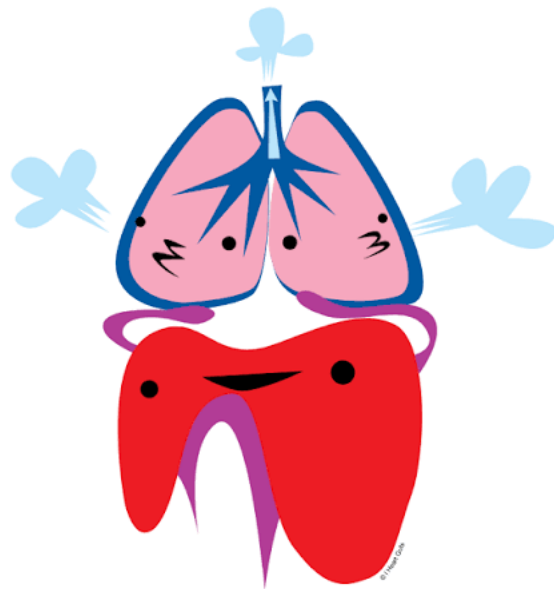

Le diaphragme

Muscle clé, muscle oublié ?

Fabien Latiers

Kinésithérapeute

AKCR - 12 octobre 2026







Daniel, 64 ans

1 En consultation

- *“Je suis toujours essoufflé quand je monte la pente de ma rue”*
- S'arrête au premier étage
- A abandonné le vélo d'appartement à la maison
- Se présente en readaptation après 2 mois postopératoire

2 En creusant

- Essoufflé quand il se penche pour lacer ses chaussures
- Gêné allongé à plat
- Souffle coupé quand l'eau monte à la poitrine, à la piscine

3 Dans le dossier

- Triple pontage coronaire
- Pneumonie postopératoire : quelques jours aux soins intensifs
- Radio de sortie : coupole gauche surélevée, « atélectasies »
- Échographie cardiaque : fraction d'éjection 55 %, pontages perméables

Le cœur va bien. Alors pourquoi Daniel ne progresse-t-il pas ?

Six étapes, de la structure au traitement

01

Anatomie et physiologie

02

Physiopathologie

03

Évaluation

04

Pathologies aiguës

05

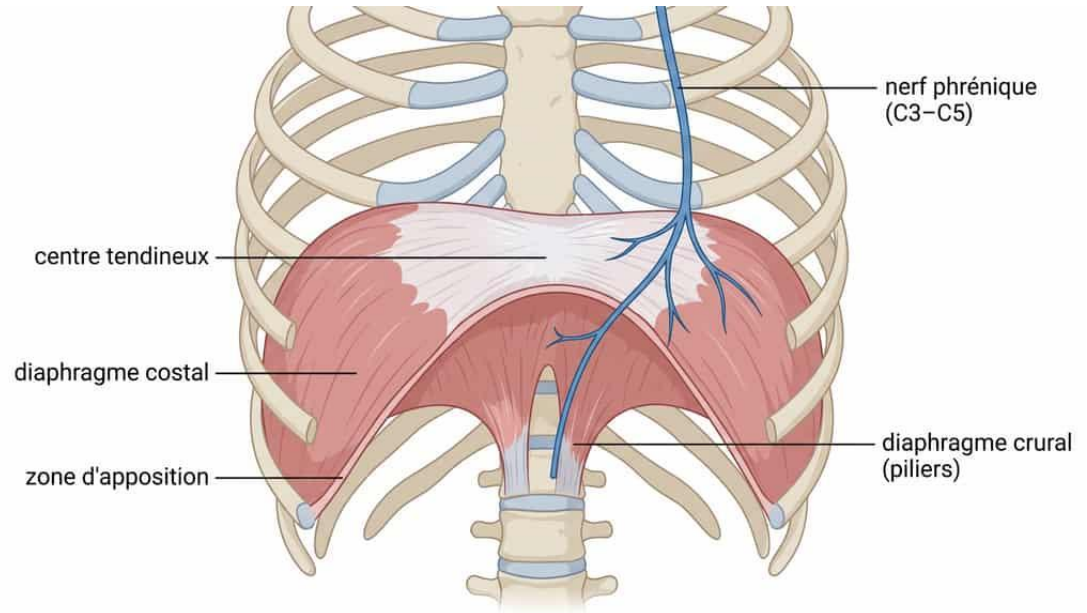
Pathologies chroniques

06

Traitement

Rappel anatomique

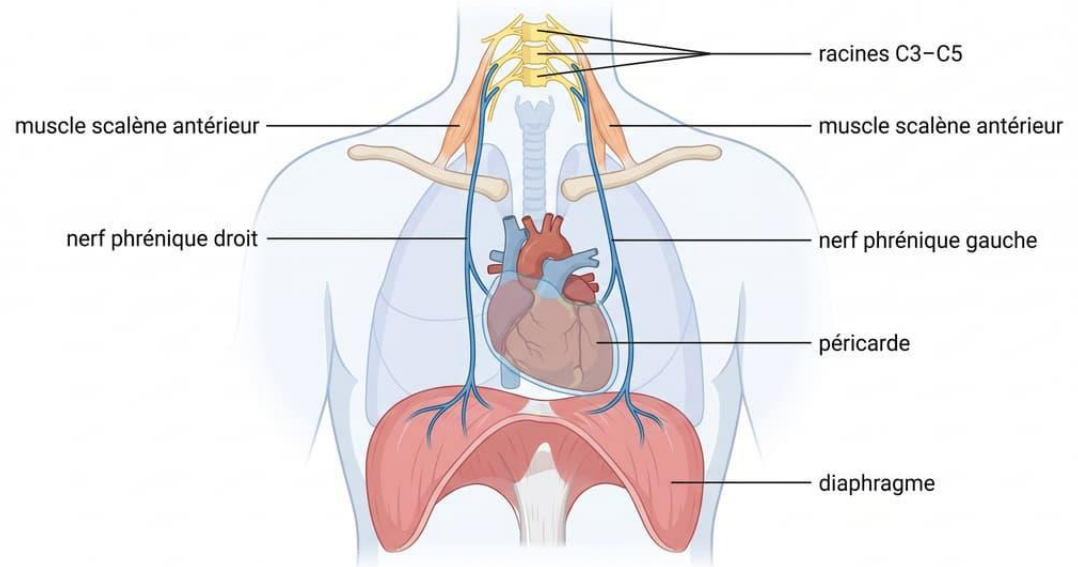
- Centre tendineux, fibres musculaires en périphérie
- Insertions sternale, costales (6 dernières côtes) et lombaires (piliers)
- Orifices : aorte, œsophage, veine cave inférieure
- Diaphragme costal
- Diaphragme crural



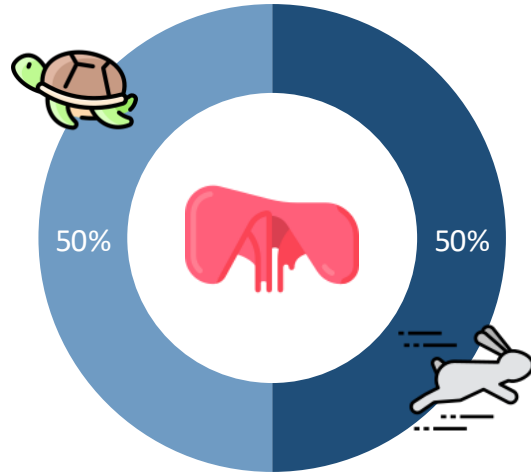
Le nerf phrénique (C3–C5) : un long trajet, donc vulnérable

●	Cou	Racines C3–C5 · bloc interscalénique
●	Médiastin	Chirurgie thoracique
●	Péricarde	Chirurgie cardiaque
●	Diaphragme	Innervation motrice

**1re cause de paralysie diaphragmatique
lésion phrénique chirurgicale.**



Un muscle d'endurance, plastique selon les contraintes

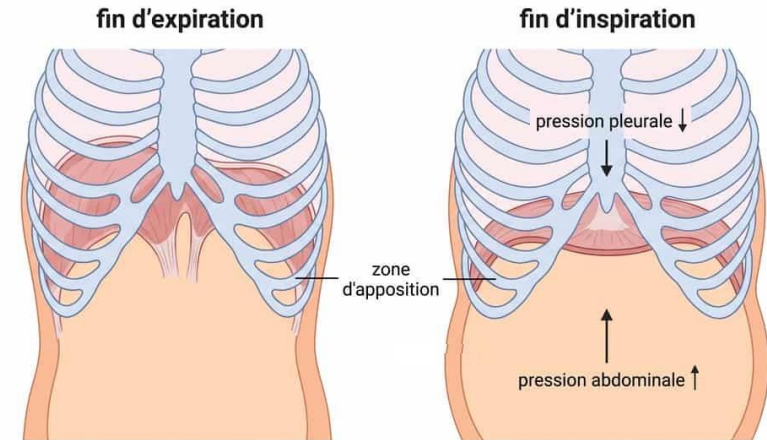


■ Lentes (type I) ■ Rapides (type II)

- Fibres lentes et rapides en proportions égales chez l'adulte
- Petites fibres, très capillarisées, métabolisme très oxydatif : résistance à la fatigue
- Phénotype modifiable : entraînement, hypoxie, âge, maladie, corticoïdes

Mécanique respiratoire : le dôme descend, le ventre sort

- ↓ **Pression pleurale** diminue : l'air rentre
- ↑ **Pression abdominale** augmente : le contenu abdominal est incompressible
- **Paroi abdominale** poussée vers l'avant



Le diaphragme ne travaille jamais seul

Parasternaux et scalènes

Expandent le thorax supérieur et limitent le raccourcissement du diaphragme

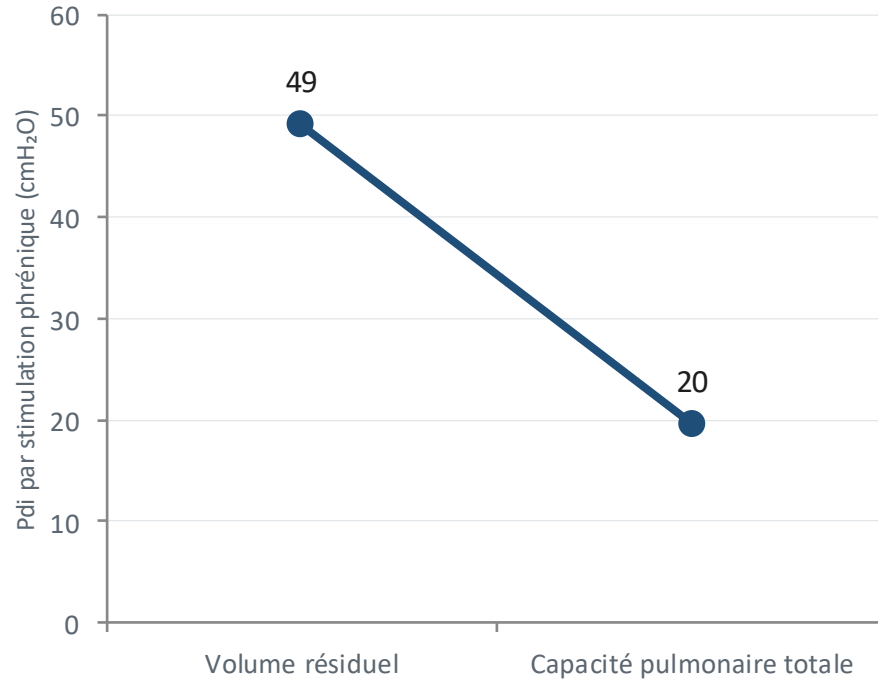
Abdominaux

À l'expiration active, repoussent le diaphragme vers le haut et le replacent à une longueur favorable

Soutien abdominal

Augmente l'expansion du thorax inférieur produite par le diaphragme

À haut volume, le diaphragme part raccourci et perd sa force



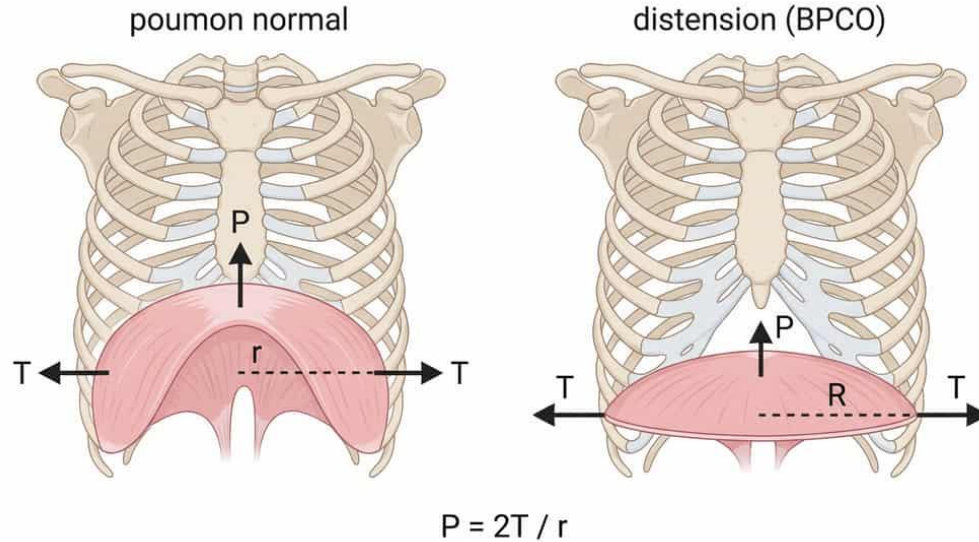
Chez le sujet sain, la force chute de 60% entre le VR et la CPT

-41 % de surface musculaire

du VR à la CPT : c'est le muscle squelettique qui raccourcit le plus

=> Relation tension – longueur des fibres musculaires

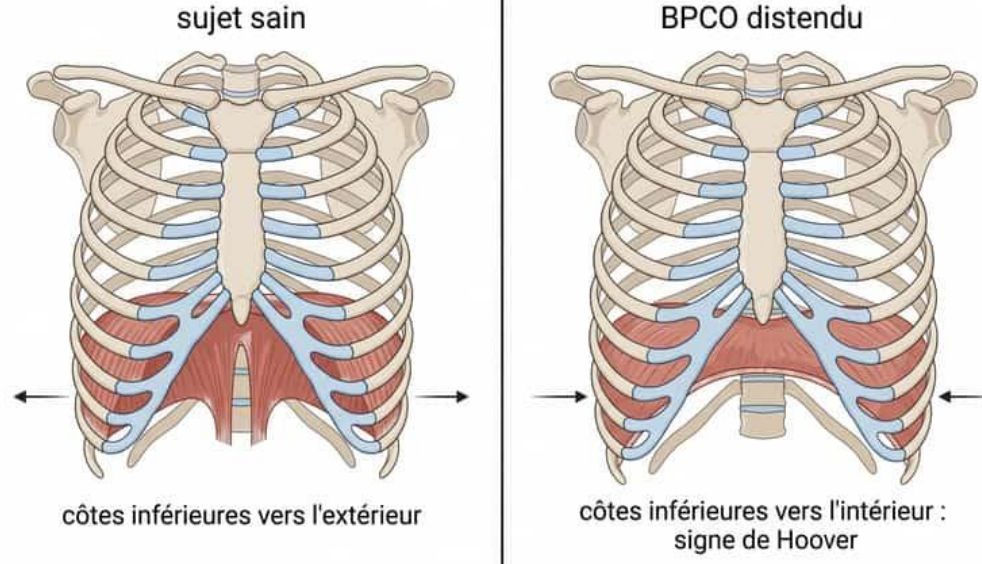
Un dôme aplati transforme moins bien sa tension en pression



Loi de Laplace
 $P = 2T / r$

À tension musculaire (T) égale, plus le rayon de courbure (R) augmente (dôme aplati), plus la pression (P) produite diminue.

Il perd aussi son action inspiratoire : le signe de Hoover



→ Les côtes inférieures rentrent à l'inspiration

Quatre déterminants de la performance du diaphragme

Longueur

dépend du volume
pulmonaire



Géométrie

zone d'apposition, forme
du dôme



Fibres

typologie, section,
capacité oxydative



Commande

nerf phrénique,
jonction, centres



Le diaphragme joue un rôle multimodal

1

Posture

Contraction anticipatoire ~20 ms avant le deltoïde lors d'un mouvement rapide du bras



2

Pression abdominale

Co-activation avec les abdominaux : pression intra-abdominale soutenue lors de mouvements répétés



3

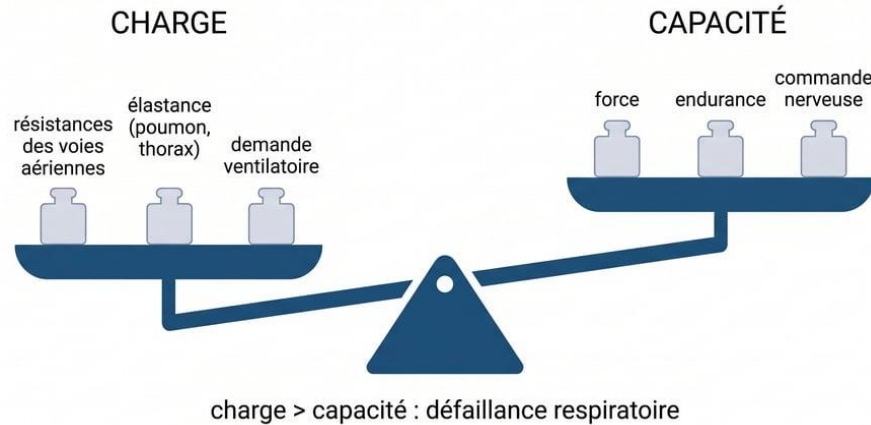
Anti-reflux

Le diaphragme crural agit comme un sphincter externe de la jonction œso-gastrique



Mais la respiration garde la priorité : quand la demande respiratoire augmente, l'activité posturale du diaphragme diminue.

La dysfonction du diaphragme



Charge ↑

Obstruction, distension, raideur pulmonaire, fièvre, sepsis : la demande augmente

Capacité ↓

Atrophie, désavantage mécanique, atteinte nerveuse : l'offre diminue

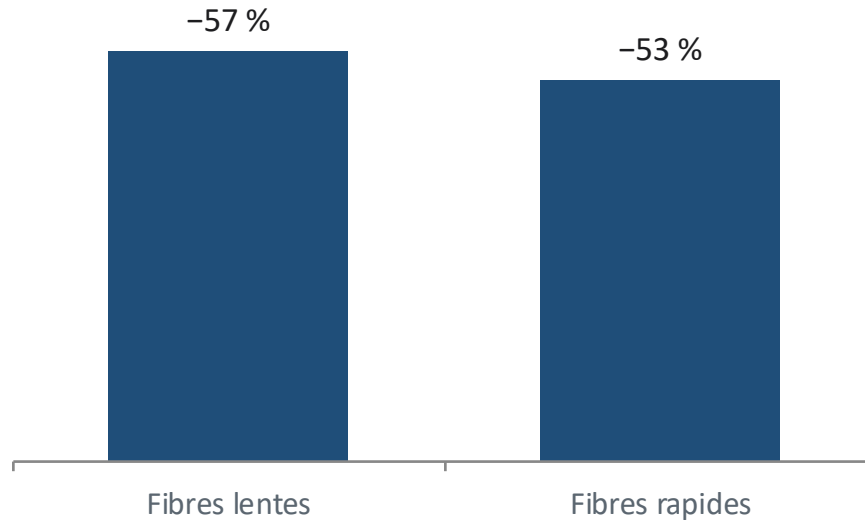
// muscles squelettiques : troubles hématome, dénutrition, âge, inactivité, médicaments, ventilation mécanique,...

Quatre mécanismes, qui touchent les quatre déterminants

Mécanisme	Déterminant touché	Exemple
Inutilisation et atrophie	Fibres	Ventilation mécanique prolongée
Facteurs systémiques	Fibres · Commande	Sepsis, corticoïdes, dénutrition, gaz du sang
Désavantage mécanique	Longueur · Géométrie	Distension (BPCO), déformation cage thoracique
Atteinte neuromusculaire	Commande	Lésion phrénique, SLA, tétraplégie

Inactif sous ventilation, il s'atrophie en quelques heures

Surface des fibres après 18 à 69 h de diaphragme inactif



-32 %

de force du diaphragme (stimulation phrénique)
après 6 jours de ventilation

Mécanisme : activation de la protéolyse dans les fibres inactives.

Conséquence : en réanimation, la faiblesse s'installe en jours, pas en semaines.

La maladie aiguë l'affaiblit aussi, avant même la ventilation

64 %

des patients ventilés ont déjà une dysfonction diaphragmatique dans les 24 h suivant l'intubation

Facteurs associés : sepsis et gravité de la maladie. Une force basse est associée à une mortalité plus élevée.

En réanimation, ce mécanisme s'ajoute à l'inutilisation.

Autres facteurs qui réduisent la performance

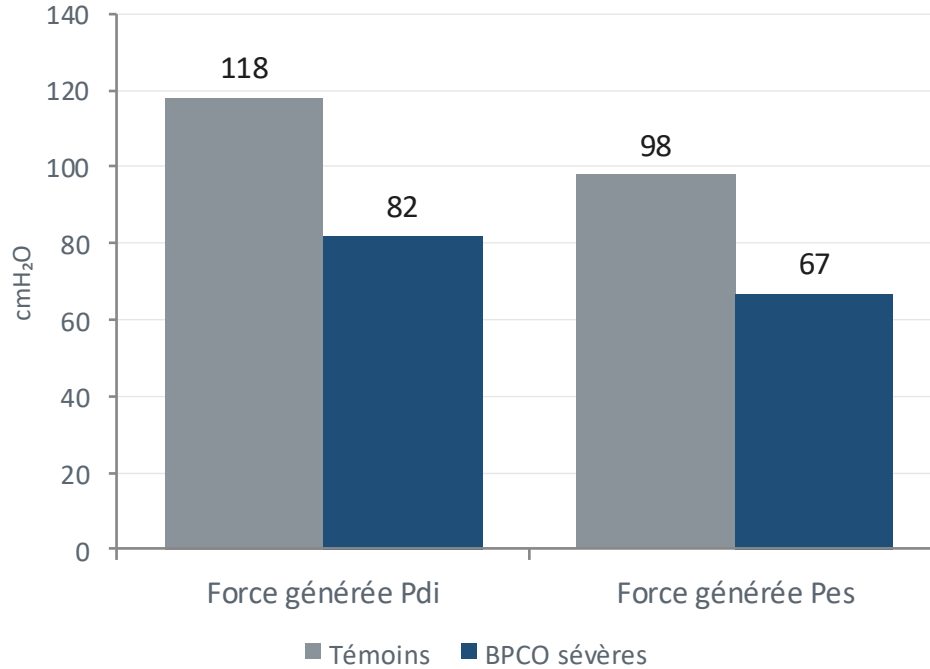
Sepsis, inflammation

Corticoïdes

Dénutrition

Hypoxémie, hypercapnie, acidose

Distendu, le diaphragme génère moins de dépression pleurale



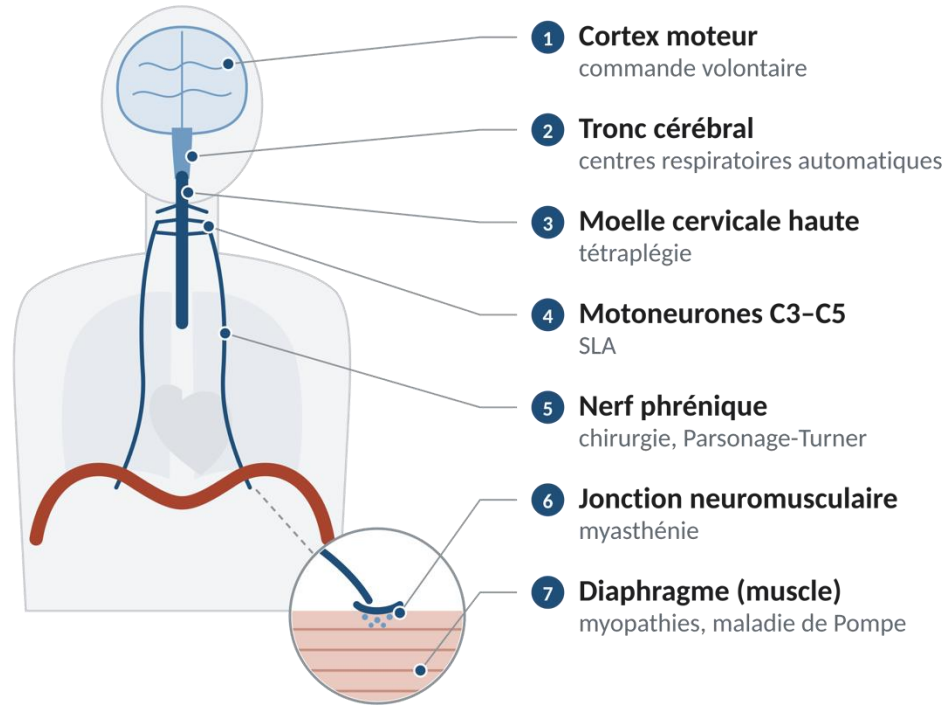
20 BPCO sévères vs 7 témoins.

La pression œsophagienne (ce qui fait entrer l'air) est la plus touchée.

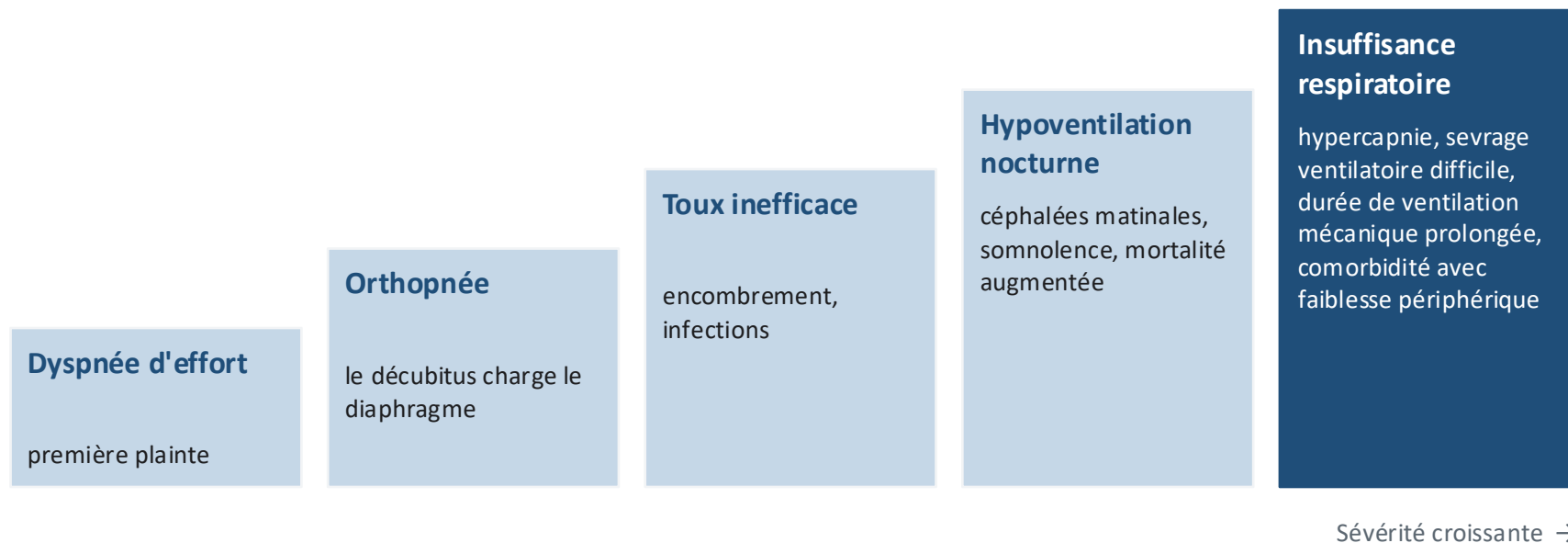
Une hyperinflation aiguë sur la pathologie chronique aggrave encore le déficit.

Mécanismes : fibres raccourcies, dôme aplati, signe de Hoover.

De la commande au muscle, chaque étage peut être touché



Quand la balance penche, les signes apparaissent par étapes



Chez le patient, les mécanismes s'additionnent

Ventilation prolongée

Inutilisation

Sepsis, inflammation

Effort inadapté (sous-/sur-assistance)

Paralysie phrénique

Atteinte du nerf

Ventilation, chirurgie

BPCO

Distension

Corticoïdes, dénutrition, gaz du sang

Exacerbations

Neuromusculaire

Atteinte neuromusculaire

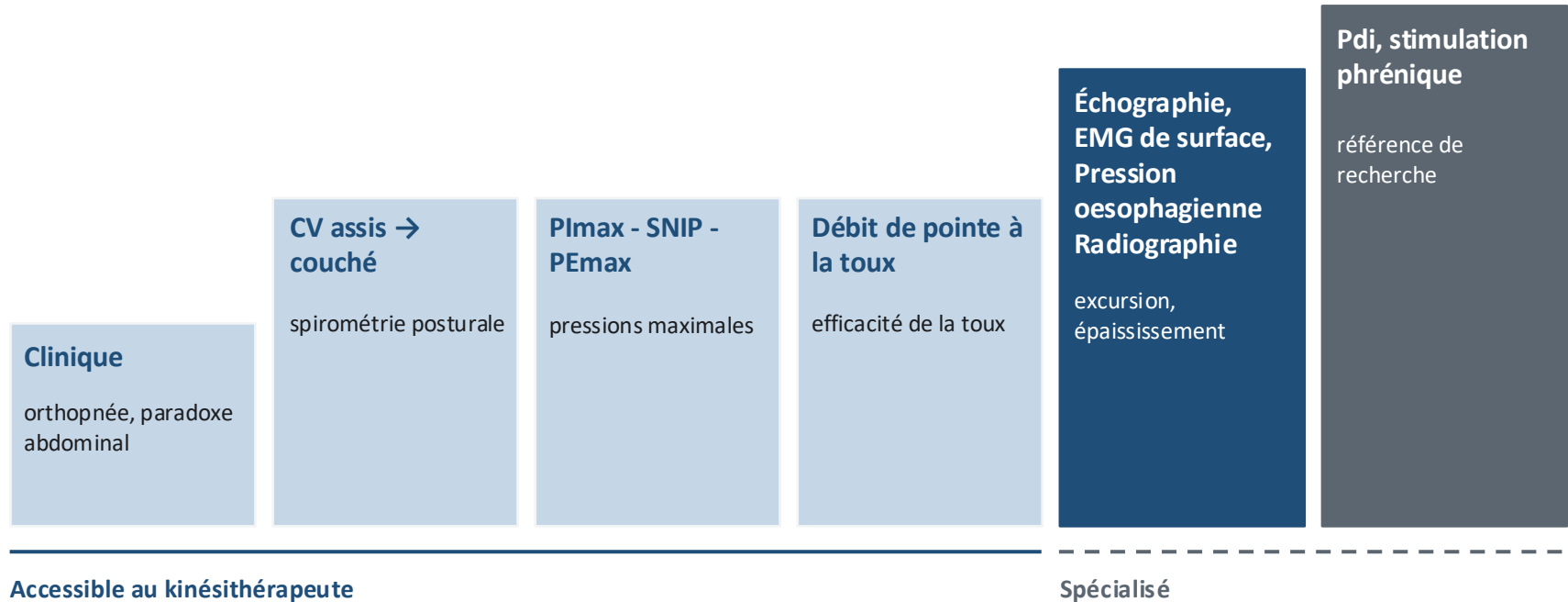
Hypercapnie, infections

 mécanisme principal

 mécanismes associés



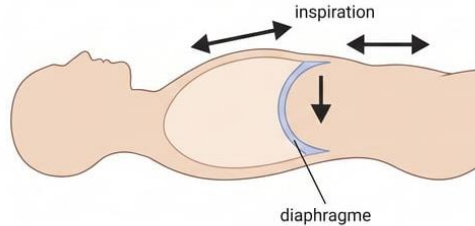
Du plus simple au plus spécialisé



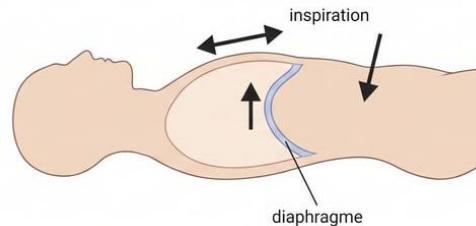
La clinique oriente, mais ne suffit pas



respiration normale



respiration paradoxale



Orthopnée

dyspnée dès le décubitus

Respiration paradoxale

le ventre rentre à l'inspiration, en décubitus

Muscles accessoires

scalènes, sterno-cléido-mastoïdiens

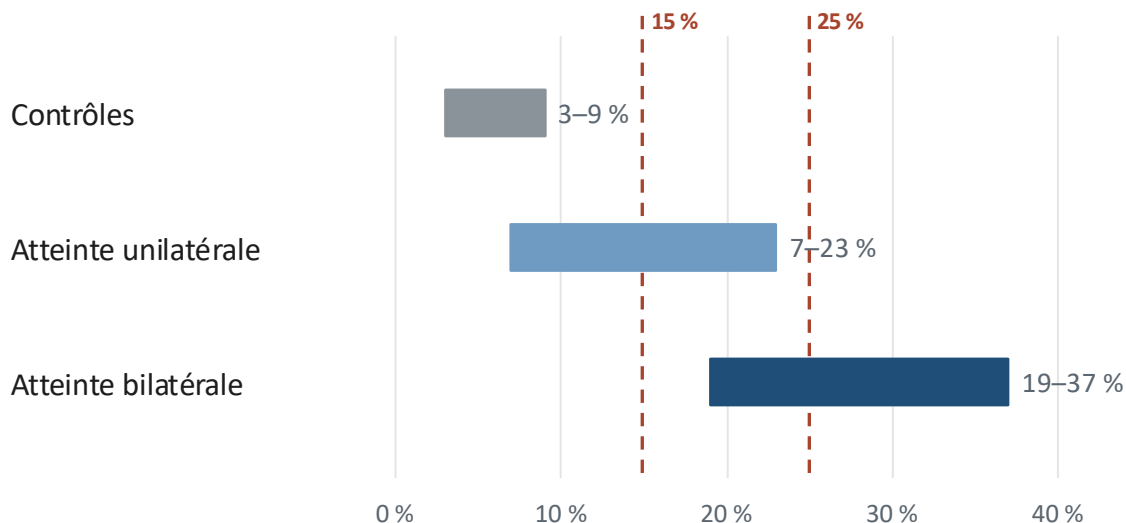
Signe de Hoover

si distension

Signes peu spécifiques => ils orientent vers les tests.

La CV assis puis couché : le test le plus simple

Chute de CV assis → couché (plages des moyennes, 10 études)



> 25 %

sensibilité 79 %, spécificité 90 % pour
une faiblesse diaphragmatique (2001)

Seuils proposés : 15 % pour screener,
20 % pour confirmer le diagnostic
(2025)

P_{Imax} et P_{Emax} : une technique standardisée, sinon rien

- 1 Position**
assis, pince-nez, embout bien tenu
- 2 Volume de départ**
P_{Imax} depuis le VR, P_{Emax} depuis la CPT
- 3 Effort**
maximal, encouragements **vigoureux**, maintenir pendant **>1,5s**
- 4 Répétitions**
plusieurs essais reproductibles, retenir le meilleur

Valeur élevée : exclut une faiblesse. Valeur basse : faiblesse... ou technique !



POWERbreathe série KH



Smart Adaptator
Powerbreathe

MicroRPM



PImax et PEmax : valeurs prédictives

Valeurs normatives :

- Equation prédictive de la PImax
- Valeurs normatives dans la population saine

TABLE 4. Prediction equations for maximal inspiratory pressure (PIMAX)

	Male	Female
Prediction equation	$PIMAX = (0.158 \text{ BMI}) - (0.051 \text{ age}) + 8.22$	$PIMAX = (-0.024 \text{ age}) + 8.55$

Sex/Age Groups, Years	n	LLN	
		PImax, cmH ₂ O	PEmax, cmH ₂ O
<i>Females</i>	314		
18–29	58	65.6	91.3
30–39	50	73.9	102
40–49	57	59.5	96.2
50–59	52	71.7	105
60–69	55	44.9	79.5
70–80	42	51.3	76.4
<i>Males</i>	296		
18–29	52	94.9	121
30–39	54	76.9	120
40–49	55	97.0	135
50–59	48	84.6	118
60–69	48	87.6	138
70–80	39	63.1	97.9

Le SNIP complète la P_{Imax}, et combiner les tests est plus fiable

SNIP

- Assis, Reniflement maximal, bouchon nasal, depuis la CRF, dans chaque narine
- Manœuvre naturelle, facile, utile en neuromusculaire

Combiner

- P_{Imax} + SNIP ($\pm$ autres tests)
- Une seule valeur basse peut être un faux positif
- L'association limite les faux diagnostics de faiblesse

Valeurs normatives SNIP (Uldry & Fitting 1995 ; Héritier 1994)

Population	SNIP moyen	LLN (5e perc.)	Seuil alerte
Hommes adultes	~130 cmH ₂ O	70 cmH ₂ O	< 70 → weakness inspi
Femmes adultes	~98 cmH ₂ O	55 cmH ₂ O	< 55 → weakness inspi
NMD (évolutive)	Variable	Suivi long.	Déclin > 10 cmH ₂ O / 6 mois

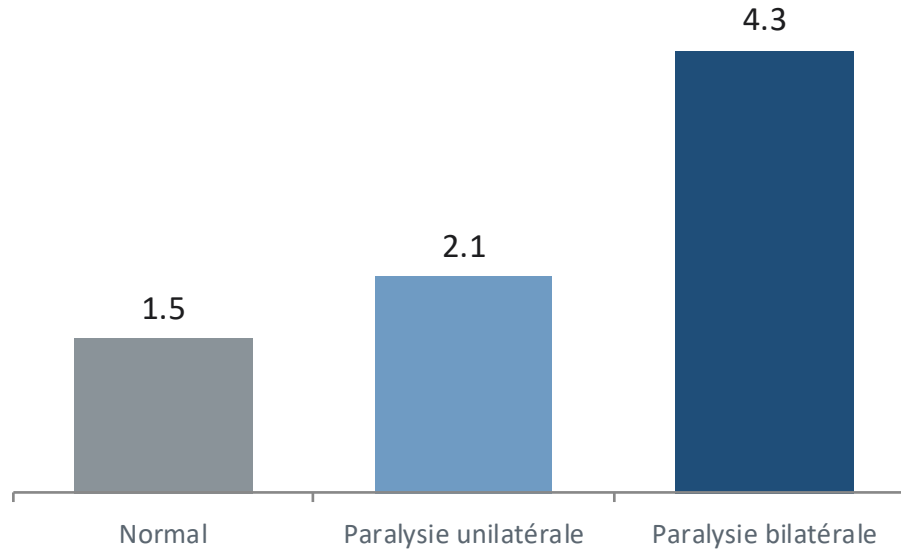
Valeurs cut-off de faiblesse des muscles respiratoires

TABLE 1 Cut-off values for diagnosing weakness for each respiratory muscle test, test characteristics, practical applications and costs

Test	Cut-off values for diagnosing weakness	Respiratory muscle group assessed	Level of invasiveness and difficulty	Practical applications	Cost
P_{Imax}	M: 80 cmH ₂ O F: 60 cmH ₂ O	Diaphragm and extradiaphragmatic inspiratory muscles	Not invasive Simple	Assessment of inspiratory muscle function before and after interventions aimed at unloading or improving respiratory muscle function Determination of the external load before starting inspiratory muscle training	Low
SNIP	M: 50 cmH ₂ O F: 45 cmH ₂ O	Diaphragm and extradiaphragmatic inspiratory muscles	Not invasive Simple	Assessment of inspiratory muscle function before and after interventions aimed at unloading or improving respiratory muscle function in patients unable to perform P_{Imax} manoeuvre reliably	Low
P_{Emax}	M: 110 cmH ₂ O F: 80 cmH ₂ O	Expiratory muscles	Not invasive Simple	Assessment of expiratory muscle function before and after interventions aimed at unloading or improving respiratory muscle function	Low

L'astuce du ratio PEmax / PImax

Ratio PEmax / PImax (médianes, 76 patients, diagnostic échographique)



Principe : dans une atteinte diaphragmatique isolée, la PImax baisse alors que la PEmax est préservée.

Utile quand le décubitus est mal toléré.

Le débit de pointe à la toux

≥ 160 L/min

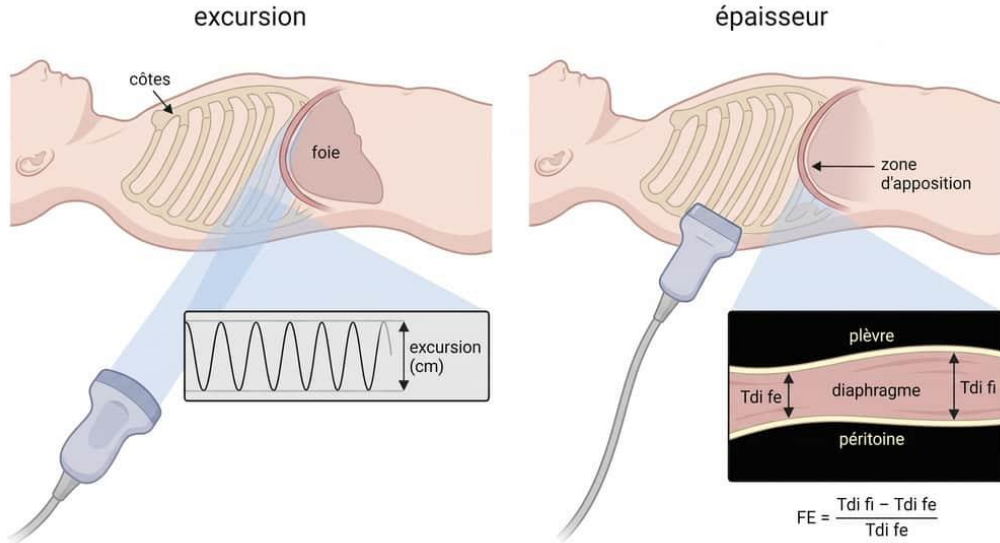
débit de pointe à la toux associé à une toux efficace chez les patients neuromusculaires

Mesure : débitmètre de pointe et masque facial ou embout ; inspiration maximale puis toux la plus forte possible.

Triangle de la toux : Pimax (inspiration) + Pemax (expiration) + PCF



Échographie : deux mesures complémentaires



Excursion

mode M, fenêtre hépatique ou splénique ;
respiration calme, profonde et sniff

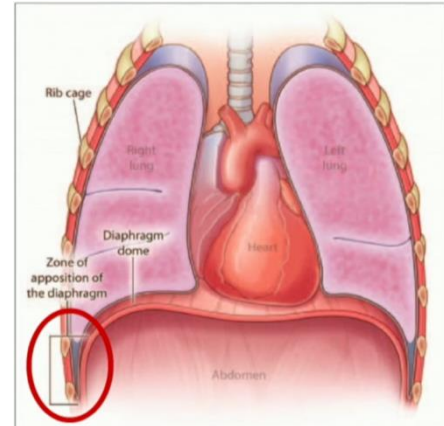
Épaississement

sonde linéaire, zone d'apposition ; fraction
d'épaississement entre fin d'expiration et
fin d'inspiration

Le diaphragme en échographie : l'excursion diaphragmatique



Le diaphragme en échographie : la fraction d'épaissement



Quand l'échographie devient-elle pathologique ?

	Normal	Pathologique
Excursion au calme	≈ 1,7 cm	< 1 cm : dysfonction
Excursion au sniff	vers le bas, symétrique	paradoxe (vers le haut) : paralysie
Fraction d'épaississement	≈ 50 % au calme	< 20 à 30 % selon les études : dysfonction

Limites : seuils variables d'une étude à l'autre ; technique opérateur-dépendante

La radiographie : l'examen typique mais insuffisant



Couple surélevée pour diagnostiquer une paralysie unilatérale (42 patients consécutifs)

90 % sensibilité

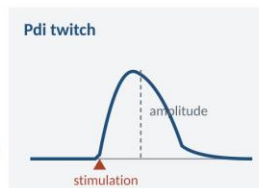
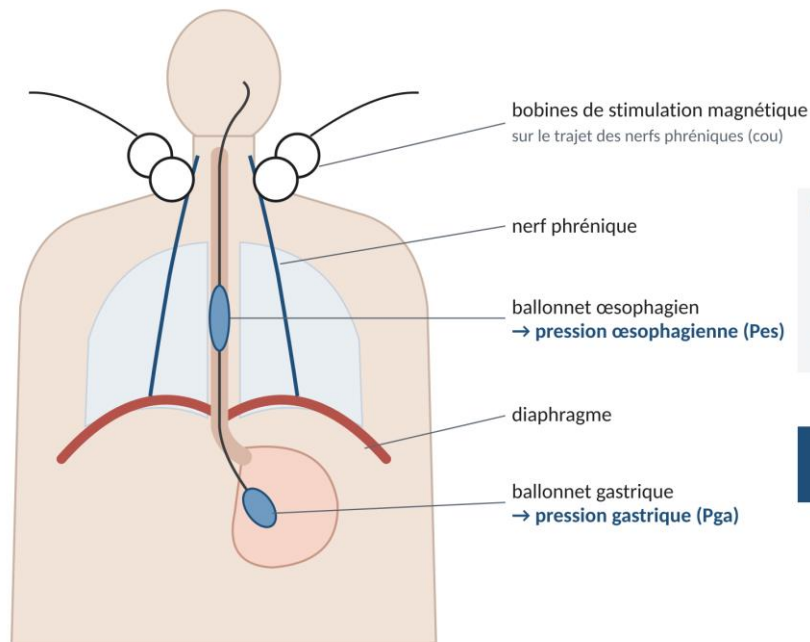
44 % spécificité

33 % valeur prédictive positive

93 % valeur prédictive négative

Couple haute : souvent pas de paralysie. Couple normale : paralysie unilatérale peu probable.

Pdi et stimulation phrénique



$$Pdi = Pga - Pes$$

Pourquoi la référence ?

La stimulation ne dépend pas de la coopération du patient : elle mesure la force du diaphragme lui-même.

Usage

Recherche, laboratoires d'explorations, réanimation. Pas un outil de cabinet, mais la référence de nombreuses études citées ici.

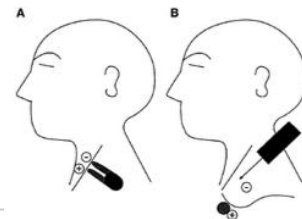


Figure 9. Technique for transcutaneous electric stimulation of the phrenic nerve. (A) Use of a bipolar electrode to locate and stimulate the phrenic nerve; (B) the monopolar technique. The phrenic nerve is

Schéma : mesure de la Pdi lors d'une stimulation magnétique des nerfs phréniques

Laveneziana et al. , Eur Respir J 2019- Demoule et al. , Am J Respir Crit Care Med 2013

Une démarche en quatre étapes

1

Suspecter

orthopnée, dyspnée
inexpliquée, respiration
paradoxe



2

Spirométrie posturale

CV assis puis couché



3

Pressions

PI_{max}, SNIP, PE_{max}, ratio
PE_{max}/PI_{max}



4

Toux

débit de pointe à la toux

Tests anormaux ou discordants avec la clinique : orienter vers le pneumologue (échographie, EMG, polygraphie).

Retour à Daniel, notre patient post-opératoire

	Daniel	Ce que cela suggère
Observation, couché	l'abdomen rentre à gauche à l'inspiration	mouvement paradoxal
CV assis → couché	3,1 → 2,6 L (-16 %)	dans la plage d'une atteinte unilatérale (7 à 23 %)
PI _{max} - SNIP	52 - 48 cmH ₂ O	faiblesse inspiratoire (≤ 80 cmH ₂ O chez l'homme)
PE _{max}	115 cmH ₂ O, ratio PE _{max} /PI _{max} 2,2	expiratoires préservés : profil diaphragmatique
DEP toux	390 L/min	toux efficace

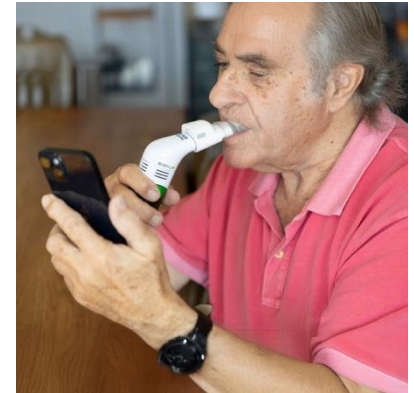
Adressé au pneumologue. Échographie : **hémicoupe gauche immobile, paradoxale au sniff.**
➔ **Paralysie phrénique gauche postopératoire.**



Comment traiter – matériel inspiratoire



- **Le Threshold IMT**
 - En force et en endurance
 - 7 à 41 cm H₂O
 - S'adapte au SI sur le tube d'intubation ou trachéotomie
 - Pas de valve expiratoire
- **Le Powerbreathe Medic**
 - En force et en endurance
 - 10 à 90 cm H₂O
 - Valve expiratoire (moins de condensation)
 - Existe des versions électroniques (évaluation + entraînement)
- **Le Spirotiger**
 - Renforcement en endurance
 - Patient restrictif
 - Valve capnique
 - Fréquence respiratoire donnée



Comment traiter – matériel expiratoire



Powerbreathe EX



Threshold PEP



Cough assist (MI-E)

Comment traiter ?

Dépend de la pathologie :

Pathologies aiguës

- Ventilation invasive prolongée
- Lésion nerf phrénique
- Post-chirurgie cardio-thoracique

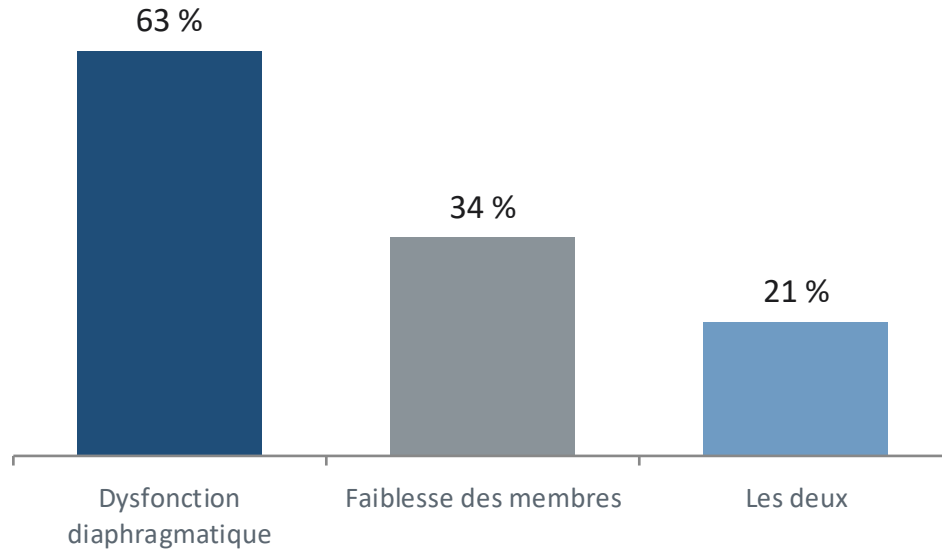


Pathologies chroniques :

- BPCO
- Neuromusculaires
- Insuffisance cardiaque
- Obésité
- Mucoviscidose
- ...

La ventilation mécanique

Patients au premier essai de ventilation spontanée



Deux formes de faiblesse qui se recouvrent peu.

La dysfonction diaphragmatique est liée à l'échec de sevrage ; la faiblesse des membres (score MRC) ne l'est pas.

Mécanismes : inutilisation, sepsis, effort inadapté



Trop peu ou trop d'effort : les deux abîment le diaphragme

Effort trop faible

sur-assistance, sédation

épaisseur ↓ : atrophie

Effort proche du repos

fraction d'épaississement 15–30 %

**durée de ventilation la plus
courte**

Effort excessif

sous-assistance

**épaisseur ↑ : lésion,
inflammation**

Effort inspiratoire du patient

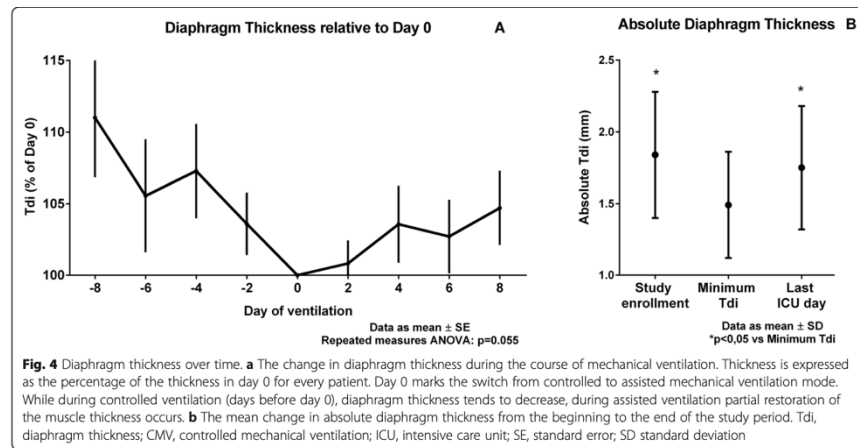
Épaisseur ↓ > 10 % chez 41 % des patients (médiane J4) ; chaque baisse de 10 % ralentit la libération du ventilateur (HR 0,69). **Une épaisseur qui augmente prolonge aussi la ventilation.**

Prévenir : ventiler en protégeant le diaphragme

- 1 Viser un effort proche du repos
ni sur-assistance, ni sous-assistance
- 2 Passer en mode assisté dès que possible
le diaphragme regagne une partie de son épaisseur
- 3 Surveiller l'effort
échographie, pressions d'occlusion, selon les équipes

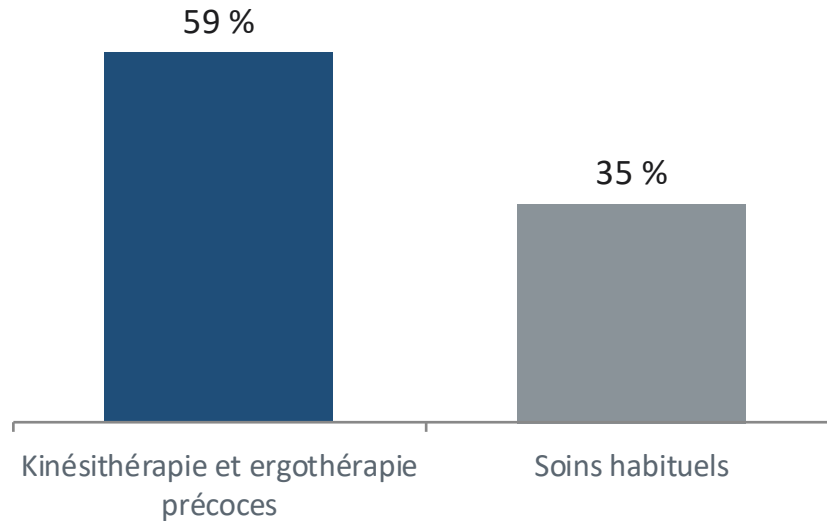
1,49 → 1,75 mm

épaisseur moyenne du diaphragme après passage du mode contrôlé au mode assisté (62 patients)



Mobiliser tôt : les membres, et aussi le diaphragme

Retour à l'autonomie fonctionnelle à la sortie (104 patients ventilés)



Même essai : **délirium 2 vs 4 jours, jours sans ventilateur 23,5 vs 21,1.**

Et le diaphragme ?

Essai randomisé, 80 patients ventilés > 72 h : avec un programme de rééducation précoce en 6 niveaux, la fraction d'épaississement diminue moins et la durée de ventilation est plus courte.

Au lit du patient : la P_Imax et la toux prédisent l'évolution

P_Imax ≤ 30 cmH₂O

chez 54 % des patients avant extubation ; mortalité à 1 an 31 % vs 7 % (HR 4,4)

Échographie du diaphragme

La dysfonction détectée ne prédisait pas l'échec d'extubation

Toux évaluée par les kinés

Une toux inefficace était associée à l'échec d'extubation

Étude multicentrique, patients à haut risque d'échec d'extubation

Entraînement inspiratoire en réanimation

	P _I max	Sevrage	Remarque
Elkins & Dentice 2015 10 études, 394 patients	+7 cmH ₂ O	succès RR 1,34	durée ↓ si sevrage difficile
Vorona 2018 28 études, 1 185 patients	+6 cmH ₂ O	-2,3 jours	bien toléré ; confiance faible
McCormack 2025 méta-analyse récente	+6,9 cmH ₂ O	-1,9 jour	confirme les synthèses précédentes

Effet constant sur la force, plus modeste et incertain sur le sevrage .

Pour qui et quand ?

Sevrage difficile

- Pas chez les patients sous NO
- Stable au niveau hémodynamique
- IMT très précoce → peu de bénéfices
 - surtout chez les patients en échec de sevrage
 - IMT chez tous les patients à J7 de VM (sauf CI)
- 80% des patients ventilés ne participeront pas car bas niveau de conscience ou délirium
- Pas de risque d'atélectasies ou de désaturation chez ces patients

ICU PATIENT INVASIVELY VENTILATED > 7 days:

Consider Inspiratory Muscle Training if

VENTILATOR-DEPENDENT:

- Alert and co-operative
- PEEP ≤ 10 cmH₂O
- FiO₂ < 0.60
- RR < 25
- Able to trigger spontaneous breaths on ventilator

RECENTLY WEANED* FROM INVASIVE VENTILATION:

- Alert and co-operative
- Capable of lip seal around mouth piece OR have a tracheostomy in situ
- FiO₂ < 0.60
- RR < 25

Fig. 2. Patient selection for inspiratory muscle training in ICU. ICU = intensive care unit; PEEP = positive end expiratory pressure; FiO₂ = fraction of inspired oxygen; RR = respiratory rate. * Recently weaned means independently breathing for 24 h per day without any invasive ventilatory support.

En pratique : mesure de la MIP / NIF



Fig. 4. Respiratory pressure meter connected to endotracheal tube via connector tube.



➔ Patients avec faiblesse des muscles inspiratoires modérée (≥ 28 cmH₂O) bénéficieraient le plus de l'IMT

Après la réanimation, la faiblesse persiste

37 %

de faiblesse respiratoire ($PI_{max} < 30$ cmH_2O) à la sortie de soins intensifs

43 %

de faiblesse inspiratoire persistante à la sortie de l'hôpital, après ≥ 7 j de ventilation

62 vs 94 cmH_2O

PI_{max} à 5 ans, avec ou sans faiblesse à la sortie de soins intensifs

À 5 ans, la faiblesse à la sortie est associée à une moins bonne force de préhension, une distance de marche plus courte et une fonction physique moindre (cohorte de Louvain).

➔ **Diaphragme et membres faibles ensembles : survie à 2 ans 36 % vs 79 % si aucune des deux.**

Stimuler le nerf phrénique pour aider au sevrage ?

RESCUE-2 (2022)

112 patients en échec de sevrage

Plmax +16,6 vs +4,8 cmH₂O ; sevrage 82 % vs 74 %, différence non significative

RESCUE-3 (2025)

216 patients en échec de sevrage

Sevrage à J30 : 70 % vs 61 %

Plus d'événements indésirables graves (36 % vs 24 %)

*Stimulation transveineuse temporaire par cathéter central : une piste prometteuse, **encore expérimentale.***

La lésion nerveuse : le nerf phrénique

Chirurgie cardiaque

32 % vs 2 %

paralysie avec vs sans refroidissement local par glace

Bloc interscalénique

100 %

de paralysie de l'hémi-diaphragme (échographie)

Amyotrophie névralgique

7,6 %

des patients ont une atteinte phrénique

Cause inconnue

jusqu'à 20 %

malgré un bilan complet

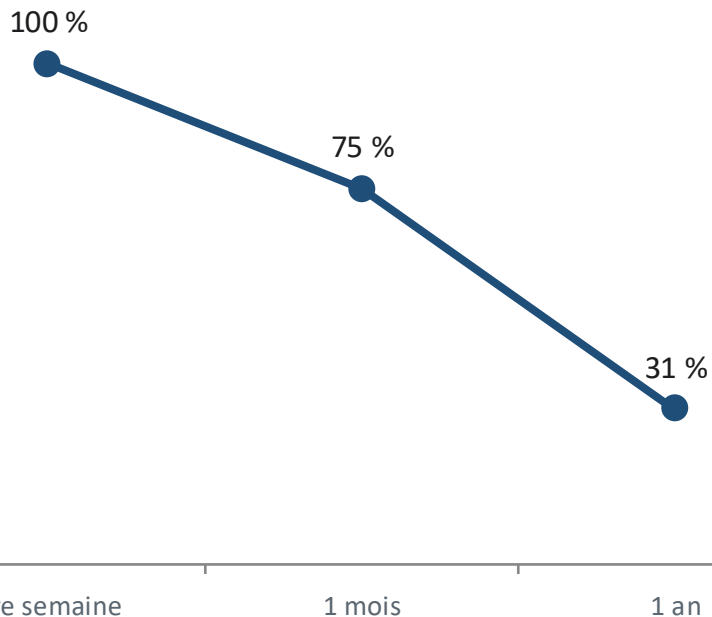
La lésion (per)opératoire du nerf phrénique reste la première cause.

Unilatérale ou bilatérale : deux tableaux, une même démarche

	Unilatérale	Bilatérale
Symptômes	dyspnée d'effort, parfois aucun	orthopnée, hypoventilation nocturne, fatigue
Chute de CV couché	7 à 23 %	19 à 37 %
Ratio PEmax/Plmax	augmenté	très augmenté ($\geq 2,7$ évocateur)
Échographie (sniff)	hémicoupole immobile ou paradoxale	les deux coupoles

Récupération possible, mais elle peut prendre des mois

Paralysie après chirurgie cardiaque : % encore paralysés

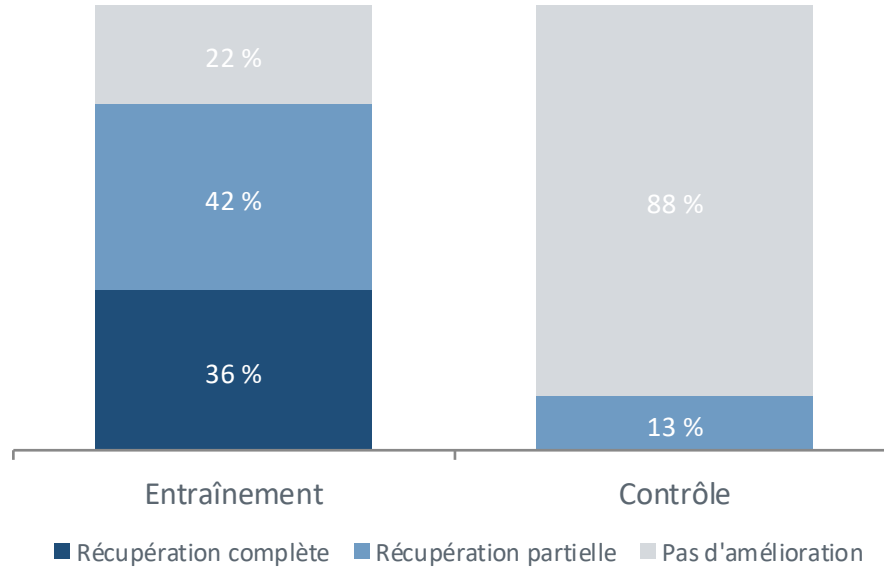


≤ 2 ans

pour une récupération au moins modérée chez la majorité des patients (amyotrophie névralgique)

L'entraînement inspiratoire améliore la mobilité et la dyspnée

Mobilité diaphragmatique à 12 mois (paralysie après chirurgie cardiaque)



Atteinte unilatérale (essai randomisé)

50 % de P_{lmax}, 30 inspirations 2 fois par jour, 6 mois.

P_{lmax} +28 cmH₂O, dyspnée et endurance à l'effort améliorées.

Le bénéfice passe par les muscles extra-diaphragmatiques : on entraîne le système, pas seulement le diaphragme.

Quand la rééducation seule ne suffit pas

1

VNI nocturne

Première ligne si atteinte bilatérale ou hypoventilation

2

Attendre

Laisser sa chance à la récupération spontanée avant toute chirurgie

3

Plicature diaphragmatique

Si symptômes persistants : > 70 % de retour à une respiration normale

mortalité hospitalière 0,5 %

Daniel : proposition de traitement

Entraîner les inspireurs

Charge à seuil, 50 % de la P_Imax, 30 inspirations, 2 fois par jour, 6 semaines

Poursuivre la réadaptation

Reprise progressive du vélo, en parallèle de l'entraînement inspiratoire

Éduquer

Expliquer que la récupération peut être lente ou absente
Objectif choisi avec lui : refaire du vélo

52 → 80

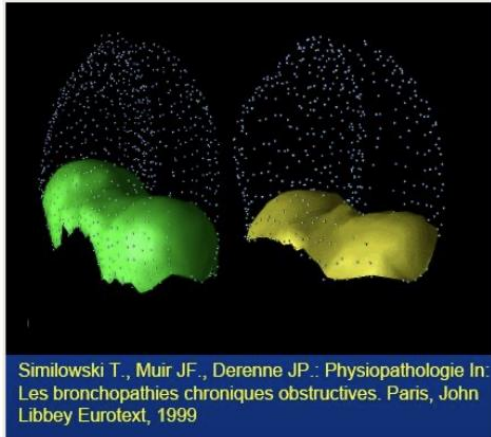
P_Imax (cmH₂O) à 4 mois

Suivi à 4 mois : l'hémicoupe gauche reste immobile à l'échographie, mais la dyspnée a diminué et il a repris le vélo.

Le diaphragme n'a pas récupéré ; l'entraînement agit par les muscles extra-diaphragmatiques.

Le diaphragme du BPCO : raccourci, mais il s'adapte

Un désavantage mécanique



Une adaptation cellulaire

- ↑ Fibre de type 1 (résistance à la fatigue)
- ↑ capacité aérobie (capillarisation, mitochondries)
- ↓ 40-60% surface transversale des fibres
- ↓ 30% de la teneur en chaînes Lourdes de myosine → ↓ force contractile

Paradoxe : un diaphragme « entraîné »
mais mécaniquement **désavantagé**

... mais l'adaptation a ses limites, surtout à l'effort

Au repos

La force globale reste réduite ; Même avec une Pimax “correcte” en valeur absolue, le désavantage mécanique existe toujours

À l'effort

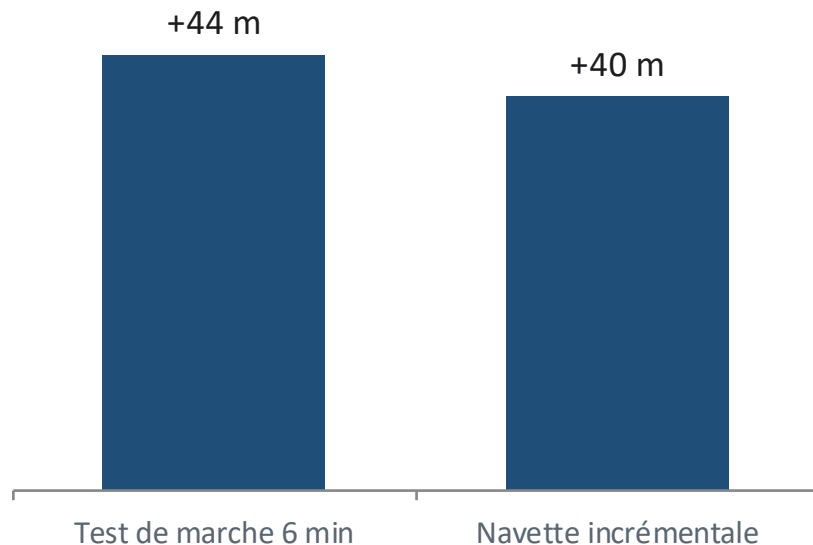
La distension dynamique s'ajoute : le diaphragme travaille encore plus court, et l'intolérance à l'effort augmente

Au long cours

Une Pimax basse est associée à une mortalité plus élevée

La réadaptation par l'exercice allège la charge du diaphragme

Gain de capacité à l'effort (65 essais, 3 822 patients)



Réadaptation respiratoire : Exercice, éducation et changement de comportement

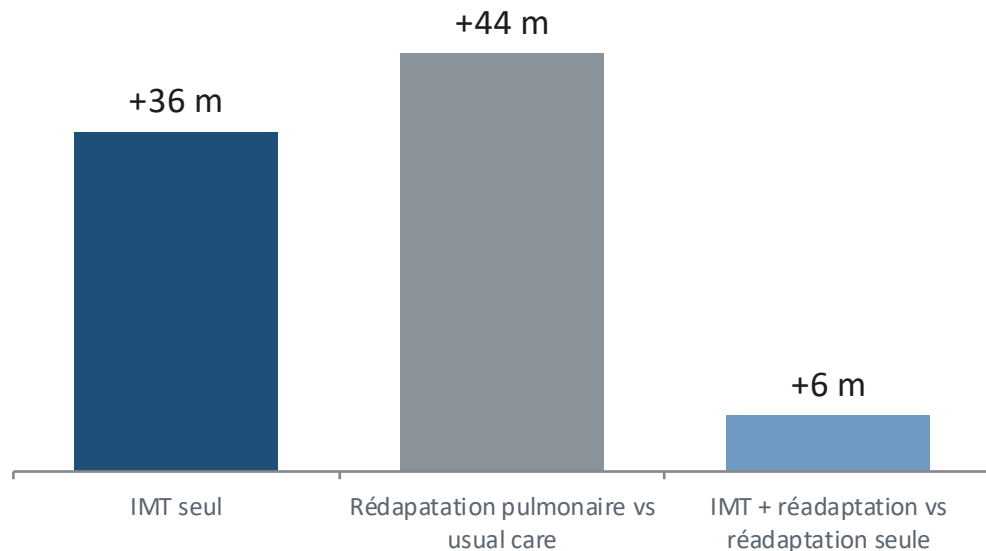
Dyspnée et qualité de vie améliorées au-delà du seuil cliniquement pertinent.

Le lien avec le diaphragme

L'entraînement à haute intensité réduit l'acidose lactique et la ventilation à l'effort, et diminue la distension dynamique à charge égale.

Entraîner les inspireurs : seul ou ajouté à la réhabilitation ?

Test de marche de 6 min : écart entre les deux groupes comparés



Entraînement seul : Mieux que rien !

dyspnée, qualité de vie et distance de marche améliorées.

Ajouté à la réhabilitation

PI_{max} +11,5 cmH₂O, mais **pas de bénéfice supplémentaire** sur la dyspnée, la marche ou la qualité de vie.

Rappel : MCID 6MWT = 25-30 m

Grands RCT: la force augmente, la fonction pas forcément

	Patients	Force inspiratoire	Effet fonctionnel
Charususin 2019	219, faibles (P _{Imax} 51)	↑ force et endurance	marche inchangée ; endurance sur vélo +75 s, moins de dyspnée à charge égale
Beaumont 2018	150, BPCO sévères	↑ P _{Imax}	pas de différence sur la dyspnée, QoL ou 6MWT
Schultz 2018	602, en réhabilitation	↑ P _{Imax}	pas d'effet supplémentaire



2026

Inspiratory muscle training increases strength of inspiratory muscles, ⁽¹⁷⁰⁹⁾ but this not consistently translate to better performance, reduced dyspnea or improved health related quality of life when added to a comprehensive pulmonary rehabilitation program. ⁽¹⁷¹⁰⁻¹⁷¹²⁾

Les maladies neuromusculaires

Une atteinte souvent précoce, et longtemps méconnue

12,9 ans

de délai diagnostique (cohorte belge de 52 patients)

7 sur 10

patients avec une chute de CVF > 25 % en position couchée

IRM

mobilité du diaphragme déjà réduite alors que la spirométrie assise est normale => mécanismes de compensation

Exemple : Maladie de Pompe à début tardif → 13 % des patients débutent par des symptômes respiratoires seuls ; le diaphragme peut être le premier muscle touché.

Entraîner : la controverse



Entraînement à haute intensité en NMD progressive

➔ Risque de surmenage neuromusculaire et d'accélération du déclin

Pas d'effet démontré

sur la toux, la dyspnée, la capacité physique ou la qualité de vie.

SLA

pas d'effet cliniquement pertinent sur la fonction ; preuves de faible certitude.

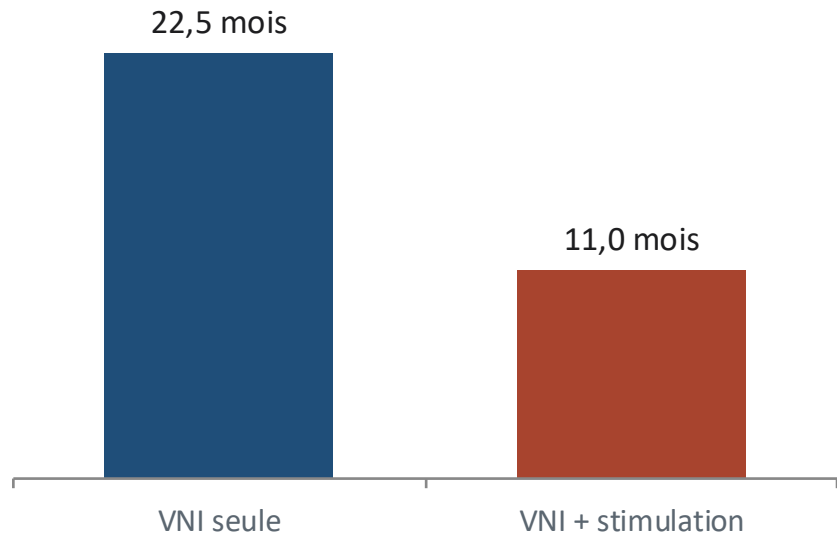
Consensus d'expert ERS 2019

Low-load IMT (<30% P_{imax}) acceptable si CVF > 60% prédit

Objectif : maintenir la fonction, ne pas forcer le renforcement

Stimuler le diaphragme dans la SLA : une fausse bonne idée

Survie médiane, SLA avec insuffisance respiratoire
(DiPALS)



Stimulation précoce (CVF 60–80 %)

survie sans VNI 6,0 vs 8,8 mois ; **essai arrêté pour surmortalité.**

Blessé médullaire

une option qui peut réduire la durée d'hospitalisation.

L'entraînement des muscles inspiratoires en NMD

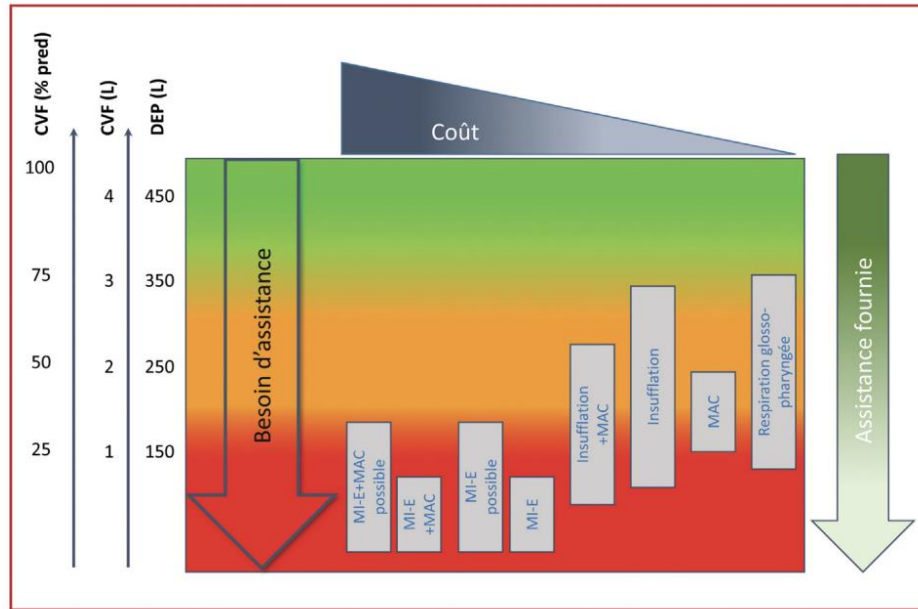
Etude Cochrane 2023 – NMD adultes

- Preuves insuffisantes pour conclure formellement pour ou contre l'IMT en NMD progressive
- Tendance favorable pour les NMD lentement progressives (faible risque de surmenage)
- → Approche prudente low-load justifiée, **suivi rapproché indispensable**

Protocoles IMT en NMD lentement progressifs

- Intensité : $\leq 20-30\%$ Pimax maximum
- Fréquence : 3-5 j/sem
- Durée : 15-20 min
- **STOP** si fatigue > 2h post-séance ou déclin SNIP rapide

Recommandations gestion de l'encombrement chez le NMD



La priorité : une stratégie de toux efficace !

Figure 2. Proposition du choix des techniques d'aide à la toux en fonction des paramètres de fonction respiratoire des patients (adapté de [77]). CVF : capacité vitale forcée ; DEP : débit expiratoire de pointe à la toux ; MI-E : in-exsufflation mécanique ; MAC : aide à la toux manuelle.

La VNI : au bon moment, elle prolonge la vie

Quand débiter ? (SLA)

- Orthopnée avec $PI_{max} < 60\%$ de la valeur prédite
- ou hypercapnie symptomatique

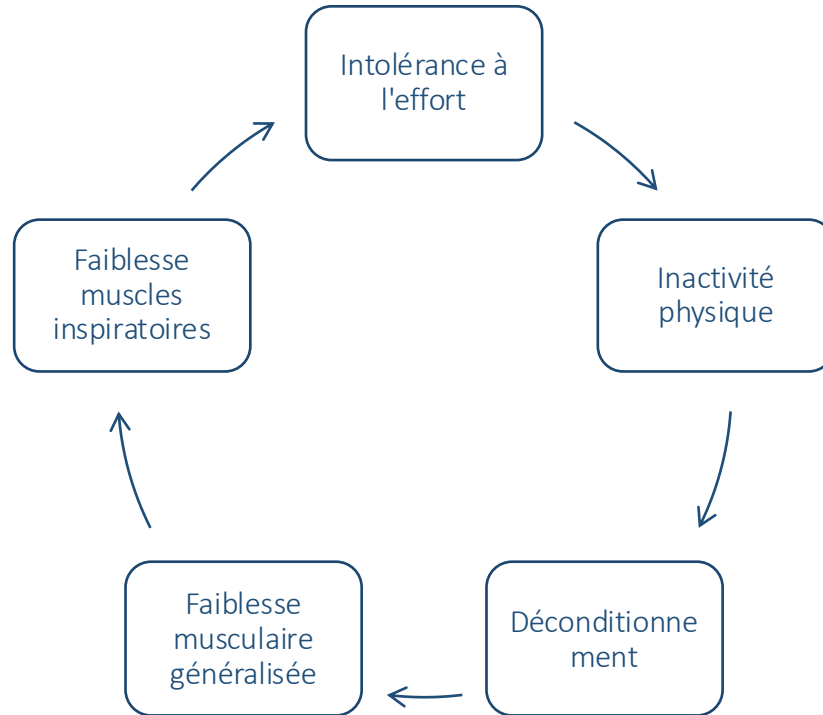
+205 jours

de survie, avec une qualité de vie maintenue, si la fonction bulbaire est préservée

Atteinte bulbaire sévère : meilleur sommeil, sans gain de survie.



L'IC: ne pas sous-estimer l'atteinte respiratoire



50%

des IC irréversibles présentent une faiblesse des muscles respiratoires ($P_{\text{imax}} < 70\%$)

P_{imax}

associée à la survie chez l'IC

IMT

↑ MIP ↑ 6MWT ↑ VO_2max ↑ QoL

D'autres situations où le diaphragme compte

Chirurgie cardiaque ou abdominale majeure

L'entraînement préopératoire réduit les complications pulmonaires post-opératoires

Tétraplégie

L'entraînement des muscles respiratoires améliore leur force

Mucoviscidose

Hétérogénéité importante
Intérêt du threshold PEP : renforcement + drainage mucociliaire

Obésité

Charge accrue sur le diaphragme et commande respiratoire augmentée

Asthme

Améliore la Pimax mais pas d'impact sur le nombre/gravité de crise

Modalités d'entraînement : prescription de la charge (FITT)

Frequency

- 5–7 jours/semaine (IMT classique)
- Phase entretien : 2–3 j/sem
- ICU : 5 séances/sem supervisées
- Charge $\geq 30\%$ P_Imax

Intensity

- 20–30 % P_Imax ?
- 40–50 % ?
- 50–75 % ?
- Borg cible : ? / 10

Time

- 15–30 min par séance
- Ex : 7 × (2 min + 1 min repos)
- Ou 30 répétitions × 2 séries
- ICU : 5 × 6 respirations/j

Type de dispositif

- Valve seuil (Threshold IMT)
- POWERbreathe (électronique)
- Spirotiger (hyperpnéa)
- Résistance fixe



Modalités d'entraînement : résumé par pathologie

Adaptation du protocole selon la population

Population	Intensité	Fréquence	Durée totale	Objectif
BPCO stable	30–60 % P _I max	5–7 j/sem	8–12 sem	Force + endurance
IC (MIP < 70 %)	30–60 % MIP	5 j/sem	8–12 sem	VO ₂ max, 6MWT, QoL
ICU / sevrage	> 50 % P _I max	5 j/sem	Jusqu'à extub.	Succès sevrage
Pré-op chir.	15–30 % → ↑	6–7 j/sem	≥ 14 j avant	↓ atélectasies, PPC
NMD progressive	≤ 30 % P _I max	3–5 j/sem	Continue, low-load	Préserver fct.



Modalités d'entraînement : mais quand s'arrêter ?

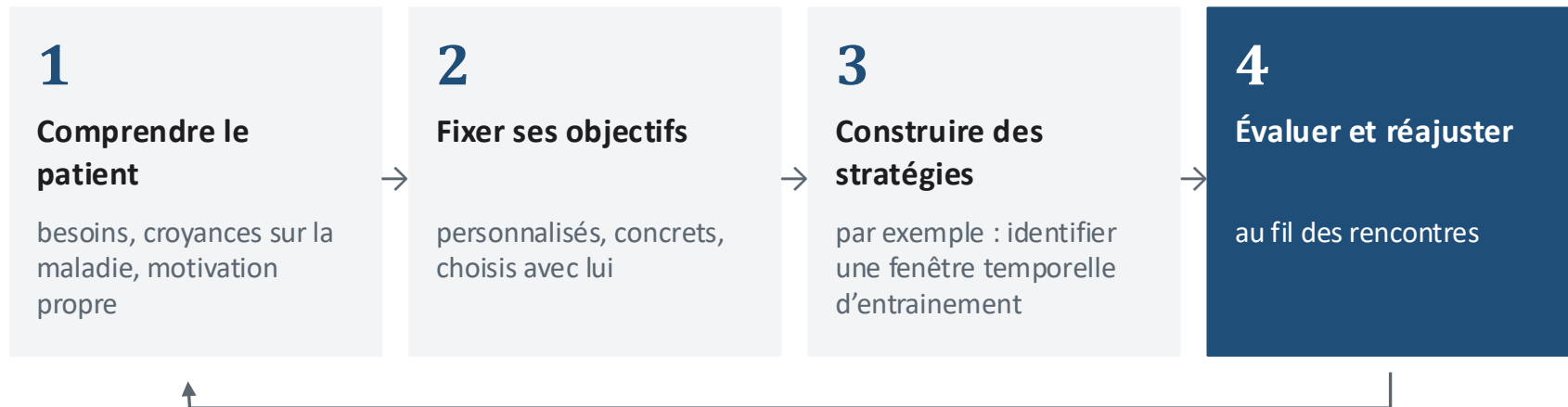
Contre-indications & prudence

- Pneumothorax non drainé
- Chirurgie thoracique récente < 2 semaines
- Hypertension intracrânienne
- Tympan perforé (pour valve buccale)
- Rupture œsophagienne, hernie hiatale compliquée
- Instabilité hémodynamique (ICU)
- NMD avancée : low-load uniquement (< 30 % P_Imax)
- Infection respiratoire aiguë : différer jusqu'à stabilité

Critères d'arrêt de séance

- Désaturation > 10 % (SpO₂ < 88 %)
- Fréquence cardiaque ± 20 % du repos
- Pression artérielle ± 20 %
- Apparition d'arythmie
- Douleur thoracique, céphalée inhabituelle
- Borg dyspnée > 7/10 ou Borg effort > 8/10
- Agitation, confusion (ICU)
- Fatigue post-séance persistante > 2 h

Améliorer l'adhérence : éducation thérapeutique



Objectif : motiver, impliquer et soutenir le patient pour qu'il adapte ses comportements de santé et développe ses compétences.

Outils : techniques de changement de comportement, discours adapté à **son niveau de littératie**.

Education thérapeutique : comprendre et être compris

Ce que le patient doit comprendre

- Les muscles respiratoires **se travaillent** comme n'importe quel autre muscle
- Le **bénéfice attendu** dépend de la pathologie : clarifier dès le départ pour éviter déception
- **L'IMT ne remplace pas l'activité physique** : il la complète ou la prépare
- Les **progrès** ne sont visibles qu'après 4–6 semaines régulières
- **Sensation attendue** pendant la séance : effort inspiratoire marqué, pas de douleur
- Une sensation de **fatigue modérée** 30 min après est normale
- En cas d'exacerbation : suspendre et reprendre quand stable
- Importance du **journal de bord** (simple case à cocher quotidienne)
- La charge sera **augmentée progressivement** → pas d'auto-progression brutale



Education thérapeutique : comment y arriver ?

Leviers d'observance

- **Définir un objectif fonctionnel** concret avec le patient (monter 1 étage, jardiner 20 min)
- Associer la séance à une **routine** existante (brossage dents, café du matin)
- Dispositif avec **feedback** : POWERbreathe K-series augmente l'adhérence
- **Auto-suivi** : Application smartphone ou journal papier (checklist)
- **Contacts** courts programmés : SMS, télé-suivi à S2, S6, M3
- Séance initiale **supervisée** : vérifier technique, rassurer sur l'effort ressenti
- **Impliquer l'entourage** : famille témoin du programme, renforcement positif
- **Visualiser les progrès** : courbe PImax imprimée, données exportées
- Reformuler les bénéfices observés à chaque réévaluation



À retenir

1

Suspecter

orthopnée, dyspnée d'effort, paradoxe abdominal : penser au diaphragme

›

2

Mesurer

CV assis puis couché, PImax, SNIP : du simple au compliqué

›

3

Entraîner

adapté à la pathologie et au patient

›

4

Accompagner

éducation thérapeutique pour tenir dans la durée

Le diaphragme est un muscle : il s'évalue et il s'entraîne, comme les autres.

Merci !

