC and RV/TLC elevated; gas trapping if only RV/TLC elevated (e.g. COPD)
Simple restriction	↓	↓	↓	Normal	Normal	e.g.ILD
Complex restriction [156]	↓	↓	Normal/↑	Normal	↑	When FEV ₁ /FVC is normal, complex refers to the process contributing to a restrictive process that disproportionately reduces FVC relative to TLC (e.g. small airway disease with gas trapping and obesity)
Mixed disorder	↓	Normal/↓	Normal/↑	Normal/↑	Normal/↑	Typically, FEV ₁ /FVC is reduced (e.g. combined ILD and COPD)
Muscle weakness	↓	Normal/↓	↑	↑	↑	When effort appears sufficient; TLC is reduced especially with diaphragm weakness; RV is increased especially with expiratory muscle weakness
Suboptimal effort	↓	Normal	↑	↑	↑	Especially when effort appears insufficient
Obesity	Normal/↓	↓	Normal/↑	Normal/↓	Normal/↑	ERV low; reduced TLC at very high BMI (>40 kg·m ⁻²) [37]

TLC: total lung capacity; FRC: functional residual capacity; RV: residual volume; ULN: upper limit of normal; COPD: chronic obstructive pulmonary disease; ILD: interstitial lung disease; ERV: expiratory reserve volume; BMI: body mass index.

Stanojevic et al., Eur Resp J (60) 2022

Sévérité d'un TVR

Sévérité proportionnelle à la diminution des **volumes**
(CPT... voire CV et/ou VEMS)

Cut-offs moins consensuels que pour le TVO :

Léger	70 % ≤ CPT < LIN	70 % ≤ CPT < LIN	-2,5 ≤ Z-score < -1,64
Moyen/modéré	60 % ≤ CPT < 70 %	60 % ≤ CPT < 70 %	-4,0 ≤ Z-score < -2,5
Important/franc		50 % ≤ CPT < 60 %	
Sévère	50 % ≤ CPT < 60 %	35 % ≤ CPT < 50 %	Z-score < -4,0
Très sévère	CPT < 50 %	CPT < 35 %	

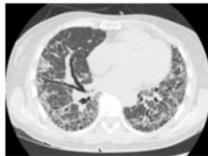
(A l'avenir, stadification de la sévérité sur le Z-score plutôt que sur le % de la théorique ?)

ATS Statement, *Am Rev Respir Dis* (144) 1991
Pellegrino et al., *Eur Resp J* (26) 2005
[traduction FR : *Rev Mal Respir* (24) 2007]

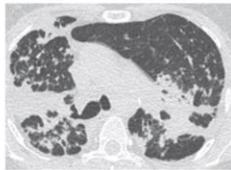
Stanojevic et al., *Eur Resp J* (60) 2022

Causes de TVR

- Diminution de la **compliance du parenchyme pulmonaire** :
 - pneumopathies interstitielles diffuses (PID)
 - séquelle « fibreuse » (infection, radiothérapie...)



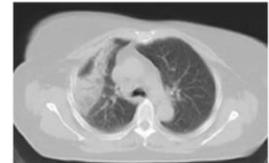
Fibrose pulmonaire idiopathique (FPI)



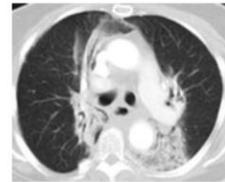
Sarcoidose



Séquelle infectieuse



Pneumopathie radique



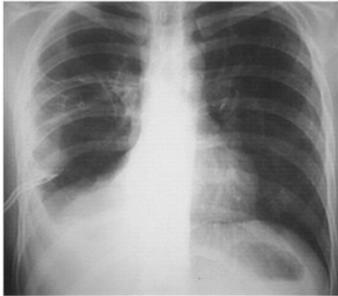
Pneumopathie radique

En cas de sarcoidose stade II ou III, un TVR est possible (atteinte parenchymateuse) mais souvent modéré.

Le TVR peut en revanche être sévère chez les sarcoidoses de stade IV.

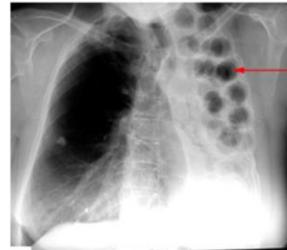
Causes de TVR

- Diminution de la **compliance du parenchyme pulmonaire** :
 - pneumopathies interstitielles diffuses (PID)
 - séquelle « fibreuse » (infection, radiothérapie...)
- **Chirurgie d'exérèse** (lobectomie, pneumonectomie)



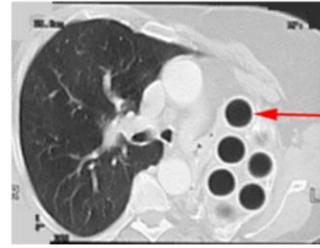
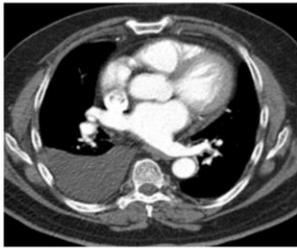
Causes de TVR

- Diminution de la **compliance du parenchyme pulmonaire** :
 - pneumopathies interstitielles diffuses (PID)
 - séquelle « fibreuse » (infection, radiothérapie...)
- **Chirurgie d'exérèse** (lobectomie, pneumonectomie)
- Diminution de la **compliance de la paroi thoracique** :
 - épanchement ou épaissement pleural, collapsothérapie



Causes de TVR

- Diminution de la **compliance du parenchyme pulmonaire** :
 - pneumopathies interstitielles diffuses (PID)
 - séquelle « fibreuse » (infection, radiothérapie...)
- **Chirurgie d'exérèse** (lobectomie, pneumonectomie)
- Diminution de la **compliance de la paroi thoracique** :
 - épanchement ou épaissement pleural, collapsothérapie



Causes de TVR

- Diminution de la **compliance du parenchyme pulmonaire** :
 - pneumopathies interstitielles diffuses (PID)
 - séquelle « fibreuse » (infection, radiothérapie...)
- **Chirurgie d'exérèse** (lobectomie, pneumonectomie)
- Diminution de la **compliance de la paroi thoracique** :
 - épanchement ou épaissement pleural, collapsothérapie
 - cyphoscoliose, spondylarthrite ankylosante, ostéosynthèse vertébrale, thoracoplastie, pectus excavatum
 - obésité morbide

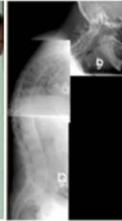
En cas de TVR d'origine parenchymateuse (diminution de la compliance pulmonaire par augmentation de la pression de rétraction élastique ou exérèse chirurgicale), la diminution des différents volumes est souvent relativement homogène.

En cas de dysfonction neuro-musculaire, (la CPT est diminuée par définition mais) la CRF peut être conservée car la pression de rétraction élastique pulmonaire et la force d'expansion de la cage thoracique sont peu modifiées. Il peut alors exister une modification de la répartition des volumes avec un TVR prédominant sur les volumes mobilisables (CV très diminuée < CPT) et un VR préservé.

Attention, la répartition des volumes peut être inhomogène et avec un déficit prédominant sur la CV et un VR préservé en cas de trouble ventilatoire mixte associant un TVR avec un TVO (mais dans ce cas le rapport de Tiffeneau est également diminué).



Cyphoscoliose



Spondylarthrite ankylosante (SPA)



Ostéosynthèse vertébrale



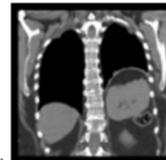
Thoracoplastie



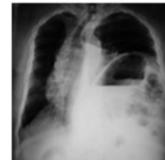
Pectus excavatum

Causes de TVR

- Diminution de la **compliance du parenchyme pulmonaire** :
 - pneumopathies interstitielles diffuses (PID)
 - séquelle « fibreuse » (infection, radiothérapie...)
- **Chirurgie d'exérèse** (lobectomie, pneumonectomie)
- Diminution de la **compliance de la paroi thoracique** :
 - épanchement ou épaissement pleural, collapsothérapie
 - cyphoscoliose, spondylarthrite ankylosante, ostéosynthèse vertébrale, thoracoplastie, pectus excavatum
 - obésité morbide
- **Dysfonction neuro-musculaire** :
 - paralysie ou hernie diaphragmatique
 - séquelle de poliomyélite
 - maladies neuro-musculaires touchant les muscles respiratoires (sclérose latérale amyotrophique, myasthénie, myopathie, myosite...)



Paralysie diaphragmatique



Hernie diaphragmatique

En cas de TVR d'origine parenchymateuse (diminution de la compliance pulmonaire par augmentation de la pression de rétraction élastique ou exérèse chirurgicale), la diminution des différents volumes est souvent relativement homogène.

En cas de dysfonction neuro-musculaire, (la CPT est diminuée par définition mais) la CRF peut être conservée car la pression de rétraction élastique pulmonaire et la force d'expansion de la cage thoracique sont peu modifiées. Il peut alors exister une modification de la répartition des volumes avec un TVR prédominant sur les volumes mobilisables (CV très diminuée < CPT) et un VR préservé.

Attention, la répartition des volumes peut être inhomogène et avec un déficit prédominant sur la CV et un VR préservé en cas de trouble ventilatoire mixte associant un TVR avec un TVO.

Interprétation des résultats

Distension

Critères proposés d'une distension

Médication		Théo.	Basal	% Théo.	-3	-2	-Z-Score	2	3
Capacité vitale Pleth.	[L]	3.11	2.19	70					
Vol. Residuel Pleth.	[L]	2.00	3.61	180					
Cap. Pulm. Totale Pleth.	[L]	5.30	5.80	109					
VR % CPT pleth.	[%]	39.36	62.22	158					
CRF pléthysmo.	[L]	2.82	4.28	152					
Vol. Reserve Expi.	[L]	0.82	0.67	82					
CRF% CPT Pleth.	[%]	54.70	73.83	135					

Majoration du **VR** > limite supérieure de la normale (LSN)

→ *Z-score* > 1,64 (c'est-à-dire VR > 130-135 % environ)

ET majoration du **rapport VR/CPT** > LSN

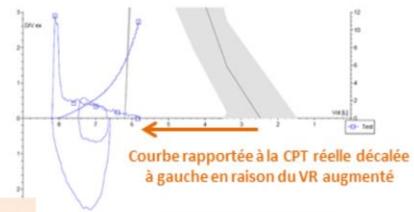
→ *Z-score* > 1,64 (c'est-à-dire VR/CPT > 120-125 % environ)

(= la majoration du VR se fait aux dépens de la CV)

Les autres volumes non mobilisables CPT et CRF peuvent être normaux au début (mais pas diminués), puis augmentés si la distension est sévère

On peut parler de distension même si la CPT est dans les limites de la normale.

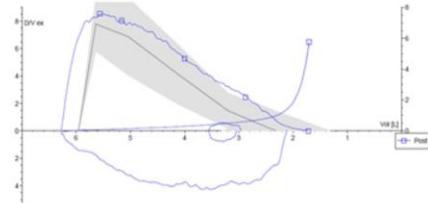
Distension VS grands volumes



CV ≠ TVR

	Théo.	LIN	Basal	N. Théo.	-2	-1	0	1	2	Z-Score
Date test			19.05.08							
Heure test			09:34							
CV	[L]	3.89	2.97	2.38	61					-2.69
VR	[L]	2.31	1.64	5.81	251					8.52
CPT	[L]	6.34	5.19	8.19	129					2.64
VR/CPT	[%]	37.75	32.77	70.92	188					4.08
CRPyl	[L]	3.39	2.40	6.56	194					5.28
SG	[L/(KPA*5)]	0.85	0.85	0.25	29					
CVP	[L]	3.75	2.75	2.36	63					-2.28
VEMS	[L]	2.96	2.13	0.70	24					-4.44
Tiffeneau	[%]	76.2	64.4	29.4	39					-5.53
DEMm	[L/N]	3.34	1.63	0.29	9					-2.93
DPE	[L/N]	7.84	5.85	2.80	37					-4.09
DEM 75	[L/N]	6.93	4.12	0.43	6					-3.80
DEM 50	[L/N]	4.13	1.95	0.34	8					-2.87
DEM 25	[L/N]	1.46	0.18	0.17	11					-1.66

↳ TVO (très sévère) avec distension pulmonaire



	Théo.	LIN	Basal	N. Théo.	-2	-1	0	1	2	Z-Score
Date test			19.12.17							
Heure test			15:15							
Médication			Blocant							
CV	[L]	3.79	2.87	4.57	121					1.40
VR	[L]	2.21	1.53	1.73	78					-1.18
CPT	[L]	6.10	4.95	6.30	103					0.28
VR/CPT	[%]	36.38	27.60	27.39	75					-1.68
CRPyl	[L]	3.29	2.31	2.98	90					-0.52
SG	[L/(KPA*5)]	0.85	0.85	3.16	372					
CVP	[L]	3.66	2.65	4.57	125					1.50
VEMS	[L]	2.92	2.08	3.97	136					2.05
Tiffeneau	[%]	76.8	65.0	86.8	113					1.46
DEMm	[L/N]	3.41	1.70	4.70	138					1.24
DPE	[L/N]	7.79	5.80	8.55	110					0.63
DEM 75	[L/N]	6.86	4.04	8.03	117					0.69
DEM 50	[L/N]	4.11	1.93	5.27	128					0.88
DEM 25	[L/N]	1.46	0.18	1.45	168					1.27

↳ Grands volumes pulmonaires physiologiques

La distension pulmonaire est une conséquence d'un TVO : on retrouve donc un TVO avec Tiffeneau diminué et souvent d'autres arguments complémentaires (conductances diminuées voire très diminuée, écart CVF << CVL...)

Un sujet avec des grands volumes physiologiques peut avoir une CPT > à sa LSN, mais le rapport VR/CPT reste normal et la CV est elle aussi augmentée.

Interprétation des résultats

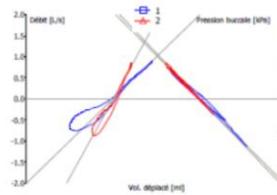
Résistances et conductances

Courbes de résistances

Conductances normales > 100 % théorique

(si les conductances sont diminuées, cela signifie que les résistances sont augmentées)

Parfois, ouverture de la courbe en raquette



Réversibilité : jugée sur le VEMS \pm la CVF
mais l'augmentation des conductances d'un facteur 2 est un critère secondaire

Interprétation des résultats

Trouble ventilatoire mixte

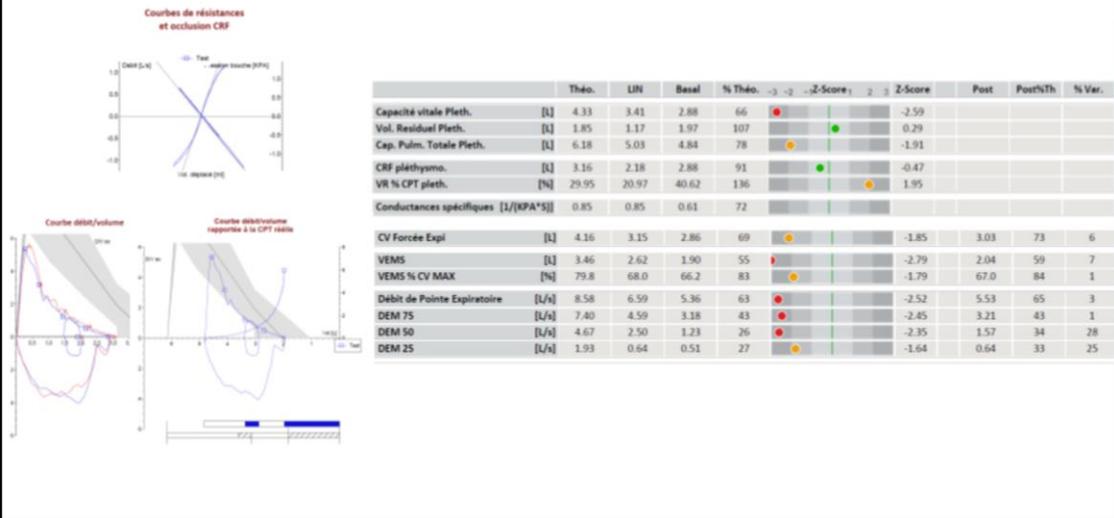
Trouble ventilatoire mixte

TVO + TVR associés à des degrés divers

CPT < LIN et Tiffeneau < LIN
→ *Z-score* < -1,64 pour les 2 variables

Sévérité proportionnelle à la diminution du **VEMS**
(somme des deux déficits)

Exemple d'un trouble mixte



La simple présence d'une courbe débit/volume concave est évocatrice d'un TVO mais ne préjuge pas de la valeur des volumes non mobilisables (VR, CRF, CPT) : en cas de spirométrie anormale il faut réaliser une pléthysmographie (ou une dilution à l'hélium) afin de savoir s'ils sont normaux (TVO simple), augmentés (TVO + distension), ou diminués (trouble ventilatoire mixte).

